

Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. K.-H. Wehking

UNIVERSITÄT STUTTGART



Robert Schulz

**Simulationsgestützte Beurteilung
der logistischen Qualität
innerbetrieblicher Entsorgung**

Mai 2002

Simulationsgestützte Beurteilung der logistischen Qualität innerbetrieblicher Entsorgung

Von der Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Robert Schulz
geboren in Esslingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. K.-H. Wehking
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. E. Westkämper
Tag der Einreichung: 25. Juli 2001
Tag der mündlichen Prüfung: 16. Januar 2002

Institut für Fördertechnik und Logistik
der Universität Stuttgart
2002

meinem Vater

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. K.-H. Wehking, dem Leiter des Instituts, für die Anregung zu diesem Thema, die Förderung sowie seine wertvollen Ratschläge zu dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. E. Westkämper vom Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart danke ich für die Durchsicht der Ausarbeitung und für die Übernahme des Mitberichtes.

Bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts. Mein Dank gilt insbesondere auch meinen Kollegen aus der Abteilung „Fördertechnik für die Entsorgung“ Herrn Dr.-Ing. Heimsoth, Herrn Dipl.-Ing. Luckner, Herrn Dipl.-Ing. Mallée, Herrn Dipl.-Ing. Schwarz und Frau Dipl.-Ing. Anderseck, deren stete Hilfsbereitschaft und Unterstützung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein großer Teil meiner praktischen Erfahrung habe ich auf vielen Dienstreisen bei den Vorortuntersuchungen in den Industrieunternehmen sammeln können. Die anschließenden Diskussionen mit den Kollegen auf der Heimfahrt haben mich zu einigen wertvollen Anregungen inspiriert, die ich in diese Arbeit einfließen lassen konnte.

Die hervorragende Atmosphäre in der Abteilung führte über das kollegiale Arbeiten im Team hinaus zu persönlichen Bindungen, die ich mir wünsche, dass sie noch lange anhalten werden.

Meiner Mutter und meiner Schwester danke ich für ihre Geduld und Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit.

Robert Schulz

Stuttgart, Mai 2002

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abkürzungen und Formelzeichen | 7 |
| Zusammenfassung | 10 |
| Abstract..... | 12 |
| | |
| 1 Einleitung | 19 |
| 1.1 Ausgangssituation | 19 |
| 1.2 Anforderungen an die zukünftige Planung von Industrieentsorgung ... | 20 |
| | |
| 2 Zielsetzung der Arbeit | 22 |
| | |
| 3 Entwicklung und Analyse der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik | 24 |
| 3.1 Grundlagen | 24 |
| 3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen..... | 24 |
| 3.2.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz..... | 25 |
| 3.2.2 EG-Öko-Audit-Verordnung / ISO 14001..... | 26 |
| 3.2.3 Verpackungsverordnung | 27 |
| 3.3 Begriffsabgrenzung Industrieabfälle | 27 |
| 3.3.1 Nicht überwachungsbedürftiger Abfall..... | 28 |
| 3.3.2 (Besonders) überwachungsbedürftiger Abfall | 29 |
| 3.3.3 Volumenabfall | 29 |
| 3.3.4 Produktionsspezifischer Abfall | 30 |
| 3.4 Darstellung der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik | 30 |
| 3.4.1 Einführung..... | 30 |
| 3.4.2 Kostenbetrachtung | 34 |
| 3.4.3 Stellenwert der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik | 36 |
| 3.5 Systemelemente der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik | 37 |
| 3.5.1 Sammelsysteme..... | 38 |
| 3.5.2 Sammel- und Bereitstellungsverfahren | 39 |
| 3.5.3 Förder-, Transport- und Umschlagmittel für die Sammlung und den Transport von Abfällen in der Industrieentsorgung | 43 |
| 3.5.4 Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik | 48 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4 | Qualität der Entsorgungslogistik und deren Abgrenzung zur Versorgungslogistik | 52 |
| 4.1 | Funktionelle und institutionelle Abgrenzung der Ver- und Entsorgungslogistik..... | 52 |
| 4.2 | Definitionen..... | 55 |
| | 4.2.1 Produktionsprozess und Produktionslogistik..... | 55 |
| | 4.2.2 Entsorgungsprozess und Entsorgungslogistik..... | 56 |
| 4.3 | Zeit- und kostenkritische Zusammenhänge im Produktions- und Entsorgungsprozess | 59 |
| 4.4 | Bestimmung der logistischen Qualität von Entsorgungsstrukturen..... | 60 |
| | 4.4.1 Definition Qualität..... | 60 |
| | 4.4.2 Logistische Zielgrößen der Ver- und Entsorgung..... | 61 |
| | 4.4.3 Kennzahlen als Indikatoren der logistischen Qualität..... | 65 |
| | 4.4.3.1 Logistische Kennzahlen | 65 |
| | 4.4.3.2 Spezifische Kennzahlen der innerbetrieblichen Entsorgung | 66 |
| 5 | Einsatz von Simulationstechnik zur Abbildung der Abfalllogistik im Modell.... | 68 |
| 5.1 | Simulationskonzepte..... | 69 |
| 5.2 | Regelkreis der Simulation..... | 70 |
| 5.3 | Allgemeine Zusammenhänge in der Simulation | 71 |
| 5.4. | Das Simulationsprogramm SimdiAl | 73 |
| | 5.4.1 Auswahl der Simulationssoftware | 75 |
| | 5.4.2 Modellelemente..... | 75 |
| | 5.4.3 Aufbau des Simulationsprogramms SimdiAl | 77 |
| | 5.4.4 Die Modellbildung..... | 79 |
| 6 | Simulation der innerbetrieblichen Abfalllogistik | 95 |
| 6.1 | Die Abfallgenerierung in der Simulation | 95 |
| 6.2 | Die Abfalllogistik in der Simulation..... | 100 |
| | 6.2.1 Transportkettenvarianten in der Simulation..... | 101 |
| | 6.2.2 Sammelstrategien im Umleer- und Wechselverfahren..... | 105 |
| | 6.2.3 Behältermatrix und Wegberechnung für die Sammelstrategie in der Halle | 108 |
| 6.3 | Wartezeiten bei der Auftragsabwicklung | 111 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.4 | Zeitliche Auslastung von Kapazitäten der Simulationsfahrzeuge | 112 |
| 6.5 | Mittlerer Füllstand der Abfallsammelbehälter | 113 |
| 6.6 | Registrierung der Bearbeitung von Aufträgen in der Simulation | 114 |
| 6.7 | Statistik und Verteilungen | 115 |
| 7 | Beurteilung der logistischen Qualität von innerbetrieblichen Entsorgungsstrukturen anhand von Simulationsergebnissen | 120 |
| 7.1 | Darstellung und Diskussion der Simulationsergebnisse | 120 |
| 7.1.1 | Messgrößen während des Simulationsdurchlaufs..... | 120 |
| 7.1.2 | Ergebniskennzahlen nach Ablauf der Simulation..... | 123 |
| 7.1.3 | Optimierungsansätze im Planspiel | 125 |
| 7.2 | Validierung der Simulationsergebnisse..... | 127 |
| 7.2.1 | Allgemeine Validierung | 128 |
| 7.2.2 | Validierung am Beispiel realer Unternehmensdaten | 138 |
| 8 | Schlussbetrachtung..... | 143 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 143 |
| 8.2 | Ausblick | 145 |
| 9 | Literatur | 146 |
| 10 | Anhang..... | 150 |

Abkürzungen und Formelzeichen

A Abkürzungen

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------|--|
| AbfG | Abfallgesetz von 1986 |
| AF | Abfallfraktion (Kürzel) |
| ASF | Abfall-Sammel-Behälter für flüssige Sonderabfälle |
| ASP | Abfall-Sammel-Behälter für pastöse und feste Sonderabfälle |
| Bk | Behälterkapazität |
| DS | dezentrale Senke |
| DSD | Duales System Deutschland |
| EAK | Europäischer Abfallkatalog |
| EWG | Europäische Wirtschaftsgemeinschaft |
| FTF | Fahrerloses Transportfahrzeug |
| H | Hallenbezeichnung (Kürzel) |
| IDM | ISA Dialog Manager |
| KrW-/AbfG | Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz von 1996 |
| LAbfG | Landesabfallgesetz |
| MGB | Müllgroßbehälter |
| PPK | Papier, Pappe und Kartonage |
| SimdiAI | Simulationsprogramm: Simulation der innerbetrieblichen Abfalllogistik |
| STULB | Sammeln, Transportieren, Umschlagen, Lagern, Behandeln |
| STM | Sammel- und Transportmittel (in der Simulation) |
| TM | Sammel- und Transportmittel bzw. Poolfahrzeug (in der Simulation) |
| UL, US | Umladen, Umschlagen |
| uv | unverdichtet |
| v | verdichtet |
| ZS | zentrale Senke |

B Formelzeichen

| Formelzeichen | Einheit | Bedeutung |
|------------------------|----------------|--|
| ae | - | Anzahl der Einsätze des Simulationsfahrzeugs |
| af | - | Nummer der Abfallfraktion |
| Ane | % | Anteil nicht erledigter Aufträge |
| as | - | Anzahl der Schichten mit Abfallanfall |
| Ausl _i | % | Auslastung des Simulationsfahrzeugs nach dem Einsatz i |
| AV _{i, af, h} | m ³ | Abfallvolumen im Sammelbehälter i der Abfallfraktion af in der Halle h |
| BV _{i, af, h} | m ³ | Behältervolumen des Sammelbehälters i der Abfallfraktion af in der Halle h |
| FS _s | % | Füllstand der Abfallfraktion af aus Halle h in der Schicht s |
| h | - | Nummer der Halle |
| i | - | allgemeiner Zähler; Definition siehe Formel im Text |
| j | - | allgemeiner Zähler; Definition siehe Formel im Text |
| k _H | % | Verteilungsschlüssel zur Verteilung der Abfallfraktion auf mehrere Hallen |
| m | - | allgemeiner Zähler; Definition siehe Formel im Text |
| M | t | Gesamtjahresabfallmenge der betrachteten Abfallfraktion |
| m _i | t | Abfallmenge im Monat i |
| m _{Konto, i} | t | Abfallmenge im Konto des Abfallsammelbehälters i |
| m _P | t | durchschnittliche Menge pro Ereignis eines allgemeinen Prozesses P |
| m _s | t | Abfallmenge pro Schicht |
| m _{SHB} | t | Abfallmenge pro Schicht, pro Halle und pro Abfallsammelbehälter |
| mAne | % | mittlere Anteil nicht erledigter Aufträge |
| mAusl | % | mittlere Auslastung des Simulationsfahrzeugs |

| Formelzeichen | Einheit | Bedeutung |
|-----------------------------|------------------|--|
| mFS | % | mittlerer Füllstand |
| mWZ _{af, h} | s | mittlere Wartezeit der Abfallfraktion af aus der Halle h |
| n | - | allgemeiner Zähler; Definition siehe Formel im Text |
| P | s | Länge des Bezugszeitraums |
| s | - | Nummer der Schicht |
| t _j | s | Auftragszeit des Sammel- und Transportvorgangs j, |
| t _{WZ, i, af, h} | s | Wartezeit des Sammelbehälters i der Abfallfraktion af aus der Halle h |
| V _i | m ³ | Volumen des Abfallsammelbehälters i |
| w _i | - | Wertigkeitsfaktor des Abfallanfalls im Monat i |
| Z _{A gesamt} | - | gesamte Anzahl der Aufträge pro Einsatz des Simulationsfahrzeugs |
| Z _{Befüllungen, i} | - | Anzahl Befüllungen für Abfallsammelbehälter i |
| Z _{Behälter} | - | Anzahl Abfallsammelbehälter |
| Z _{Umleerungen, i} | - | Anzahl der erforderlichen Umleerungen für Abfallsammelbehälter i |
| ZeA | - | Anzahl erledigter Aufträge pro Einsatz des Simulationsfahrzeugs |
| ZneA | - | Anzahl nicht erledigter Aufträge pro Einsatz des Simulationsfahrzeugs |
| φ | - | Füllgrad des Abfallsammelbehälters; Verhältnis aus dem Behältervolumen, bei dem der Behälter geleert werden soll, und dem maximalen Behältervolumen. |
| λ _τ | - | Taktrate eines Prozesses |
| λ _P | - | mittlere Durchsatzrate eines Prozesses |
| ρ | t/m ³ | Dichte der Abfallfraktion |
| τ _P | s | mittlere Taktzeit der Ereignisse eines allgemeinen Prozesses P |

Zusammenfassung

Die umweltgerechte Produktion hat in den letzten Jahren einen immer größeren Stellenwert in den Unternehmen erlangt, was nicht nur auf das Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes im Oktober 1996 zurückzuführen ist. Vor allem die Kostenreduzierung bei der Entsorgung der Abfälle und die Imageförderung machen Investitionen in den Umweltschutz für ein Unternehmen lukrativ. Die größten Einsparungspotentiale werden im Bereich der Entsorgungslogistik vermutet, da hier bisher im Gegensatz zur Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik nur geringe Anstrengungen zur Gestaltung von Materialfluss und Informationsfluss betrieben wurden.

Die überwiegende Zahl der Entsorgungskonzepte und -systeme in Industrieunternehmen sind historisch gewachsen, ohne dass eine detaillierte Planung, bzw. eine systematische Auslegung der Entsorgung zuvor oder auch während des laufenden Betriebs durchgeführt wurde. In den meisten Unternehmen beruht die Gestaltung und Auslegung von entsorgungslogistischen Prozessen auf Erfahrungswerten. Eine strukturierte Vorgehensweise bei der Auslegung ist weitgehend unbekannt.

Die Hauptaufgabe der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik ist es, entsorgungslogistische Prozesse zeit- und kostenmäßig zu optimieren. Zur Bewältigung dieser Anforderungen müssen neue Voraussetzungen für die Planung der Industrieentsorgung geschaffen werden, wie z. B. die Möglichkeit zur objektiven Bewertung der Abfalllogistik im Betrieb durch die Ermittlung und Pflege von geeigneten Kennzahlen

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung der Qualität innerbetrieblicher Entsorgungslogistik. Ziel ist es, die Güte der logistischen Qualität zu ermitteln, um eine objektive Bewertung der Entsorgungslogistik von einzelnen Unternehmen vornehmen zu können. Hierfür wurde das Simulationsprogramm SimdiAI (Simulation der innerbetrieblichen Abfalllogistik) konzipiert und entwickelt, mit dem die Abfalllogistik von unterschiedlichen Industrieunternehmen im Simulationsmodell abgebildet und dadurch das dynamische Verhalten untersucht werden kann.

Der Nutzen, der durch den Einsatz von Simulation in der innerbetrieblichen Abfalllogistik entsteht, liegt zum einen in der Erhöhung der Planungsgenauigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung des gesamten Planungsaufwandes bei der Gestaltung von innerbetrieblichen Entsorgungskonzepten. Zum anderen werden durch das strukturierte Vorgehen bei der Ermittlung der Eingangsdaten und der Durchführung von Simulationsexperimenten die logistischen Entsorgungsprozesse transparent und damit für den Planer begreifbar. Veränderte Rahmenbedingungen der innerbetrieblichen

Abfalllogistik können durch Variation der Eingabeparameter während des Betriebes durch die Simulation geprüft oder bei der Planung neuer Entsorgungskonzepte im Vorfeld simuliert werden.

Abstract

During recent years environmentally aware production has become more prominent within companies, not only as a result of the introduction of the Kreislaufwirtschaftsgesetz (german recycling law), which came into force in October 1996. Above all else, the reduction of costs arising during waste disposal and the promotion of the corporate image make investments into environmental protection beneficial for a company.

The greatest potential for economies are presumed to be in the area of waste disposal logistics, because until now, in contrast to procurement, production and distribution logistics, only few efforts were made in this area to ensure the flow of information and material. Consequently the future planning of industrial waste disposal has to play a central role.

The majority of disposal concepts and systems used in industry have developed progressively without detailed planning or a systematic interpretation of waste disposal before or during on-going operations. In most companies the organisation and the interpretation of processes concerning waste disposal logistics are based on empirical values. A methodical procedure concerning the interpretation is largely unknown. Optimising waste disposal logistics processes plays a subordinate role in relation to the conditions required by law. In the future, this approach concerning the planning of in-house waste disposal and monitoring in companies will no longer be able to be sustained, if only for financial reasons.

The main objective of in-house disposal logistics is to optimise disposal logistic processes from the point of view of time and cost. In order to achieve this objective, new conditions concerning the planning of industrial waste disposal must be set, such as the possibility to evaluate in-house waste disposal logistics objectively as a result of the determination and processing of suitable key performance indicators (KPIs). Presently, individual companies and external waste disposal concerns practice a predominantly subjective evaluation and planning of in-house disposal structures. A uniform procedure concerning the interpretation of in-house disposal logistics is largely unknown at present.

The submitted paper describes the development of a procedure to evaluate the quality of in-house waste disposal logistics. The objective is to determine the level of logistic quality, in order to be able to perform an objective evaluation of the disposal logistics of different companies. This also allows a general comparison to be drawn between companies. A simulation program called SimdiAI (simulation of in-house waste logistics) was conceived and developed for this purpose, which allows the

waste disposal logistics used by different industrial companies to be depicted and also allows the dynamic behaviour of the simulation model to be examined.

The approach and the objectives of this work are structured in Chapter 2 as follows:

- 1) Representation of the current situation in in-house waste disposal logistics using companies in chosen industries as examples
- 2) Determination and description of the elements of in-house disposal logistics; deduction of process chains arising during in-house disposal logistics
- 3) Determination of common and different logistic features of the supply and waste disposal of industrial companies
- 4) Definition of the logistic quality; description of the logistic targets and KPIs specific to waste disposal
- 5) Reproduction of the evaluated real disposal processes in a dynamic simulation model

Chapter 3 describes the current situation of in-house disposal logistics using empirically determined data, which was gained from on-site investigations from a total of 36 industrial companies from processing industries. For this, the disposal costs are first of all structured and the value of in-house disposal logistics is represented. It results in a not insignificant proportion of the costs of in-house disposal logistics of about 44% on average of the overall disposal costs of an industrial company, which justifies taking a more detailed view of in-house collection and transportation logistics. After this, the system elements of the in-house waste disposal are described. They include the collection systems, which are divided into discharge, exchange and one-way procedures, the collection and provision procedures, which are differentiated depending on whether the collection is done centrally, de-centrally or in a pool system, and also the means of conveyance, transportation and handling to collect and transport the waste of in-house disposal logistics.

Finally, the six process chains for in-house waste disposal occurring most frequently in practice are elaborated upon, which serve as a basis for the simulation of integrated transport chains.

In order to evaluate the logistic quality of in-house waste disposal, KPIs are determined in Chapter 4, which were derived from the logistic targets for the supply and waste disposal of industrial companies. Before that, the logistic targets are specified and interpreted in dependency of the reference processes (sub-processes) of the production and waste disposal logistics, as well as the connection between the pro-

duction and disposal processes critical to cost and time. The so-called STULB processes (collection, transportation, handling, storage, treatment) constitute part of the waste disposal logistics sub-processes, whereby the collection of waste is considered as a process specific to waste disposal, in contrast to the other sub-processes mentioned above. Using the KPIs, which are later gained from a simulation experiment, the achievement of objectives of the logistic targets may be quantified and therefore be made measurable.

The KPI results refer particularly to the primary non-monetary targets (being on schedule, run duration, performance, continuance). The monetary targets (costs) are essentially influenced and limited by the non-monetary targets. Consequently the quantitative value of this target is the respective result from the maximisation or minimisation of the non-monetary targets.

For example, the specific running costs of a means of conveyance decrease as its utilisation increases. In the following, the four most important logistic KPIs are given, which allow the quantification of the non-monetary targets of in-house waste disposal, which can particularly be used as KPI results in the simulation:

- a) Waiting periods during the processing (discharging of the collection containers):
 - absolute waiting period of the collection containers [s], mean waiting period [s]
- b) Time-based utilisation of the capacities of the vehicles in the simulation:
 - absolute utilisation [s] or [%], mean utilisation [s] or [%]
- c) Fill level of the waste collection containers:
 - mean level [%],
- d) Registration of the treatment of the orders for discharging the containers:
 - mean proportion of incomplete orders [%].

Chapter 5 describes the areas for possible use of simulations (analysis of the dynamic character of a system), as well as the approach concerning the transfer of the real processes into the simulation. Additionally the general structure of the simulation program SimdiAI is presented, which is used in this work for the determination of the logistic quality of in-house waste disposal. The simulation program was developed with the help of the simulation software Simple++ from Tecnomatix AESOP and consists of the modules Model construction, Waste generation and Waste disposal logis-

tics. The Model construction module establishes the interface to the user. With this module the user produces the simulation model to be examined. Here the real data from a company is transferred to the simulation model on a computer. The difference between the module Model construction and the modules Waste generation and Waste disposal logistics consists in the fact that the construction of the model must be completed before the simulation time is started (passive module).

Chapter 5 describes the approach of creating the model in the simulation using a sample company (experimental game) as an example. The creation of the model with the help of the module Model construction is thereby orientated towards the given model elements deduced from (real) process chains for in-house waste disposal logistics (cf. Chapter 3) that have come to the fore in practice and transferred by abstraction into the simulation model. The Model construction is divided into the sub-modules Waste management, Waste logistics and Automatic generation of the simulation model. The sub-module Waste management determines above all the distribution of the quantities of waste of the different waste groups in the simulation. The distribution of the annual quantities of waste over the corresponding reference time in the simulation (year of operation = year of simulation) can be described by three different methods of distribution (definition of quantitative tendencies, principle of the arithmetic mean, stochastic and empirical distribution). In the sub-module Waste logistics the initial extent of waste logistics and all relations from the source to the refuse-collection point are defined, i.e. the flow of waste material from the source of waste to the in-house refuse collection point, as well as the number of vehicles in the simulation and their characteristics. The input parameters of the experimental game are again summarised in tabular form at the end of Chapter 5. Finally, the simulation model is generated by using the sub-module Automatic generation of the simulation model.

The creation of the model is menu-driven and is designed in such a way that no special knowledge of simulation is pre-requisite for the application of the simulation program.

Chapter 6 describes the active modules Waste generation and Waste logistics. The module Waste generation ensures that during the simulation the waste arises in intervals and generates tasks to the means of collection and transportation in the simulation, as soon as the respective waste collection containers must be emptied.

The module Waste logistics manages the disposal of waste generated in the module Waste generation. The logistics in the simulation are based thereby on the in-house waste disposal transport chains for in-house collection by using the procedures Discharge process and Exchange process. These transport chains are the result of the abstraction of real waste logistics into the simulation model.

The collection procedures depend on the means of collection and transportation and they are differentiated between the Discharge process and the Exchange process. The two-stage collection is depicted in the simulation model using a pool position and a pool vehicle.

In order to be able to obtain a sufficiently accurate picture in the simulation of the in-house distances covered without requiring excessive effort for the definition of the different positions of containers, the in-house waste collectors are laid out in a grid pattern. The grid pattern is defined by its dimensions in x and y directions (distances of the containers in x and y directions) and is laid out in such a way that the difference of the individual distances of the containers in x and y directions is minimised. The dimensions of the grid pattern can be calculated in an iterative procedure from the number of containers, which are made available in the hall for the collection of a waste group, and from the length and width of the hall.

Finally, Chapter 6 presents the calculation of the in Chapter 4 defined KPI results of the simulation and describes the approach to define the distribution of the quantity of waste using an empirical or stochastic distribution.

Chapter 7 presents and discusses the KPI results obtained from the simulation during and after the complete run of a simulation experiment. Different optimisation approaches help to show how the calculated modification of input parameters into the simulation model can optimise the depicted disposal concept of the experimental game. The evaluation criteria thereby used for the logistic quality of the examined waste logistics in the simulation model were the in Chapter 4 determined KPIs mean utilisation of the means of collection and transportation, mean waiting period of the waste collection containers till discharge, mean fill level of the waste collection containers and the proportion of incomplete tasks. Optimisations may be obtained, for example, by modification of the collection strategy from centrally to de-centrally realised collection, by increasing the container capacity of the means of collection and transportation or of the collection volume of the containers.

Then follows a validation of the simulation results. Two different methods of validation of the simulation program will be performed (general validation and validation by using real company data), which prove the plausibility and validity of the KPI results determined by SimdiAI. During the general validation the parameter test is combined with the deterministic test (if possible all stochastic processes in the simulation are switched off). The remaining KPI results can be represented and interpreted in a diagram in dependency of the variation of a parameter (such as the quantity of waste, the container volume or the number of containers). During the general validation two different model versions are established in the simulation.

The validation of the simulation results in accordance to the first version has the objective to interpret the KPI results of a simulation experiment in dependency of the quantity of waste. For this, particularly the behaviour of the means of collection and transportation with regard to their utilisation and their collection strategy is judged in dependency of the quantity of waste. Furthermore, the mean fill levels of the collection containers, as well as their waiting periods till discharge, are examined in dependency of the quantity of waste and the means of collection and transportation.

The validation of the simulation results in accordance to the second version has the objective to interpret the mean utilisation of the means of collection and transportation in dependency of the size and number of the collection containers situated in the hall.

During the validation using real company data the simulation results are compared with the measurements and analytically calculated KPIs of the real company. The real company examined is a supplier to the automobile industry and has a total of approximately 2000 employees, 1300 of whom work in production. They produce on three shifts, whereby the waste disposal is only done on two shifts. These KPIs were compared with the number of discharges per waste group, the duration of a collection tour using the Discharge process and the Exchange process, as well as the whole expenditure of time per day for the disposal of the waste groups.

The validation of the simulation results using a combination of the deterministic test and the parameter test has shown that the KPI results of the simulation behave approximately in such a way as was generally expected. For example, the simulation results show the expected behaviour of this KPI with respect to the dependency of the mean utilisation of the means of collection and transportation to the quantity of waste and of the volume of the collection containers. This concerns also the remaining examined KPI results. The different characteristics of the means of collection and transportation using the Discharge process and the Exchange process could be justified and interpreted on the basis of the results of the simulation. Consequently the plausibility of the KPI results is theoretically proven.

The validation by using real company data has shown, that the simulated KPIs greatly match the analytically calculated KPIs. The KPI results obtained from the simulation also greatly match the measured real KPIs (difference < 10%). This results above all from the fact that the precondition of a constant distribution of the quantity of waste for a comparison between the analytic calculation, the simulation and the measurement is given for all three systems. This results from the fact that in the real system waste groups were regarded, which arise in regular intervals and almost constant quantities of waste, so that the assumption of a constant distribution of the

quantity of waste is justified in the real system by the reference time of a whole year of operation.

Concerning the evaluation of the results of the simulation it is important to take additionally into consideration that the results are not inevitably absolutely identical to the real system, because the simplifications made during the abstraction must be taken into account.

The benefit, which results from the application of simulation in in-house waste disposal logistics, lies on the one hand in increasing the planning accuracy whilst simultaneously reducing the whole planning effort of the design of in-house waste disposal concepts. On the other hand, the structured procedure in the determination of the input data and the execution of the simulation experiments makes the logistic disposal processes more transparent and therefore understandable for the planner. Changed general conditions of in-house waste disposal logistics can be checked by the simulation by varying the parameters, such as the number of waste collection containers, the capacity of the means of collection and transportation, the collection strategy and the waste arising during on-going operations, or by simulating the planning of new disposal concepts at the preliminary stage.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Der allgemeine Güter- und Leistungserstellungsprozess ist damit verbunden, dass neben dem zu erstellenden Produkt Abfälle anfallen, die nicht Zweck des betrieblichen Prozesses sind. Diese Abfälle gilt es in erster Linie zu reduzieren, indem bereits vor Beginn des Produktionsprozesses geeignete Maßnahmen zur Abfallvermeidung und -verminderung bei der Herstellung des Produktes eingeleitet werden. Beispiele für die Abfallvermeidung bzw. -verminderung im betrieblichen Prozess sind die Verwendung von Mehrwegverpackungen bereits mit der Zulieferung durch den Lieferanten, die ein Umpacken in der Warenannahme erübrigen, die Kreislaufführung von Packstoffen wie z. B. Styrochips, die von „auspackenden“ Betriebsbereichen (Wareneingang) an „einpackende“ Abteilungen (Versand) weitergegeben werden und die Reduzierung von Farb- und Lackschlämmen durch verbesserte umweltschonende Lackierverfahren /Ewers-1996/.

Die umweltgerechte Produktion hat in den letzten Jahren einen immer größeren Stellenwert in den Unternehmen erlangt, was nicht nur auf das Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes im Oktober 1996 zurückzuführen ist. Vor allem die Kostenreduzierung bei der Entsorgung der Abfälle und die Imageförderung machen Investitionen in den Umweltschutz für ein Unternehmen lukrativ.

Trotz der o. g. Maßnahmen zur Abfallvermeidung im Produktionsprozess kann aber auch in Zukunft nicht von einer abfallfreien Produktion ausgegangen werden, da eine wesentliche Abnahme des gesamten Abfallaufkommens aus dem Produzierenden Gewerbe nicht erwartet wird /Bilitewski-2000/. Somit wird auch zukünftig die Entsorgung von Industrieabfällen eine zentrale Rolle im Umweltmanagement des Unternehmens einnehmen. Um die Dimension des Abfallaufkommens aus dem Produzierenden Gewerbe zu verdeutlichen, sollen diese dem Abfallaufkommen der im Rahmen der öffentlichen Müllabfuhr gesammelten Mengen Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall und Sperrmüll gegenüber gestellt werden (vgl. Bild 1.1).

Eine Studie des Umweltbundesamtes hat ergeben, dass die Entsorgung von Abfällen aus privaten Haushalten (Hausmüll und Sperrmüll) Kosten von 141 DM pro Einwohner im Jahr verursacht. Dies sind somit Entsorgungskosten in Höhe von ca. 11,56 Mrd. DM, die für die Abfallentsorgung, d. h. die Sammlung, den Transport und die Verwertung bzw. Beseitigung der Abfälle aus privaten Haushalten jährlich anfallen /Umweltbundesamt-1998a/. Mit den in Bild 1.1 gegenübergestellten Abfallmengen

kann somit die Größenordnung für die Kosten bei der Entsorgung von Abfällen aus dem Produzierenden Gewerbe abgeschätzt werden¹.

| Abfallaufkommen nach Wirtschaftsbereichen (BRD) | 1993² [1000 t] | 1996³ [1000 t] | 1997³ [1000 t] |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Abfälle aus dem Produzierenden Gewerbe ⁴ | 77.685 | 57.006 | 62.071 |
| Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall und Sperrmüll | 43.486 | 44.390 | 44.996 |

Bild 1.1: Abfallaufkommen von Abfällen nach Abfallarten; Abfälle insgesamt BRD; nach Abfallbilanz des Statistischen Bundesamtes und Umweltbundesamt /Umweltbundesamt-1997/.

Berücksichtigt man dabei die wesentlich höhere Anzahl an unterschiedlichen Abfallarten aus der Produktion, sowie die im Gegensatz zur öffentlichen Müllabfuhr extrem heterogene Struktur an Abfallsammelsystemen und –verfahren, so wird deutlich, dass bei der Entsorgung von Industrieabfällen aus dem Produzierenden Gewerbe mit einem zusätzlichen Logistikaufwand zu rechnen ist. Der Anteil der Logistikkosten an den gesamten Entsorgungskosten der innerbetrieblichen Entsorgung wird in Kapitel 3.4.3 quantifiziert.

Die größten Einsparungspotentiale werden im Bereich der Entsorgungslogistik vermutet /Wehking-2000/, da hier bisher im Gegensatz zur Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik nur geringe Anstrengungen zur Gestaltung von Material- und Informationsfluss betrieben wurden. Aus diesem Grund ist der zukünftigen Planung von Industrieentsorgung eine zentrale Rolle beizumessen.

1.2 Anforderungen an die zukünftige Planung von Industrieentsorgung

Die überwiegende Zahl der Entsorgungskonzepte und –systeme in Industrieunternehmen sind historisch gewachsen, ohne dass eine detaillierte Planung, bzw. eine systematische Auslegung der Entsorgung zuvor oder auch während des laufenden Betriebs durchgeführt wurde. Dies liegt vor allem daran, dass bisher der Entsor-

¹ Ziems geht bei seiner Hochrechnung über den Umsatz des Investitionsgüter produzierenden Gewerbes von Entsorgungskosten im Produzierenden Gewerbe zwischen 3,9 - 16,2 Mrd. DM/a aus /Ziems-1996/. Nach Ziems entfallen dabei ein Drittel der Entsorgungskosten auf die Kosten für die innerbetriebliche Entsorgungslogistik (1,3 - 5,4 Mrd. DM/a).

² Quelle: Umweltbundesamt; /Umweltbundesamt –1997/.

³ Vorläufiges Ergebnis; noch nicht veröffentlichte Fachserie des Statistischen Bundesamtes. Stand: 26.10.2000. Aktuellere Zahlen sind aus der Umweltstatistik 2000 nicht zu entnehmen.

⁴ Ohne Bauschutt, Bodenaushub, Straßenaufbruch, Baustellenabfälle und Bergematerial aus dem Bergbau.

gungslogistik beispielsweise im Vergleich zur Versorgungsfunktion der Produktionslogistik nicht annähernd der gleiche Stellenwert zugeteilt wurde. In den meisten Unternehmen beruht die Gestaltung und Auslegung von entsorgungslogistischen Prozessen auf Erfahrungswerten. Eine strukturierte Vorgehensweise bei der Auslegung ist weitgehend unbekannt. Die Optimierung von entsorgungslogistischen Prozessen wird den Anforderungen an rechtliche Auflagen untergeordnet. Zukünftig wird dieses Vorgehen bei der Planung der innerbetrieblichen Entsorgung und Überwachung im Betrieb allein aus Kostengründen nicht mehr tragbar sein.

Die Hauptaufgabe der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik ist es, entsorgungslogistische Prozesse zeit- und kostenmäßig zu optimieren. Die Anforderungen die dabei an die zukünftige Planung der Industrieentsorgung gestellt werden, sind in den letzten Jahren, nicht zuletzt auch durch die regelmäßigen Neuerungen in der Gesetzgebung, stetig gewachsen. Neben den Anforderungen zur Beachtung und Einhaltung von rechtlichen Rahmenbedingungen oder die Entscheidung über Eigen- oder Fremdvergabe der Entsorgungsaufgaben, spielen vor allem die Anforderungen an die Gestaltung und Auslegung von entsorgungslogistischen Prozessen eine wesentliche Rolle in der Industrieentsorgung.

Zur Bewältigung dieser Anforderungen müssen neue Voraussetzungen für die Planung der Industrieentsorgung geschaffen werden, wie z. B. die Möglichkeit zur objektiven Bewertung der Abfalllogistik im Betrieb durch die Ermittlung und Pflege von geeigneten Kennzahlen oder ein Vergleich von Entsorgungskonzepten mit Hilfe von Benchmarking.

Hinzu kommt, dass die Planungszyklen der Produktionslogistik zwangsweise immer kürzer werden oder bereits einen kurzen Zyklus erreicht haben, was darin resultiert, dass auf Seiten der Entsorgungslogistik ein schnelles Reagieren auf Änderungen in der Produktion, und damit auf ein verändertes Abfallaufkommen, erforderlich wird.

Ziel ist es außerdem, eine ganzheitliche Betrachtung der Planungsdaten zu realisieren, da die Optimierung von entsorgungslogistischen Teilprozessen in vielen Fällen nicht zum gewünschten Ergebnis führt. Dies erfordert allerdings die Kenntnis umfangreicher Planungsdaten, wodurch sich der Planungsaufwand wesentlich erhöht. Um den Planer hierbei zu unterstützen, werden EDV-gestützte Systeme, wie z. B. die Materialflusssimulation notwendig, mit deren Hilfe ein strukturiertes Vorgehen bei der Gestaltung und Auslegung von innerbetrieblichen Entsorgungskonzepten möglich wird.

2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung der Qualität innerbetrieblicher Entsorgungslogistik. Ziel ist es, die Güte der logistischen Qualität zu ermitteln, um eine objektive Bewertung der Entsorgungslogistik von einzelnen Unternehmen vornehmen zu können. Damit wird auch ein allgemeiner Vergleich der Unternehmen möglich. In der Praxis findet eine überwiegend subjektive Bewertung und Planung von innerbetrieblichen Entsorgungsstrukturen durch einzelne Unternehmen bzw. Entsorger statt. Ein einheitliches Vorgehen bei der Auslegung der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik ist nach heutigem Stand nicht bekannt.

Die Ziele dieser Arbeit gehen aus der im Folgenden zusammengefassten Aufbaustruktur der Arbeit hervor:

- 1) Darstellung des Ist-Zustandes der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik am Beispiel von Industrieunternehmen in ausgewählten Branchen. Analyse und Beschreibung der Systemelemente der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik von der Abfallentstehung, Sammlung und Handhabung bis zur innerbetrieblichen Abfallsenke⁵.
- 2) Ermittlung und Darstellung der Systemelemente der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik auf Basis einer Ist-Analyse. Ableitung der wichtigsten Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik.
- 3) Ermittlung der gemeinsamen und der unterschiedlichen logistischen Merkmale der Ver- und Entsorgung von Industrieunternehmen. Objekt- und prozessbezogene Betrachtung:
 - Versorgungsprozess und -logistik,
 - Entsorgungsprozess und -logistik.
- 4) Definition der logistischen Qualität; Beschreibung von logistischen und entsorgungsspezifischen Kennzahlen und Kennlinien.

⁵ Mit innerbetrieblicher Abfallsenke werden Abfallsammelstellen im Unternehmen bezeichnet, die zentral bzw. dezentral auf dem Werksgelände angeordnet sind und in denen die im Werk gesammelten Abfälle konzentriert werden. Von der Senke erfolgt dann der Transport zu den Verwertungs- bzw. Beseitigungsanlagen, die in den meisten Fällen nicht zum Unternehmen gehören. Mit dem Transport ab der Senke „verlassen“ somit die Abfälle das Werk des Unternehmens.

5) Nachbildung der zu bewertenden realen Entsorgungsprozesse in einem dynamischen Simulationsmodell. Die Strukturierung der Systemelemente und Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik dient dabei als Grundlage für die Modellbildung. Die einzelnen Phasen der Simulation lassen sich wie folgt beschreiben:

- a) Formulierung des Simulationsmodells,
- b) Modellbildung,
- c) Durchführung von Simulationsläufen,
- d) Interpretation der Simulationsergebnisse:
 - Testen von Entsorgungsstrategien anhand unterschiedlicher Parametrisierung der Simulationsbausteine.
 - Systematik zur Aufbereitung und Darstellung der Simulationsergebnisse.
 - Allgemeine Plausibilitätsprüfung und Gültigkeit des Modells (Vergleich mit Ist-Werten).

Ziel ist die Bewertung der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik von Industrieunternehmen bei der Neuplanung oder der Optimierung von bestehenden Entsorgungskonzepten anhand von Ergebniskennzahlen aus der Simulation (z. B. Auslastung der innerbetrieblichen Sammel- und Transportmittel, Wartezeiten bei der Sammlung, Füllstand der Abfallsammelbehälter, Anzahl der Behälterleerungen, etc.).

3 Entwicklung und Analyse der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik

3.1 Grundlagen

Bei der logistischen Betrachtungsweise der Unternehmen stand bisher die Optimierung der Kernprozesse also der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik im Vordergrund. Die Entsorgung von Industrieunternehmen ist dagegen ein Arbeitsgebiet, welchem aus logistischer Sicht bislang kaum Beachtung geschenkt worden ist /Wehking-1997/. Um auch hier Potentiale für die Optimierungen zu erschließen, wird der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik in den letzten Jahren zunehmend mehr Aufmerksamkeit gewidmet /Heimsoth-2000, Wehking-2000/.

Bis zum Inkrafttreten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) 1996 wurden betriebliche Abfallwirtschaftskonzepte und Abfallbilanzen nur in einigen wenigen Bundesländer gefordert. Veränderte rechtliche Rahmenbedingungen und eine überproportionale Kostensteigerung auf dem Entsorgungsmarkt zwingen jetzt aber die Unternehmen zur Einführung eines Abfallmanagements.

Mit dem Inkrafttreten des KrW-/AbfG ist nun vorgeschrieben, dass Unternehmen, die bestimmte Mengenschwellen⁶ an überwachungsbedürftigen bzw. besonders überwachungsbedürftigen Abfällen überschreiten, betriebliche Abfallwirtschaftskonzepte und Abfallbilanzen zu erstellen haben. Die betrieblichen Abfallwirtschaftskonzepte und –bilanzen schaffen zunächst einen Überblick über die Höhe und Art der angefallenen Abfallmengen und ermöglichen eine Unterscheidung in kostenintensive (z. B. Abfälle zur Beseitigung) bzw. weniger kostenintensive Abfälle (z. B. Abfälle zur Verwertung). Durch den Aufbau eines Abfallwirtschaftskonzeptes entsteht eine Kostentransparenz im Unternehmen, die Aufschluss über mögliche Einsparpotentiale in der betrieblichen Abfallwirtschaft gibt. Um diese Einsparpotentiale zu nutzen, ist die Schaffung eines Planungs- und Steuerungsinstruments für die Optimierung der betriebliche Abfallentsorgung erforderlich.

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Im Rahmen der Entsorgung von Abfällen sind eine Vielzahl von abfallrechtlichen Bestimmungen von Bedeutung. Neben nationalen Gesetzestexten sind auch recht-

⁶ Nach §19 Abs. 1 KrW-/AbfG haben Erzeuger, bei denen jährlich mehr als insgesamt 2000 Kilogramm besonders überwachungsbedürftige Abfälle oder jährlich mehr als 2000 Tonnen überwachungsbedürftige Abfälle je Abfallschlüssel anfallen, ein Abfallwirtschaftskonzept über die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung der Abfälle und eine Bilanz über Art, Menge und Verbleib der Abfälle zu erstellen /Bilitewski-2000/.

liche Vorgaben auf europäischer Ebene zu beachten. Die Hierarchie des Abfallrechts geht aus Bild 3.1 hervor.

Als EG-Mitglied ist die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet, Rechtsverordnungen der EG als unmittelbar geltendes Recht anzuerkennen. Insofern steht das EG-Recht in der Hierarchie des Abfallrechts ganz oben, gefolgt vom jeweiligen nationalen Verfassungsrecht sowie den auf dessen Grundlage erlassenen nationalen Abfallgesetzen. Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) ist in den 16 Bundesländern in entsprechenden Landesgesetzen spezifiziert, die wiederum auf Landesebene eine weitere Präzisierung durch Satzungen der kommunalen Körperschaften erfahren /Jansen-1998, VDI-4432/.

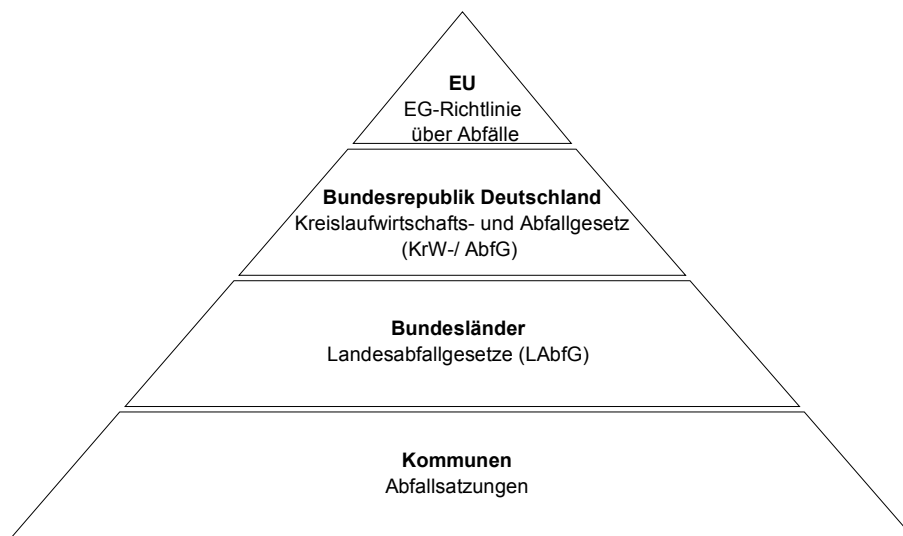


Bild 3.1: Hierarchie des Abfallrechts in Anlehnung an /VDI 4431, Wehking-1995/.

3.2.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) trat im Oktober 1996 in Kraft und löste damit das bis dahin geltende Abfallgesetz von 1986 ab. Gegenüber dem Abfallgesetz von 1986 hat sich im KrW-/AbfG eine inhaltliche Verschiebung ergeben. Nach §1 des KrW-/AbfG ist der Zweck des Gesetzes „...die Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen“ /BDE-1998/.

Die hervorzuhebenden Merkmale der inhaltlichen Verschiebung gegenüber dem Abfallgesetz von 1986 sind die Verankerung von Grundgesetzen der Kreislaufwirtschaft mit der Priorität der Vermeidung oder Verminderung der Menge und Schädlichkeit vor der stofflichen und/oder energetischen Verwertung sowie die Verstärkung des Verursacherprinzips durch die Einführung der Produktverantwortung /Matschke-1996/.

Die rechtlichen Bedingungen des KrW-/AbfG zeigen, dass der weite Begriff der Reststoffe, Wirtschaftsgüter, Wertstoffe, u.s.w., die nach altem Abfallrecht als Abgrenzungsbegriffe gegen den Abfallbegriff benutzt wurden, nicht mehr tragfähig sind, um zu begründen, dass die beweglichen Sachen nicht dem Abfallregime unterliegen /BDE-1998/. Im KrW-/AbfG wurde daher eine Neufassung des Abfallbegriffs vorgenommen (vgl. Kapitel 3.3).

3.2.2 EG-Öko-Audit-Verordnung / ISO 14001

Mit Inkrafttreten der Verordnung (EWG) Nr. 1836/93 des Rates vom 29. Juni 1993 steht gewerblichen Unternehmen eine Beteiligung an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung offen. Diese Verordnung wird im deutschen Sprachgebrauch auch als "EG-Öko-Audit-Verordnung" bezeichnet. Seit Februar 1998, mit Inkrafttreten der Erweiterungsverordnung zum Umweltauditgesetz, wurde das Umwelt-Audit-System auch für Dienstleistungsunternehmen geöffnet /Umweltbundesamt-1998b/.

Die Unternehmen können freiwillig eine Umweltprüfung ablegen und sich zertifizieren lassen. Immer mehr Unternehmen zertifizieren ihren Betrieb nach ökologischen Kriterien. Der zukünftige Erfolg eines Unternehmens wird zunehmend auch an der umweltgerechten Betriebsführung gemessen werden, nicht zuletzt weil ein steigendes Umweltbewusstsein in der Gesellschaft zu veränderten Wettbewerbsbedingungen führt. Durch die ansteigende Zahl der am Öko-Audit beteiligten Unternehmen wird ein ökologischer Wettbewerb in Gang gesetzt, dem sich auf Dauer niemand entziehen kann. Ein Beispiel hierfür kommt aus der Automobilindustrie, deren Zulieferer sich der Auditierung anschließen mussten, um weiterhin wettbewerbsfähig bleiben zu können. 1998 waren insgesamt 1861 Unternehmen in Deutschland im Rahmen des EG-Umweltmanagements- und Umweltauditsystems zertifiziert /Umweltbundesamt-1998b/.

Das Hauptziel der Verordnung ist die Verpflichtung zur angemessenen, kontinuierlichen Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes, indem Umweltziele und ein Umweltmanagementsystem im Unternehmen etabliert und umgesetzt werden, sowie regelmäßige Umweltbetriebsprüfungen durchgeführt und die Öffentlichkeit über die Umweltaspekte der Betriebstätigkeit unterrichtet werden /Schimmelpfeng-1995/.

Die Investition in den Umweltschutz, d. h. die Durchführung eines Öko-Audits, ist aus folgenden Gründen für ein Unternehmen lukrativ:

- Kostenreduzierung bei der Entsorgung, beim Energiehaushalt, etc.
- Wettbewerbsstärkung

- Imageförderung (Öffentlichkeitsarbeit)
- Umweltgerechte Produktion und Produkte
- Einhaltung umweltrechtlicher Vorschriften
- Verminderung von Umweltrisiken

Parallel zu den Arbeiten an der EG-Öko-Audit-Verordnung wurde von der International Standard Organisation (ISO) eine Arbeitsgruppe gegründet (SAGE, Strategic Advisory Group on Environment), deren Aufgabe darin lag, Vorschläge für eine übergeordnete, strategische Planung der ISO auf dem Gebiet des Umweltschutzes und Umweltschutzmanagements zu erarbeiten. Das Ergebnis ist die ISO 14001 „Environmental Management-System“ (Umweltmanagementsystem), die eine weitgehende Übereinstimmung mit den einschlägigen Vorschriften der EG-Öko-Audit-Verordnung enthält und als internationaler Standard verabschiedet wurde. Grundsätzlich ist die EG-Öko-Audit-Verordnung im Gegensatz zur ISO 14001 in ihren Anhängen ausführlicher als die Norm, die eher mit übergeordneten Begriffen den jeweiligen Sachverhalt beschreibt. Dafür ist die Norm erheblich logischer in ihrem Aufbau und vermeidet Redundanzen. Der Normentwurf zum Umweltmanagementsystem basiert zum Teil auf der ISO 9000-Serie zur Qualitätssicherung /Fichter-1995/.

3.2.3 Verpackungsverordnung

Die Verpackungsverordnung ist 1991 in Kraft getreten und verpflichtet Hersteller und Vertreiber von Transportverpackungen, Umverpackungen und Verkaufsverpackungen diese nach Gebrauch zurückzunehmen, um sie einer erneuten Verwendung oder stofflichen Verwertung zuzuführen. Für Verkaufsverpackungen wurde zu diesem Zweck das Duale System Deutschland (DSD) eingeführt.

Abfälle, die bereits einem Rücknahmesystem wie z. B. der Verkaufsverpackungen angehören, sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

3.3 Begriffsabgrenzung Industrieabfälle

Nach dem KrW-/AbfG werden Abfälle in Abfälle zur Verwertung und Abfälle zur Beseitigung unterschieden. Eine Klassifizierung der Abfälle erfolgt durch den mit der EAK-Verordnung eingeführten Europäischen Abfallkatalog, der sich in 20 Oberbegriffe aufteilt.

Ist einer von drei Entledigungstatbeständen⁷ nachgewiesen, ist der Abfall unter der Zuweisung der entsprechenden EAK-Nummer mittels der Bestimmungsverordnung als solcher definiert.

Die Neufassung des Abfallbegriffs beschreibt, dass bewegliche Sachen bei der Energieumwandlung, Herstellung, Behandlung oder Nutzung von Stoffen oder Erzeugnissen oder bei Dienstleistungen anfallen, ohne dass der Zweck der jeweiligen Handlung hierauf gerichtet ist. Damit ist klar, dass sämtliche in Produktions- und Verarbeitungsprozessen nicht zielgerichtet anfallenden „Reststoffe“ als Abfall anzusprechen sind /BDE-1998/. Am Beispiel der Press- und Stanzabfälle wird deutlich, dass die beim Herstellungsprozess anfallenden „Press- und Stanzrückstände“ nicht zielgerichtet anfallen, d. h. nicht Teil des produzierten Endproduktes sind. Gemäß dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) werden Press- und Stanzabfälle als Abfall definiert, unabhängig davon, ob diese letztendlich auf dem Markt noch Erlöse für den Hersteller bzw. Abfallerzeuger erzielen und daher unter dem alten Abfallregime als Wirtschaftsgut eingestuft wurden.

3.3.1 Nicht überwachungsbedürftiger Abfall

Die Nachweisverordnung (NachwV) als untergesetzliches Regelwerk des KrW-/AbfG regelt das Überwachungsverfahren, welches das KrW-/AbfG für Abfälle zur Verwertung und Beseitigung vorsieht. Bild 3.2 zeigt die Einteilung des Abfallbegriffs im Rahmen der Nachweisverordnung.

Demnach bleiben lediglich die Abfälle zur Verwertung, für die keine Eingruppierung als „überwachungsbedürftig“ oder „besonders überwachungsbedürftig“ bestimmt ist, vom behördlichen Kontrollverfahren befreit.

Zu den nicht überwachungsbedürftige Abfällen zur Verwertung zählen z. B. Papier und Pappe, Holz, kompostierbare Abfälle, Kunststoffteile, eisenhaltige Späne, Press- und Stanzabfälle.

⁷ Nach §3 Absatz 2 des KrW-/AbfG ist eine tatbestandsmäßige Entledigung gegeben, „...wenn der Besitzer bewegliche Sachen einer Verwertung ... oder eine Beseitigung ... zuführt oder die tatsächliche Sachherrschaft über sie unter Wegfall jeder weiteren Zweckbestimmung aufgibt“. „Zuführen“ bedeutet hierbei die Übergabe der Sache an den Verwerter oder Beseitiger. Die „Aufgabe der Sachherrschaft“ unter Wegfall der Zweckbestimmung bedeutet z. B. die Übergabe der Sache an Personen und Institutionen, die ihrerseits notwendige Schritte für die Verwertung oder Beseitigung leisten, z. B. Transporteure oder Entsorgungsdienstleister /Matschke-1996/.

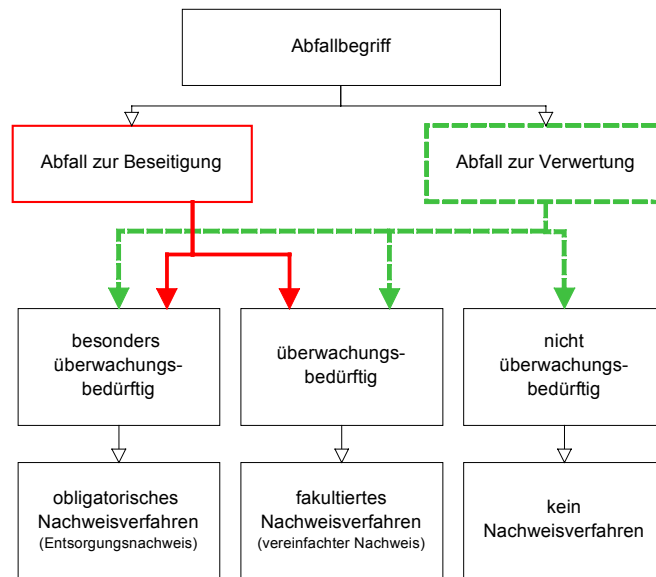


Bild 3.2: Einteilung der Abfälle nach der Nachweisverordnung /BDE-1998/.

3.3.2 (Besonders) überwachungsbedürftiger Abfall

Abfälle zur Beseitigung unterliegen generell der Überwachung und sind somit den überwachungsbedürftigen bzw. besonders überwachungsbedürftigen Abfällen zuzuordnen. Nach §41 Absatz 1 des KrW-/AbfG handelt es sich um besonders überwachungsbedürftige Abfälle zur Beseitigung, wenn diese „...nach Art, Beschaffenheit oder Menge in besonderem Maße gesundheits-, luft- oder wassergefährdend, explosibel oder brennbar sind, oder Erreger übertragbarer Krankheiten enthalten oder hervorbringen können“. An die Entsorgung dieser Abfälle sind besondere Anforderungen zu stellen.

Dem gegenüber unterliegen Abfälle zur Verwertung der Überwachung, wenn sie in der Bestimmungsverordnung (BestüVAbfV) als „überwachungsbedürftige Abfälle zur Verwertung“ oder als „besonders überwachungsbedürftige Abfälle“ eingestuft sind.

Beispiele für besonders überwachungsbedürftige Abfälle sind ölhaltige Abfälle, Lack- und Farbabfälle, halogenhaltige Abfälle, schwefelhaltige Abfälle, Leuchtstoffröhren sowie andere quecksilberhaltige Abfälle.

3.3.3 Volumenabfall

Der Begriff „Volumenabfall“ wird im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) nicht verwendet. In dieser Arbeit dient die Definition des Begriffs „Volumenabfall“ als Oberbegriff für die im Folgenden aufgeführten Abfallarten, die aber wei-

terhin ihre Einteilung nach dem KrW-/AbfG, insbesondere dem Europäischen Abfallkatalog der EAK-Verordnung, finden.

Mit Volumenabfall werden im Folgenden die Abfälle aus der Industrie bezeichnet, die aufgrund ihrer Eigenschaften (geringe Dichte, regelmäßige große Anfallmenge) ein großes Abfallvolumen bzw. einen hohen Volumenstrom besitzen und daher von hoher entsorgungslogistischer Bedeutung sind /Heimsoth-2000/.

Hierzu zählen u. a.

- Restmüll bzw. hausmüllähnlicher Gewerbeabfall,
- PPK (Papier, Pappe, Kartonage),
- Kunststofffolien,
- Holz und Styropor.

3.3.4. Produktionsspezifischer Abfall

Der Begriff „Produktionsspezifischer Abfall“ wird ebenfalls im KrW-/AbfG nicht verwendet, soll aber in dieser Arbeit entsprechend dem Volumenabfall definiert werden.

Produktionsspezifische Abfälle sind Abfälle, die im Rahmen von Herstellungsprozessen anfallen, ohne dass diese wieder in den Herstellungsprozess zurückgeführt werden. Wie die Bezeichnung „Produktionsspezifischer Abfall“ bereits ausdrückt, ist die Art des Abfalls abhängig vom jeweiligen Herstellungsprozess. So fallen z. B. Lackschlämme als produktionsspezifische Abfälle bei der Lackierung von Rohkarossen in der Automobilindustrie an und Kunststoffabfälle bei der Herstellung von Kunststoffgehäusen. In der spanenden Fertigung zählen z. B. die verbrauchten Bohr- und Schleifemulsionen zu den produktionsspezifischen Abfällen.

3.4 Darstellung der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik

3.4.1 Einführung

In der Literatur findet man verschiedene umfassende Arbeiten zur Entsorgungslogistik. So beschreiben z. B. Wehking, Stölzle und Schnellbögel die betrieblichen Entsorgungsstrukturen aus logistischer Sicht, während Matschke und Bruns auf die betriebswirtschaftlichen Aspekte der Entsorgungslogistik eingehen /Stölzle-1993, Schnellbögl-1993, Wehking-1995, Matschke-1996, Bruns-1997/. Allerdings wird in der o. g. Literatur nur in der Arbeit von Schnellbögel der Schwerpunkt auf die innerbetriebliche Entsorgung von Industrieunternehmen gesetzt. Die jüngste und umfassendste Arbeit zur innerbetrieblichen Entsorgungslogistik stammt von Heimsoth

/Heimsoth-2000/. Die Arbeit von Heimsoth beschreibt die Optimierung der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik durch die Anwendung neuer Behältertechnik für die Sammlung und den Transport von Volumenabfällen. Dabei wird ein Schwerpunkt auf die Ermittlung des wirtschaftlichen Nutzens des in der Arbeit von Heimsoth neu entwickelten Behältersystems für die Industrieentsorgung gelegt, indem eine umfassende EDV-gestützte Kostenvergleichsrechnung durchgeführt wird.

Im Gegensatz hierzu liegt die Zielsetzung dieser Arbeit auf der Ermittlung der entsorgungsspezifischen Prozessketten bei der Entsorgung von Industrieunternehmen auf Basis einer Ist-Analyse in 36 Unternehmen. Durch die Übertragung der Prozessketten auf ein allgemeines Simulationsmodell soll die innerbetriebliche Entsorgungslogistik transparent gemacht werden. Dabei wird der zeitliche Anfall des Abfalls im dynamischen Simulationsmodell berücksichtigt. Ferner besteht die Möglichkeit unterschiedliche Sammelstrategien zu simulieren. Die Ergebniskennzahlen, die aus der Simulation gewonnen werden, dienen dem Planer als Hilfsmittel bei der Auslegung und Konzeption von innerbetrieblichen Entsorgungsstrukturen. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der EDV-gestützten Kostenvergleichsrechnung von Heimsoth und der in dieser Arbeit entwickelten Simulation zur Modellierung von innerbetrieblichen Entsorgungskonzepten sind im Bild 3.3 gegenübergestellt.

Die folgenden Kapitel geben einen kurzen Einblick in die Ist-Situation der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik. Zunächst werden die Entsorgungskosten strukturiert und der Stellenwert der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik dargestellt und anschließend deren Systemelemente beschrieben. Abschließend werden die am häufigsten in der Praxis auftretenden Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgung erarbeitet.

Betrachtet man den innerbetrieblichen Materialfluss der Versorgungslogistik, so stellt man fest, dass heute die Automatisierung von Transport- und Handhabungstechnik in den bedeutenden Industriebranchen einen hohen Grad erreicht hat. Im Gegensatz hierzu wird die innerbetriebliche Entsorgungslogistik zum größten Teil völlig losgelöst von der Versorgungsseite noch manuell bzw. teilmechanisiert durchgeführt /Heimsoth-2000/.

Hinzu kommt, dass der Aufwand für die innerbetriebliche Entsorgungslogistik nicht zuletzt auch durch die zunehmende getrennte Erfassung und Sammlung der einzelnen Abfallfraktionen in den Betrieben aufgrund der o. g. gesetzlichen Verordnungen in den letzten Jahren zugenommen hat.

| <i>Gegenüberstellung der Unterscheidungsmerkmale</i> | SimdiAI Simulation der innerbetrieblichen Abfalllogistik | Pelikos⁸ Planungssoftware für die Entsorgungs-Logistik von Industriebetrieben zur Kostenvergleichsrechnung |
|--|--|---|
| Berechnungsverfahren | dynamisch diskrete Simulation vgl. Kapitel 5.1 und 5.4.1 | statisch, analytisch |
| Zeitkomponente „Abfallanfall“ | wird berücksichtigt durch – Angabe von Mengentendenzen – Stochastische Verteilung – Empirische Verteilung vgl.: Kapitel 5.4.4 und 6.7 | wird nicht berücksichtigt |
| Ergebniskennzahlen | Qualität und Servicegrad: Auslastung der Simulationsfahrzeuge, Wartezeiten bei der Abfallsammlung, Füllstand der Sammelbehälter, Auftragsabwicklung. In Abhängigkeit der Simulationszeit darstellbar, vgl. Kapitel 7.1.2 | Kosten: Personal-, Fördermittel-, Behälter- und außerbetriebliche Transportkosten. Gesamtkosten |
| Parametereingabe - Layout - Abfallarten/ -mengen - Sammelsysteme - Sammel- und Transportmittel | Eingabemaske: Werksebene automatische Wegematrix-Berechnung: Bereichsebene vgl. Kapitel 6.2.3 keine Einschränkung Behältervolumen: variabel keine Einschränkung Fahrzeugtypen in der Simulation: Sammlung in der Halle: – „Umleerfahrzeug“ – „Wechselfahrzeug“ Sammlung im Poolverfahren: – Poolfahrzeug (Umleeren) – Poolfahrzeug (Wechseln) vgl. Kapitel 6.2.1, Bild 6.4 | CAD-gestützt: Werks- und Bereichsebene ausschließlich für Volumenabfälle (PPK, Restabfall, Folie) Behältervolumen: abhängig von Stammdaten; Unterscheidung nur in „kleine“ und „große“ Behälter - Stetigförderer - Unstetigförderer ortsgebunden und nicht ortsgebunden |
| Sammelstrategie in der Halle | - Umleerverfahren - Wechselverfahren vgl. Bild 6.7 | Strategie richtet sich in der Kostenberechnung nach der Unterscheidung der Fördermittel mit geringer und hoher Behälterkapazität |

Bild 3.3: Gegenüberstellung der Unterscheidungsmerkmale der Planungssoftware SimdiAI und Pelikos zur Auslegung der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik von Industrieunternehmen.

⁸ Im Rahmen der Dissertation von Heimsoth entwickelte Planungssoftware zur Kostenvergleichsrechnung innerbetrieblicher Entsorgungslogistik /Heimsoth-2000/.

Neben den gesetzlichen Verordnungen gibt es weitere Beweggründe für die sortenreine Erfassung bzw. Trennung von Produktionsabfällen in Betrieben:

- Diskrepanz der Entsorgungskosten von Abfällen zur Beseitigung und Abfällen zur Verwertung (Mischfraktionen können oft nur teuer beseitigt werden oder erfordern eine kostenintensive Nachsortierung),
- Zertifizierung im Rahmen des Umweltaudits,
- Image des Industrieunternehmens (umweltbewusste Produktion).

Um hier Potentiale für die Optimierungen der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik zu erschließen, wurde in Zusammenarbeit mit privaten Entsorgern die Entsorgung von Industrieunternehmen vor Ort in insgesamt 36 ausgesuchten Betrieben analysiert. Es wurden vor allem größere Unternehmen mit Mitarbeiterzahlen über 2500 Mitarbeiter betrachtet, die aus verschiedenen Branchen des verarbeitenden Gewerbes (Maschinenbau, Straßenfahrzeugbau, Chemische Industrie, Nahrungs- und Genussmittelgewerbe, etc.) ausgewählt wurden, um branchenübergreifend Gemeinsamkeiten und Besonderheiten erfassen und analysieren zu können /Wehking-2000/.

Die Ausgangssituation zu Projektbeginn kann wie folgt umrissen werden:

- Die innerbetriebliche Entsorgung wird z. T. von Mitarbeitern aus Produktion und Fertigung übernommen.
- Je nach Wirtschaftszweig und Unternehmen werden eine Vielzahl an unterschiedlichen Entsorgungskonzepten angewandt.
- Es sind keine Kennzahlen für die Planung und Gestaltung von optimierten Entsorgungskonzepten bekannt.

Voraussetzung für die Analyse der entsorgungslogistischen Strukturen sind Kenntnisse über die Aufbau- und Ablauforganisation (Organisatorische Daten) der industriellen Entsorgung, die eingesetzte Förder-, Lager- und Handhabungstechnik (Technische und logistische Daten), sowie Abfallmengen und Entsorgungskosten (Abfallwirtschaftliche Daten). Durch die Kenntnis der Organisation und der technischen Komponenten der industriellen Entsorgung lassen sich typische Merkmale und Gemeinsamkeiten ableiten.

Die Ziele der Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Untersuchung der Industrieentsorgung bis zum Arbeitsplatz (Abfallanfallstelle).
- Darstellung der tatsächlichen innerbetrieblichen Entsorgung (Ist-Zustand).
- Analyse der Entsorgungslogistik, Förder-, Lager- und Handhabungstechnik sowie Organisation und Informationsfluss.

- Ermittlung von entsorgungslogistischen Kennzahlen.
- Schwachstellenanalyse, Erarbeitung von Entsorgungskonzepten und Optimierungsmöglichkeiten.

3.4.2 Kostenbetrachtung

In der o. g. Untersuchung lag der Schwerpunkt vor allem darin, den Anteil der Entsorgungskosten zu ermitteln, der insbesondere auf die innerbetriebliche Logistik entfällt. Dadurch konnte der im folgenden Kapitel 3.4.3 dargestellte Stellenwert der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik quantifiziert werden, der eine nähere Untersuchung des Logistikaufwands in der betrieblichen Entsorgung rechtfertigt.

Voraussetzung hierfür ist eine Strukturierung aller anfallenden Kosten für die Entsorgung von Industrieunternehmen. Durch die Abgrenzung der einzelnen Kostenarten können die Kosten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik eindeutig definiert werden. Für die Untersuchung wurde daher eine Aufteilung in die folgenden drei Kostenblöcke zugrunde gelegt (vgl. auch Bild 3.4):

- *Kosten für die Verwertung und Beseitigung von Abfällen:*
Kosten, die für die Verwertung bzw. Beseitigung der Abfälle entstehen. Hier sind regional erhebliche Preisunterschiede vorhanden, je nachdem auf welchem Entsorgungsweg (Deponie, Aufbereitung, thermische Verwertung) letztendlich der Abfall verwertet bzw. beseitigt wird.
- *Kosten für externe Dienstleistungen:*
Summe aus
 - Transportkosten für die Abfuhr und die Gestellung der Abfallcontainer,
 - Containermiete, sowie
 - Personal- und Fördermittelkosten eines externen Dienstleisters im Falle der Fremdvergabe von innerbetrieblichen Entsorgungsaufgaben.
- *Kosten für betriebsinterne Leistungen:*
Summe aus
 - Personalkosten (firmeninternes Entsorgungspersonal bzw. Kosten für den anteiligen Entsorgungsaufwand verursacht durch Mitarbeiter aus der Produktion),
 - Fördermittelkosten für innerbetriebliche Transporte (z. B. Betriebskosten für Gabelstapler im Entsorgungseinsatz) sowie
 - Abschreibungen einmaliger Investitionen (Beschaffung von Abfallsammelbehältern, Presscontainer, stationäre Verdichtungseinrichtungen, etc.)

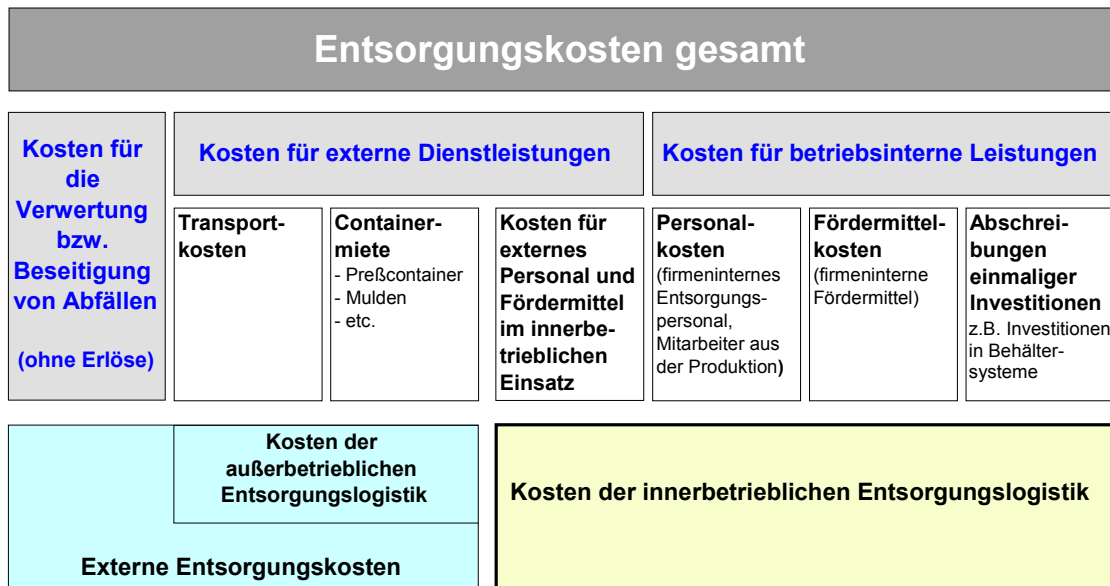


Bild 3.4: Kostenarten in der Industrieentsorgung /Wehking-2000/.

Diese drei Kostenblöcke münden in den „Externen Entsorgungskosten“ und den „Kosten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik“ (vgl. Bild 3.4).

Im Gegensatz zu der hier vorgestellten Kostenstrukturierung, deren Ziel die Abgrenzung und Definition der Kosten für die innerbetriebliche Entsorgungslogistik ist, teilt Heimsoth die Kosten in die 5 Kostenarten Behälter-, Fördermittel-, außerbetriebliche Transportmittel-, Personal- und Beseitigungs-/ Verwertungskosten auf. Da bei Heimsoth der Schwerpunkt auf der Ermittlung des wirtschaftlichen Nutzens des neu entwickelten Behältersystems für die Industrieentsorgung lag, wurden z. B. die Behälterkosten als eigenständiger Kostenblock hervorgehoben. Die Kosteneinteilung nach Heimsoth richtet sich daher nach der Berechnungsmethodik der von Heimsoth durchgeführten EDV-gestützten Kostenvergleichsrechnung.

Die Kosten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik ergeben sich aus den Kosten für betriebsinterne Leistungen und den Personal- und Fördermittelkosten externer Dienstleistungen, soweit eine Fremdvergabe innerbetrieblicher Entsorgungsaufgaben erfolgt. Die Personalkosten beinhalten dabei ausschließlich die Personalkosten für operative Tätigkeiten (innerbetriebliche Sammlung und Transport der Abfälle, Sortierung und Kommissionierung, etc.). Personalkosten für Mitarbeiter der Entsorgung aus Organisation und Verwaltung (z. B. Umweltschutz- und Abfallbeauftragter) sind in den o. g. Personalkosten nicht enthalten.

Betrachtet man die Unternehmen, deren Kosten für die innerbetriebliche Entsorgungslogistik sehr gering sind, stellt man fest, dass dies vor allem Unternehmen sind, die eine teilweise oder vollständige Übernahme der innerbetrieblichen Entsorgung durch eine externe Dienstleistung praktizieren. Bei der Eigenentsorgung be-

trieblicher Abfälle übernimmt das Unternehmen bzw. der Betrieb die Entsorgungsprozesse innerhalb seines betrieblichen Entscheidungsbereiches und im eigenen Namen. Bei der Fremdentsorgung beauftragt das Unternehmen Dritte mit der Realisierung der Entsorgungsprozesse in ihrem eigenen Namen.

Die Vergabe der Entsorgungsprozesse an einen externen Dienstleister ist nicht nur aus Gründen der hohen Kostenintensität bei der Durchführung von Entsorgungsprozessen für das Unternehmen bzw. den Betrieb ausschlaggebend. Vor allem auch die Kapitalintensität bezüglich der erforderlichen Investitionen in eine geeignete Entsorgungsinfrastruktur, das erforderliche entsorgungsspezifische Know-how und die hohen abfalltechnischen und abfallrechtlichen Anforderungen zur Erfüllung der Entsorgungsaufgabe veranlassen Unternehmen die eigenen Entsorgungsprozesse an Dritte abzugeben /Matschke-96/. Während früher nur vereinzelt bestimmte Abfallfraktionen durch einen externen Dienstleister von der Anfallstelle entsorgt wurden, findet man mittlerweile auch die vollständige Übernahme der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik für nahezu alle Abfallfraktionen durch einen oder mehrere externe Dienstleister im Industrieunternehmen vor.

3.4.3 Stellenwert der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik

Der Stellenwert der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik lässt sich z. B. durch die Aufschlüsselung der gesamten Entsorgungskosten (vgl. Bild 3.4) nach den Logistikkosten darstellen und abschätzen.

Bei der Auswertung der 36 betrachteten Unternehmen hinsichtlich deren Entsorgungskosten wurde die Größe des jeweiligen Unternehmens durch eine Gewichtung nach der Anzahl der Mitarbeiter in der Produktion bzw. nach dem gesamten Abfallaufkommen berücksichtigt. Durch die Gewichtung erhalten Unternehmen mit mehr Mitarbeitern, bzw. höherem Abfallaufkommen mehr Einfluss auf die Aufteilung der Entsorgungskosten in der Gesamtauswertung aller 36 Unternehmen.

Daraus ergibt sich ein nicht unerheblicher Anteil der Kosten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik von 44% an den gesamten Entsorgungskosten (vgl. auch Bild 3.5).

Dies bedeutet, dass die innerbetriebliche Handhabung der Abfälle, d. h. die Sammlung, der Transport, der Umschlag und die Lagerung der Abfälle, wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten der Entsorgung von betrieblichen Abfällen hat.

Um dieses Potential zu nutzen, wurde in den letzten Jahren verstärkt die Optimierung der betrieblichen Abfallwirtschaft vorangetrieben. Unterstützt durch die gesetzlichen Auflagen des KrW-/AbfG, das den Unternehmen vorschreibt, bei Überschreitung von bestimmten Abfallmengenschwellen Abfallwirtschaftskonzepte und

-bilanzen zu erstellen (vgl. Kapitel 3.1), werden die Unternehmen regelrecht dazu aufgefordert, ein Abfallmanagement einzurichten, welches den Anfall von Abfällen kontrolliert und minimiert und für eine geregelte Entsorgung der Abfälle sorgt. Diese Abfallmanagementsysteme in den Betrieben haben das Ziel, eine optimierte „ganzheitliche Industrieentsorgung“ zu gewährleisten. Das Abfallmanagementsystem reicht dabei von der üblichen Containerstellung und -abfuhr bis hin zu einem umfassenden Abfallmanagement, d. h. EDV-gestützte Erstellung von Abfallbilanzen und Abfallwirtschaftskonzepten, Entsorgung der Abfälle ab der Anfallstelle (innerbetriebliche Sammlung und Transport der Abfälle, Bereitstellung und Kommissionierung für die Abfuhr), Übernahme- und Begleitscheinverfahren, Schulung von Mitarbeitern, Beratung, etc..

| Aufteilung der Entsorgungskosten | Externe Entsorgungskosten [%] | Kosten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik [%] |
|---|-------------------------------|---|
| Auswertung ohne Gewichtung | 53,8 | 46,2 |
| Auswertung mit Gewichtung nach Anzahl der Mitarbeiter | 59,0 | 41,0 |
| Auswertung mit Gewichtung nach Abfallaufkommen | 55,3 | 44,7 |
| | | |
| Mittelwert | 56,0 | 44,0 |

Bild 3.5: Anteil der Kosten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik an den gesamten Entsorgungskosten.

3.5 Systemelemente der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik

Durch den Abfallanfall in Industrieunternehmen werden logistische Leistungen zur Entsorgung der Abfälle angestoßen. Die zu erbringenden Leistungen im Bereich der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik sind zum Teil vergleichbar mit den Leistungen, die im betrieblichen Produktionsprozess benötigt werden. Die aus der Produktion bekannten Logistikprozesse, wie z. B. der Transport und das Lagern, finden auch auf der Seite der Entsorgung Anwendung. Darüber hinaus ist die Sammlung der Abfälle als zusätzlicher entsorgungsspezifischer Logistikprozess zu betrachten (vgl. auch Kapitel 4.2.2).

Im Folgenden werden die Sammelsysteme und -verfahren beschrieben, die in der betrieblichen Entsorgungslogistik zum Einsatz kommen. Darüber hinaus werden die

Förder-, Transport- und Umschlagmittel für die inner- und außerbetriebliche Sammlung und den Transport von Abfällen vorgestellt.

Eine umfassende Beschreibung der Sammelsysteme und Sammelverfahren, sowie der Förder- Transport- und Umschlagmittel liefert Heimsoth /Heimsoth-2000/, so dass im Rahmen dieser Arbeit nur kurz aus Gründen der Verständlichkeit für die darauffolgenden Kapitel auf die o. g. Systemelemente eingegangen wird.

3.5.1 Sammelsysteme

Eine sehr wichtige entsorgungslogistische Komponente sind die Sammelsysteme, da diese durch die systembedingten Handhabungs- und Umschlagfunktionen die innerbetriebliche Logistik im Bereich der Entsorgung vorgeben.

Die Behälter, die zur Sammlung innerhalb und außerhalb der Produktionshallen eingesetzt werden, lassen sich grundsätzlich einteilen in /Bilitewski-2000, Tabasaran-1994/:

- *Umleersysteme:*

Die Umleersysteme sind vor allem aus der kommunalen Entsorgungswirtschaft bekannt und sind fast ausschließlich genormt /DIN EN-840/. Die genormten Umleersysteme werden mit einer Kamm- oder Diamond-Aufnahmetasche hergestellt und können somit auch nur mit einer Schüttvorrichtung mit entsprechenden Aufnahmeköpfen in Kamm- oder Diamond-Ausführung umgeleert werden. Ein typischer Umleerbehälter aus der kommunalen Entsorgung ist der Müllgroßbehälter MGB 120 l und 240 l (vgl. Bild 3.6). Größere Umleerbehälter (MGB ab einem Fassungsvermögen von 660 l) können über jeweils zwei Zapfen oder Taschen aufgenommen werden. Ein bekanntes Beispiel ist der MGB 1,1 m³ mit Schiebedeckel, der wie die MGB 120 l und 240 l vor allem in der Hausmüllsammlung von privaten Haushalten zum Einsatz kommt.

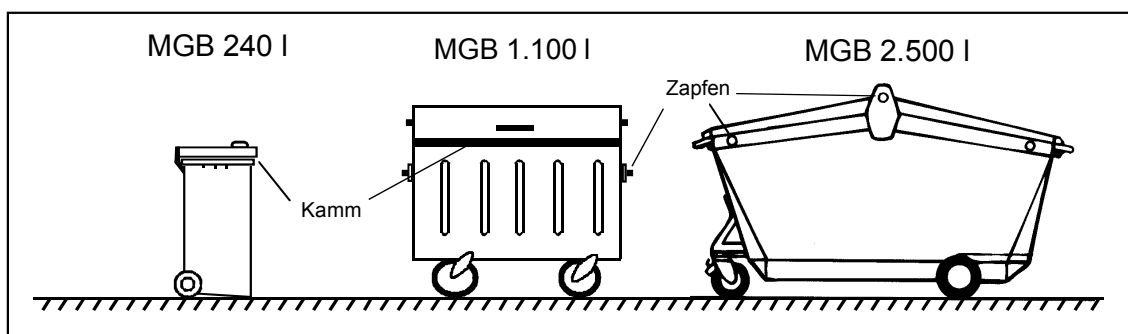


Bild 3.6: Umleersysteme der kommunalen Abfallwirtschaft /Heimsoth-2000/.

Weiterhin haben sich sogenannte Kippmulden für die Industrieentsorgung als Sammelbehälter im Umleersystem durchgesetzt. Dieser Behälter hat den Vorteil, dass für das Handling mit einem Gabelstapler spezielle Taschen für die Aufnahme mit den Gabelstaplerzinken vorgesehen sind.

- *Wechselsysteme:*

Die Sammelbehälter für Wechselsysteme sind ebenfalls genormt /DIN-30722/. Eingeteilt werden Wechselbehälter nach Absetzmulden und Abrollbehälter bzw. Gleitabsetzbehälter (vgl. Bild 3.7). Diese Behälter werden in der Industrieentsorgung bevorzugt zur Sammlung von Abfällen an zentralen und dezentralen Sammelstellen außerhalb der Produktionshallen eingesetzt (vgl. die folgenden Kapitel).

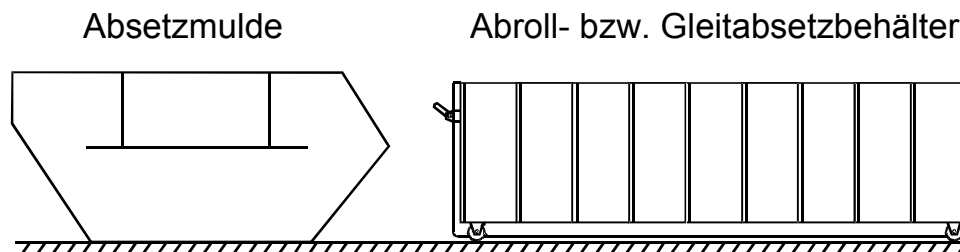


Bild 3.7: Sammelbehälter für Wechselsysteme /Heimsoth-2000/.

Für die innerbetriebliche Entsorgung von Abfällen haben sich außerdem auch Wechselbehälter aus der Versorgungslogistik z. B. Gitterboxen durchgesetzt, die im Industrieunternehmen zur Abfallsammlung genutzt werden.

- *Einwegsysteme:*

Während Einwegsysteme in der kommunalen Entsorgungswirtschaft wenig zum Einsatz kommen, spielen diese in der Industrieentsorgung eine größere Rolle. Als Einwegsysteme sind vor allem Säcke aus Papier oder Kunststoff verbreitet, die in Sackständer für die Abfallsammlung in den Produktionshallen bereitgestellt werden. Restmüll, Papier oder Folie sind dabei die gängigen Abfallfraktionen, die im Einwegsystem der Sacksammlung gesammelt werden. Der Nachteil des zeitaufwendigen Austauschs der Säcke wird durch den Vorteil der Möglichkeit, verschiedene Abfallfraktionen durch unterschiedliche Farbgebung der Säcke gleichzeitig in einer Abfallsammeltour zu sammeln, ausgeglichen.

3.5.2 Sammel- und Bereitstellungsverfahren

Entsprechend der Sammelsysteme werden die folgenden Sammelverfahren unterschieden:

Beim *Umleerverfahren* wird der Umleerbehälter in ein Sammelfahrzeug oder einen Sammelbehälter mit Umleervorrichtung (z. B. Presscontainer) umgeleert. Der Umleerbehälter steht nach dem Umleervorgang wieder für die Abfallbefüllung zur Verfügung. Umleerbehälter haben einheitliche, in der Regel genormte Maße, so dass ihre Leerung über eine Systemschüttvorrichtung erfolgen kann. Ein Beispiel für einen Umleerbehälter ist der sogenannte Müllgroßbehälter MGB.

Im Unterschied zum Umleerverfahren wird beim *Wechselverfahren* der volle Abfallbehälter gegen einen neuen, leeren Abfallbehälter ausgetauscht. Der Wechselbehälter hat im allgemeinen ein größeres Fassungsvermögen als der Umleerbehälter. Ein Beispiel für einen Wechselbehälter ist die Mulde, die vor allem für die Sammlung von Bauschuttabfällen eingesetzt wird.

Beim *Einwegverfahren* erfolgt die Sammlung von Abfällen in Einwegbehältern, z. B. in Säcken aus Kunststoff oder Papier. Dabei wird der Sammelbehälter mit dem Abfall entsorgt.

Die Bereitstellung der Abfallsammelbehälter in den Industrieunternehmen unterscheidet sich vor allem durch die Größe des Unternehmens und der zur Verfügung stehenden Stell- bzw. Lagerflächen. Die Untersuchung hat ergeben, dass sich grundsätzlich die folgenden drei Bereitstellungsverfahren in der Industrieentsorgung durchgesetzt haben (vgl. auch Bild 3.8):

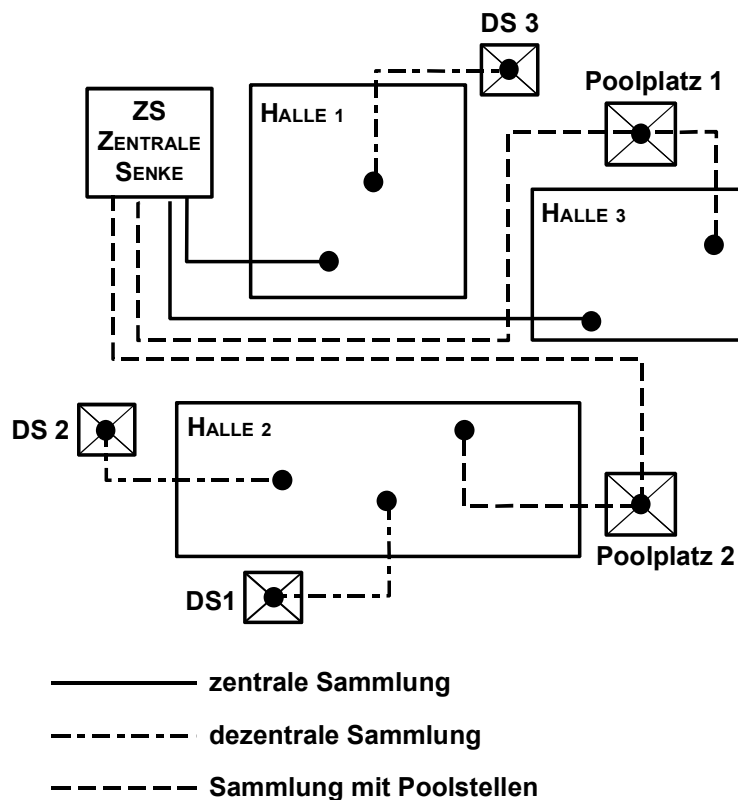


Bild 3.8: Bereitstellungsverfahren in der Industrieentsorgung.

- **zentrale Sammlung**

Bei der zentralen Sammlung werden die Abfälle zu einem zentralen Sammelplatz, z. B. Wertstoffhof oder Reststoffsammelplatz, gebracht. Zentral bedeutet dabei nicht, dass dieser Platz in der Mitte des Werkes angesiedelt sein muss. In der Praxis liegt der zentrale Sammelplatz meistens im Randbereich, da die interne Flächenvergabe natürlich zunächst Produktionsbereiche bedient. Überwiegend werden an zentralen Sammelstellen Wechselbehälter eingesetzt, die das Werk im Wechselverfahren verlassen. Die hier gesammelten Abfälle stehen für den Transport zur Verwertungs- bzw. Beseitigungsanlage bereit und verlassen damit das Werk des Unternehmens. Es erfolgt kein weiterer Umschlag der Abfälle im Werk.

- **dezentrale Sammlung**

Die dezentrale Sammlung kommt dann zum Einsatz, wenn große Mengen bzw. kurze Entleerungszyklen und große Entfernungen im Werk für eine Fraktion vorhanden sind. Auch hier sind überwiegend Wechselsysteme im Einsatz, die dezentral aufgestellt sind. Als Beispiel seien die an den Hallenkanten aufgestellten Presscontainer genannt. Wie bei der zentralen Sammlung stehen die hier gesammelten Abfälle für den Transport zur Verwertungs- bzw. Beseitigungsanlage bereit und verlassen damit das Werk des Unternehmens. Es erfolgt kein weiterer Umschlag der Abfälle im Werk.

- **Sammlung mit Poolstellen**

Im Gegensatz zur zentralen und dezentralen Sammlung findet an Poolstellen zunächst eine Zwischenlagerung der Abfälle statt. Die Abfallsammelbehälter stehen dabei für einen weiteren Umschlag innerhalb des Werkes bereit. Sie gelangen durch die werksinterne Transportlogistik („Poolfahrzeuge“) zur zentralen Senke, wo sie für den Transport zur Verwertungs- bzw. Beseitigungsanlage bereitgestellt werden. Poolstellen kommen ebenfalls wie dezentrale Sammelstellen dann zum Einsatz, wenn große Mengen bzw. kurze Entleerungszyklen und große Entfernungen im Werk für eine Fraktion vorhanden sind. Die Sammlung mit Poolstellen ist somit eine zweistufige Sammlung, da die Abfälle zweimal im Werk umgeschlagen werden.

Die Vor- und Nachteile dieser Verfahren sind in Bild 3.9 dargestellt.

| Bereitstellungs- verfahren | Vorteil | Nachteil |
|-------------------------------|--|---|
| Zentrale Sammlung | <ul style="list-style-type: none"> - Kontrolle der ein- und ausgehenden Abfälle an einem Ort (wichtig bei Abfällen mit Begleitscheinverfahren). - Stellflächen für Sammelbehälter in produktionsnahen Bereichen entfallen. - Bei geringem Abfallaufkommen können wirtschaftliche Transporteinheiten erzeugt werden. | <ul style="list-style-type: none"> - z. T. sehr weite Wege von der Abfallquelle zur zentralen Senke. |
| Dezentrale Sammlung | <ul style="list-style-type: none"> - Kurze Wege von der Abfallquelle zur dezentralen Senke. - Der innerbetriebliche Abfalltransport wird minimiert. - Kosten- und Mengen können den Produktionsbereichen besser zugeordnet werden. | <ul style="list-style-type: none"> - Schlechte Kontrolle der ein- und ausgehenden Abfälle. - Produktionsnahe Stellflächen müssen zur Verfügung gestellt werden. |
| Sammlung mit Poolstellen | <ul style="list-style-type: none"> - Die innerbetriebliche Abfalllogistik wird optimiert, da Sammlung und Transport entkoppelt werden. | <ul style="list-style-type: none"> - Zweistufige Sammlung = zweimaliger Umschlag. |

Bild 3.9: Vor- und Nachteile der Bereitstellungsverfahren in Anlehnung an /Heimsoth-2000/.

Die Untersuchung hat ergeben, dass in 12 der betrachteten 36 Unternehmen eine zweistufige Sammlung für bestimmte Abfallfraktionen durchgeführt wurde, d. h. es erfolgt in diesem Fall entweder eine Umleerung von kleinen Behältern in größere Behälter oder ein Wechseln der Behälter „voll gegen leer“, d. h. eine voller Behälter wird durch einen leeren Behälter ersetzt (dezentraler Standort), die wiederum entweder in Großbehälter (z. B. Abrollbehälter, Absetzmulden, Presscontainer) an der zentralen Abfallsammelstelle umgeleert oder zur direkten Entleerung bzw. zum Abtransport bereitgestellt werden. Bei allen anderen Unternehmen wurde entweder direkt in Großbehälter umgeleert oder der Behälter zur direkten Entleerung dezentral bereitgestellt.

Um diesen Prozess der zweistufigen Sammlung in der Simulation abbilden zu können, soll bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass in der Simulation eine weitere Abgrenzung der Bereitstellungsverfahren durch die Systemgrenze des Abfalls notwendig wird (vgl. hierzu Kapitel 6.2). Die Systemgrenze des Abfalls in der Simulation wird als innerbetriebliche Senke bezeichnet. Sobald die Abfälle die innerbetriebliche Senke, also die Systemgrenze erreicht haben, treten sie aus dem

Simulationsmodell aus. In der Simulation sind die zentrale und dezentrale Abfallsammelstelle bzw. Senke Systemgrenze, d. h. die Abfälle verlassen in diesem Fall das Werk des Industrieunternehmens. Der Poolplatz ist Zwischensammelstelle und somit keine Systemgrenze für den Abfall, d. h. die Abfälle werden an dieser Stelle zur weiteren Sammlung bereitgestellt. Das „Poolfahrzeug“ ist dabei ausschließlich für die Sammlung und den Transport der Abfälle zwischen Poolplatz und zentraler Senke zuständig. Dadurch kann eine zweistufige Sammlung in der Simulation abgebildet werden. Außerdem ermöglicht die Simulation sowohl die Bereitstellung von Umleer- als auch Wechselbehälter für alle drei Bereitstellungsverfahren.

3.5.3 Förder-, Transport- und Umschlagmittel für die Sammlung und den Transport von Abfällen in der Industrieentsorgung

Bild 3.10 und Bild 3.11 zeigen eine Auflistung aller typischen Förder-, Transport- und Umschlagmittel, die für die innerbetriebliche Entsorgung eingesetzt werden. Je nachdem, ob in der Halle (Bild 3.10) oder auf Werksebene (Bild 3.11) gesammelt wird, werden die Förder-, Transport- und Umschlagmittel nach ihrem Einsatzbereich aufgeteilt.

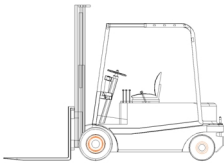
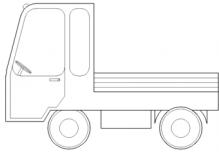
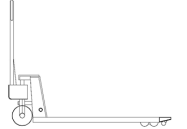

| Einsatzbereich | Innerbetriebliche Förder-, Transport- und Umschlagmittel | | Normen und Richtlinien |
|--|--|--|--------------------------|
| Sammlung und Transport in der Halle eines Industrieunternehmens | Gabelstapler (überwiegend mit Elektroantrieb) |  | /VDI-3586/ /VDI-2198/ |
| | Wagen bzw. Schlepper (mit Anhänger) |  | /VDI-3973/ |
| | Handgabelhubwagen |  | /VDI-3586/ |
| | Fahrerloses Transportfahrzeug FTF |  | /VDI-2510/ |

Bild 3.10: Typische Förder-, Transport- und Umschlagmittel für den Einsatz der Abfallsammlung in der Halle eines Industrieunternehmens in Anlehnung an /Heimsoth-2000/.

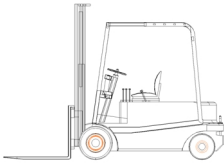
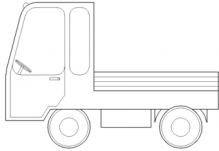
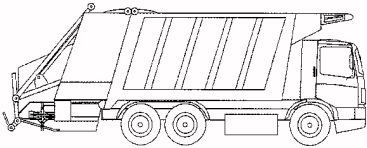
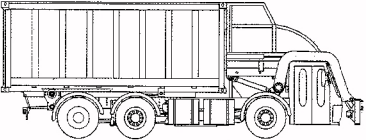
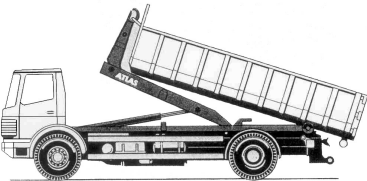
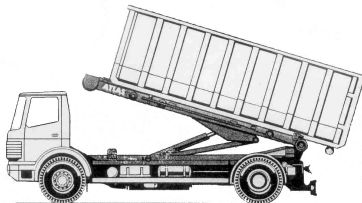
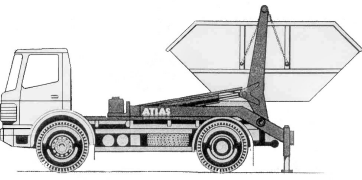
| Einsatzbereich | Innerbetriebliche Förder-, Transport- und Umschlagmittel | | Normen und Richtlinien |
|--|--|--|----------------------------|
| Sammlung und Transport auf Werksebene eines Industrie- unternehmens | Gabelstapler (überwiegend mit Verbrennungsmotor) |  | /VDI-3586/ /VDI-2198/ |
| | Wagen bzw. Schlep- per (mit Anhänger) |  | /VDI-3973/ |
| | Abfallsammelfahr- zeug: Hecklader |  | /DIN EN- 1501/ |
| | Frontlader |  | |
| | Abrollkipperfahrzeug |  | /DIN-30722/ /DIN-30723/ |
| | Abgleitkipperfahrzeug |  | |
| Absetzkipperfahrzeug |  | | |

Bild 3.11: Typische Förder-, Transport- und Umschlagmittel für den Einsatz der Abfallsammlung auf Werksebene eines Industrieunternehmens in Anlehnung an /Heimsoth-2000/.

Am weitesten verbreitet sind der Gabelstapler und der Wagen bzw. Schlepper. Beide Fördermittel können sowohl für die Sammlung und den Transport der Abfälle in der Halle, als auch auf der Werksebene eingesetzt werden.

Der Vorteil des Gabelstaplers liegt darin, dass er durch zahlreiche alternative Lastaufnahmemittel (Anbaugeräte /DIN 15136/) dem jeweiligen Einsatzfall angepasst werden kann. In den meisten Fällen werden Gitterboxen aus der Versorgungslogistik, die als Sammelbehälter für Abfälle verwendet werden, von Gabelstaplern transportiert.

In Kombination mit einer drehbaren Gabel als zusätzliches Anbaugerät, können Gabelstapler mit entsprechenden Umleerbehältern auch im Umleerverfahren eingesetzt werden. Berücksichtigt man außerdem, dass der Gabelstapler auch als Zugmittel für angehängte Abfallsammelbehälter verwendet werden kann, so ist der Gabelstapler auch in der innerbetrieblichen Entsorgung das flexibelste Fördermittel für die Sammlung und den Transport von Abfällen.

Zur Bildung von Schleppzügen, wie in Bild 3.12 dargestellt, werden häufig der Wagen bzw. der Schlepper eingesetzt. Der Vorteil des Schleppzuges liegt darin, dass in einer Sammeltour gleichzeitig mehrere Behälter und damit auch unterschiedliche Abfallfraktionen gesammelt und transportiert werden können.

Der Gabelhubwagen wird vor allem für Umschlagprozesse eingesetzt. Für die Sammlung und den Transport der Abfälle über weite Entfernungen ist der Handgabelhubwagen allein schon aus Gründen der ausschließlich manuellen Handhabung ungeeignet.



Bild 3.12: Wagen mit angehängten Sammelbehältern.

Der Einsatz von fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) für die innerbetriebliche Entsorgung ist in der heutigen Industriepraxis äußerst selten. Die Entsorgung von Restabfall, Papier und Folie durch ein fahrerloses Transportfahrzeug wurde nur bei zwei der 36 betrachteten Unternehmen beobachtet. In diesem Fall wird das fahrerlose Transportsystem der Versorgungslogistik genutzt, wobei zusammen mit dem Leerguttransport die Abfalltransporte durchgeführt werden. Die Abfallsenke der Abfallfraktionen Restabfall, Papier und Folie liegt dementsprechend in unmittelbarer Nähe des Leergutplatzes.

Müssen Wechselbehälter über verschiedene Ebenen (Höhenunterschiede) transportiert werden, bzw. sind größere Sammelbehälter wie z. B. Mulden nicht für das Sammel- und Transportfahrzeug in der Halle frei zugänglich, werden z. T. auch Hallenkrane für den Umschlag verwendet /DIN-15001/. Der Einsatz von Kranen für die Entsorgung innerbetrieblicher Abfälle beschränkt sich daher auf bestimmte Branchen, wie z. B. dem Schiffbau. Hier müssen die Sammelbehälter dem Schiff zu- und abgeführt werden. Die Bedeutung von Kranen in der innerbetrieblichen Entsorgung ist sehr gering, so dass der Kran in Bild 3.10 nicht aufgeführt wurde.

Abfallsammelfahrzeuge und Abroll- oder Absetzkipper können nur als innerbetriebliches Transportmittel aufgefasst werden, wenn diese das Werk des Industrieunternehmens nicht verlassen. In den meisten Fällen werden diese Fahrzeuge aber für den außerbetrieblichen Transport eingesetzt und fahren nur für die Sammlung und den Umschlag der Behälter an der zentralen und dezentralen Senke in das Industrieunternehmen.

Der Einsatz der Sammel- und Transportmittel der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik richtet sich vor allem nach den zu handhabenden Sammelbehältern. Ausschlaggebend ist dabei die unterschiedliche Handhabungsmöglichkeit der kommunalen Behälter (z. B. MGB) und der Behälter aus der Versorgungslogistik (z. B. Gitterbox, vgl. Kapitel 3.5.1). An der Abfallquelle führt der Einsatz von kommunalen Behältern zu ausreichender Ergonomie sowie Mobilität durch die vorhandenen Räder. An der Abfallsenke spricht die vorhandene Kompatibilität zu den Abfallsammelfahrzeugen der Entsorger für den Einsatz von Sammelbehältern aus der kommunalen Entsorgung. Für den Transport und Umschlag zwischen Abfallquelle und -senke sind diese Behälter allerdings aus logistischer Sicht äußerst ungeeignet, da eine oft nur manuelle Handhabung der Behälter möglich ist /Heimsoth-2000/.

Dagegen eignen sich die Behälter der Versorgungslogistik, die für die Handhabung mit Gabelstapler, Schlepper, Gabelhubwagen und FTF vorgesehen sind, vor allem für den Transport zwischen der innerbetrieblichen Abfallquelle und -senke. Dafür fehlt aber jegliche Kompatibilität an der Abfallsenke, z. B. zum Umleeren der Behälter in ein Abfallsammelfahrzeug, bzw. in einen Abrollbehälter.

Die Untersuchung bei den 36 Unternehmen hat gezeigt, dass die Sammelsysteme aus der kommunalen Entsorgung mit einem Anteil von bis zu 65% in der Industrieentsorgung weite Verbreitung finden, obwohl diese Behälter für den Transport in Industrieunternehmen nicht geeignet sind.

Um diesen o. g. Schwachstellen bei der Handhabung der unterschiedlichen Behältersysteme in der innerbetrieblichen Entsorgung entgegenzuwirken, behelfen sich die Industrieunternehmen z. T. durch konstruktive Modifikationen an den Sammel- und Transportbehältern, wie im folgendem Beispiel beschrieben wird (vgl. Bild 3.13).



Bild 3.13: Anpassung kommunaler Sammelbehälter an die Anforderungen der innerbetrieblichen Entsorgung durch Montage von Deichseln und Kupplungen für den Einsatz in Schleppzügen.

Aus Bild 3.13 kann z. B. entnommen werden, dass für den Transport der genormten Abfallsammelbehältern aus der kommunalen Entsorgungswirtschaft Kupplungen und Deichseln durch das Industrieunternehmen montiert wurden, wodurch Schleppzüge gebildet werden können.

Abhilfe schafft ein nach den Anforderungen der Industrieentsorgung neu entwickeltes Behältersystem, das sich u. a. durch seine Kompatibilität zu den gängigen Fördermitteln der Produktion (Gabelstapler, Schlepper, Rollenbahn, etc.) und zu den Abfallsammelfahrzeugen am Ende der Transportkette auszeichnet (vgl. Bild 3.14). Dabei wurden vorhandene, bewährte Komponenten, z. B. der Korpus eines 660 l MGB (Müllgroßbehälter), mit neuen Komponenten, z. B. der Bodengruppe, kombiniert. Der Sammelbehälter ist rollbar und kann somit weiterhin manuell gehandhabt werden, z. B. zum Heranschieben des Behälters an die Schüttvorrichtung des Ab-

fallsammelfahrzeuges. Durch Einklappen der Räder kann der Sammelbehälter wie eine Palette gehandhabt werden und ist außerdem noch stapelbar.

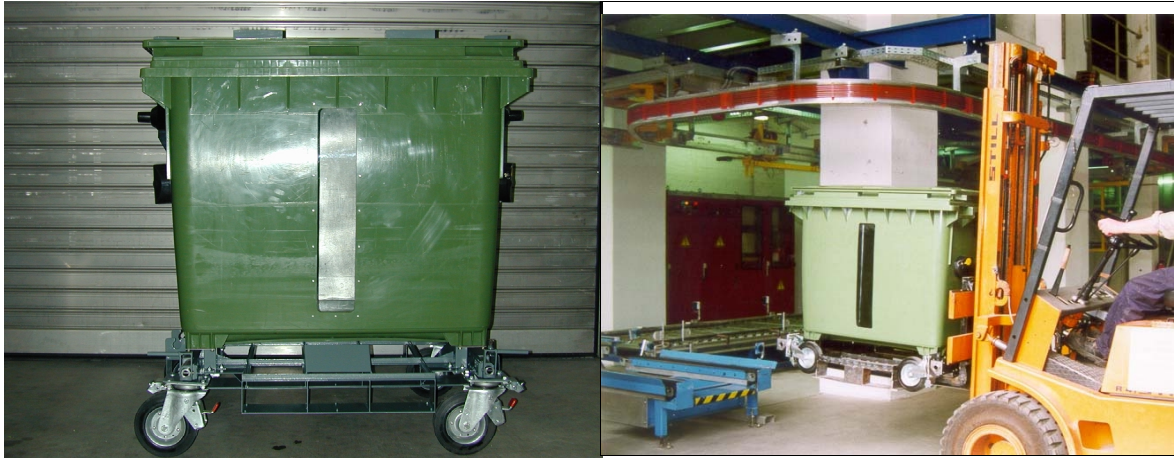


Bild 3.14: Prototyp des Industrieentsorgungsbehälters /Heimsoth-2000/.

3.5.4 Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik

Die eingehende Analyse von 36 Industrieunternehmen führte zu den Systemelementen der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik, die in den Kapiteln 3.5.1 – 3.5.3 beschrieben wurden. Damit aus diesen Systemelementen durch Aneinanderreihung der Vorgänge und Abläufe die Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik abgeleitet werden können, wurden diese zunächst gemäß Bild 3.15 strukturiert. Die Systemelemente werden dabei den folgenden vier Gruppen zugeordnet:

- *Abfallarten:* Die Einteilung nach Abfallarten erfolgt nach der Begriffsabgrenzung in Kapitel 3.3. Die Prozesskette beginnt mit der Festlegung der zu entsorgenden Abfallfraktion.
- *Sammellogistik:* Für die Sammlung in der Halle wird in das Umleer- und Wechselverfahren unterschieden. Auf Werksebene unterscheidet sich die Sammellogistik nach Kapitel 3.5.2 je nachdem ob zentral, dezentral oder im Poolssystem gesammelt wird.
- *Zwischensammelstelle:* Eine zweistufige Sammlung der Abfälle erfolgt über die Kombination Poolssystem und zentrale Senke.
- *Innerbetriebliche Senke:* Als innerbetriebliche Senke stehen die zentrale oder dezentrale Senke zur Auswahl.

Zusätzlich wird unterschieden, ob die Sammlung und der Transport der Abfälle in der Halle bzw. auf Werksebene, also zwischen Halle und innerbetrieblicher Senke, erfolgt.

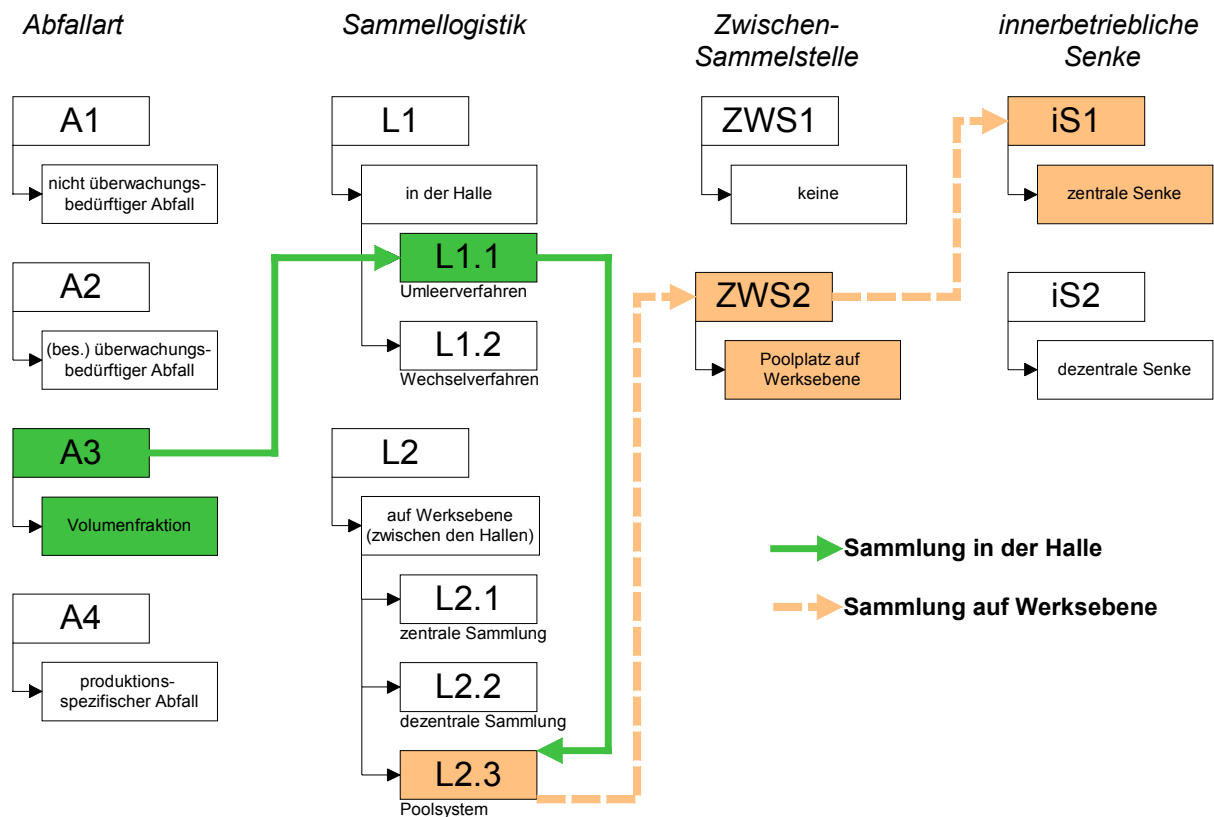


Bild 3.15: Beispiel einer Prozesskette der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik.

Allgemein gilt, dass eine Folge von zeitlich nacheinander ablaufender Vorgänge, die in einer räumlichen Kette von Leistungsstellen und Stationen stattfinden und zu einem Leistungsergebnis oder einer Wertschöpfung führen, als Prozesskette bezeichnet wird /Gudehus-1999/.

Die in Bild 3.15 beispielhaft dargestellte Prozesskette

A3 L1.1 L2.3 ZWS2 iS1

kann aus den Systemelementen der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik aufgebaut werden. Sie soll als Beispiel einer typischen Prozesskette der innerbetrieblichen Entsorgung von Volumenabfall (Systemelement **A3**) im Folgenden näher beschrieben werden:

Sammlung in der Halle im Umleerverfahren (Sammellogistik: Element L1.1)

- Die Sammlung der Abfälle in der Halle erfolgt z. B. durch einen Entsorgungsmitarbeiter (Personal: z. B. Mitarbeiter eines externen Entsorgungsfachbetriebes), der mittels Schleppzug (Fördermittel: Schlepper mit angehängten Sammelbehälter mit Rädern, z. B. MGB 1,1 m³, vgl. Bild 3.12) die einzelnen Sammelbehälter in der Halle (Behältersystem: z. B. MGB 120 I) in einer festgelegten Sammel-tour anfährt und an Ort und Stelle umleert (Umleerverfahren).

- Wenn das Sammelvolumen des Schleppzuges erschöpft ist, werden die Abfälle zu einem Poolplatz auf Werksebene (Zwischen-Sammelstelle: Element **ZWS2**) transportiert und die angehängten vollen Sammelbehälter (MGB 1,1 m³ s. o.) gegen leere ausgetauscht (Wechselverfahren) und falls erforderlich die Sammeltour in der Halle fortgesetzt.

Sammlung auf Werksebene im Poolsystem (Sammellogistik: Element **L2.3**)

- Die Sammlung der Abfälle auf Werksebene erfolgt durch ein Abfallsammelfahrzeug mit Umleervorrichtung für die Sammelbehälter MGB 1,1 m³ und Wechselbehälteraufbau, das z. B. im Turnus die Poolplätze anfährt und die Umleerung der vollen Behälter vornimmt. Ist die Sammeltour beendet, wird der Wechselbehälteraufbau des Abfallsammelfahrzeugs an der zentralen Senke (Senke: Element **iS1**) für den Abtransport aus dem Werk bereitgestellt.

In der Praxis (Analyse von 36 Industrieunternehmen) haben sich die folgenden sechs Prozessketten (vgl. Bild 3.16) für die innerbetriebliche Entsorgung durchgesetzt, die sich aus der Strukturierung der Systemelemente in Bild 3.15 ableiten lassen⁹. Dabei wird nach den Sammelverfahren in der Halle und den Bereitstellungsverfahren auf Werksebene unterschieden. Anhand dieser Prozessketten können sämtliche Prozesse der innerbetrieblichen Entsorgung, die logistisch relevant sind, abgebildet werden. Weitere Kombinationen sind prinzipiell möglich. Unterscheiden muss man hier allerdings in theoretisch mögliche Kombinationen, die aber keine Anwendung in der Praxis finden (z. B. die Sammlung von einem Poolplatz ZWS2 zu einer dezentralen Senke iS2), und Kombinationen die vereinzelt auch in der Praxis auftreten jedoch logistisch betrachtet wenig sinnvoll sind. Diese Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgung sollen deshalb in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

⁹ Im Anhang A1 sind die sechs Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgung beschrieben.

Sammlung in der Halle im Umleerverfahren:

1. **Ax** **L1.1** **L2.1** **ZWS1** **iS1** (zentrale Sammlung)
2. **Ax** **L1.1** **L2.2** **ZWS1** **iS2** (dezentrale Sammlung)
3. **Ax** **L1.1** **L2.3** **ZWS2** **iS1** (Sammlung mit Poolstellen)

Sammlung in der Halle im Wechselverfahren:

4. **Ax** **L1.2** **L2.1** **ZWS1** **iS1** (zentrale Sammlung)
5. **Ax** **L1.2** **L2.2** **ZWS1** **iS2** (dezentrale Sammlung)
6. **Ax** **L1.2** **L2.3** **ZWS2** **iS1** (Sammlung mit Poolstellen)

| | |
|------------|---|
| Ax | Abfallart: x=1, nicht überwachungsbedürftiger Abfall x=2, (bes.) überwachungsbedürftiger Abfall x=3, Volumenfraktion x=4, produktionsspezifischer Abfall |
| L1 | Sammellogistik in der Halle (L1.1=Umleerverfahren, L1.2=Wechselverfahren) |
| L2 | Sammellogistik auf Werksebene (L2.1=zentrale Sammlung, L2.2=dezentrale Sammlung, L2.3=Poolssystem) |
| ZWS | Zwischensammelstelle (1=keine, 2=Poolstelle) |
| iS1 | zentrale innerbetriebliche Senke |
| iS2 | dezentrale innerbetriebliche Senke |

Bild 3.16: Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgung.

4 Qualität der Entsorgungslogistik und deren Abgrenzung zur Versorgungslogistik

4.1 Funktionelle und institutionelle Abgrenzung der Ver- und Entsorgungslogistik

Zur Abgrenzung der Thematik ist es notwendig, zunächst eine Unterscheidung der verschiedenen Logistiksysteme vorzunehmen. Eine Möglichkeit zur Abgrenzung einzelner Teilfunktionen bietet die Einteilung nach Pfohl in funktionelle und institutionelle Gesichtspunkte /Pfohl-2000/. Funktionell unterscheiden sich die Logistiksysteme nach Art und Anzahl der im System betrachteten Funktionen, institutionell nach Art und Anzahl der im System betrachteten Institutionen.

Die institutionelle Abgrenzung der Logistiksysteme wird in der üblichen Unterscheidung von Makro-, Mikro- und Meta-Logistik vorgenommen. Bild 4.1 zeigt die institutionelle Eingliederung der innerbetrieblichen Logistik in der Industrielogistik und Unternehmenslogistik im gesamten Logistiksystem.

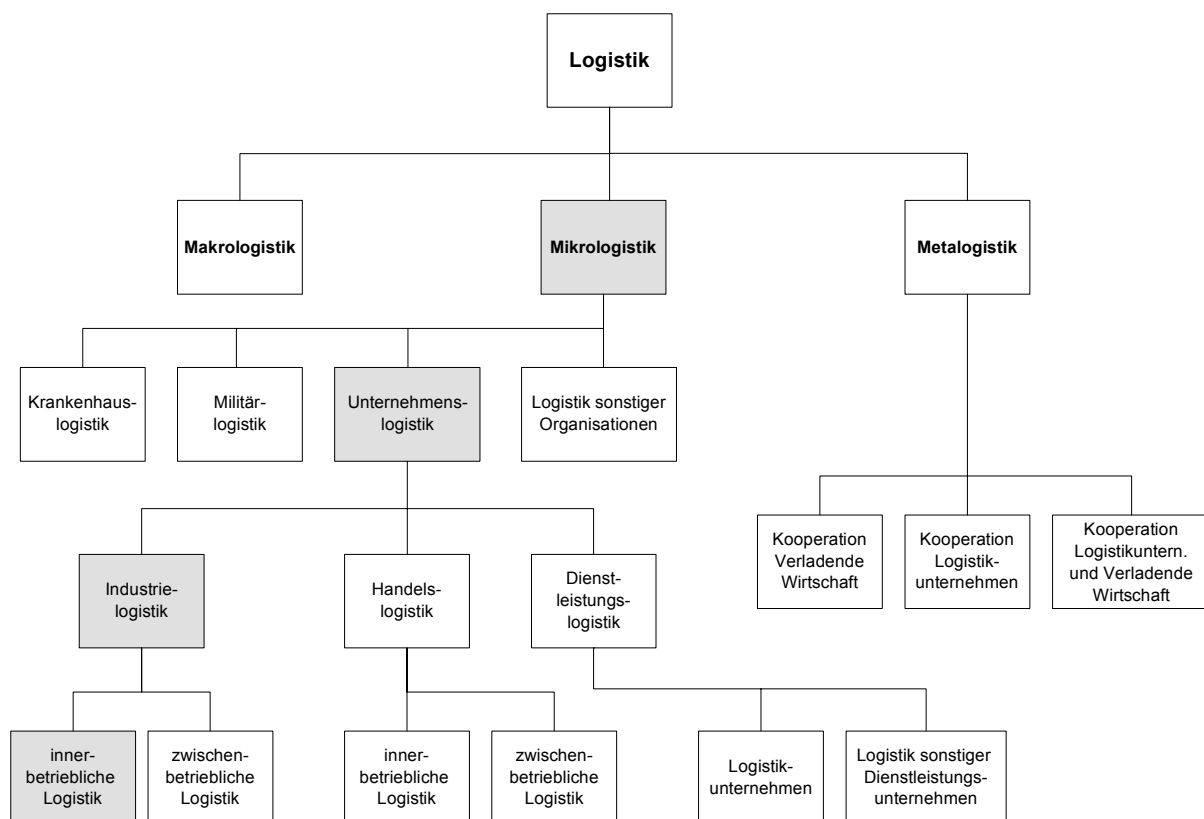


Bild 4.1: Institutionelle Abgrenzung von Logistiksystemen /Pfohl-2000/.

Jede Logistikaufgabe hat bestimmte Zielvorgaben und konzentriert sich auf einen Aktionsbereich, der durch die Standorte der Quellen und Senken sowie durch die Material- und Informationsströme definiert ist /Gudehus-1999/.

Die Makrologistik beinhaltet dabei die Material- und Informationsströme zwischen einer Vielzahl von Quellen und Senken einer gesamten Region oder eines Landes. Ihr Ziel ist es, durch Gesetze, Institutionen und Schaffung einer geeigneten Infrastruktur rationelle Verkehrs- und Informationsströme für eine optimale Wirtschaftsentwicklung zu ermöglichen.

Die Mikrologistik betrachtet die Material- und Informationsströme zwischen einzelnen Lieferanten und Abnehmern und in den Unternehmen. Ziel der Mikrologistik ist es, durch eine geeignete Organisation und Prozesssteuerung rationelle Material- und Informationsströme für eine optimale Geschäftsentwicklung zu schaffen /Ihde-1991/.

Systeme der Metalogistik liegen auf einer Betrachtungsebene zwischen Makro- und Mikrologistik. Ein metalogistisches System setzt sich aus mehreren kooperierenden Einzelorganisationen (Unternehmen) zusammen. Beispiel hierfür ist eine Kooperation zwischen Lieferant, Groß- und Einzelhändler sowie der eingeschalteten Spedition /Pfohl-2000, Stölzle-1993/.

Die funktionelle Abgrenzung der Logistiksysteme geschieht durch die Betrachtung der verschiedenen Phasen eines Güterflusses vom Beschaffungsmarkt durch ein Industrieunternehmen zum Absatzmarkt (vgl. Bild 4.2).

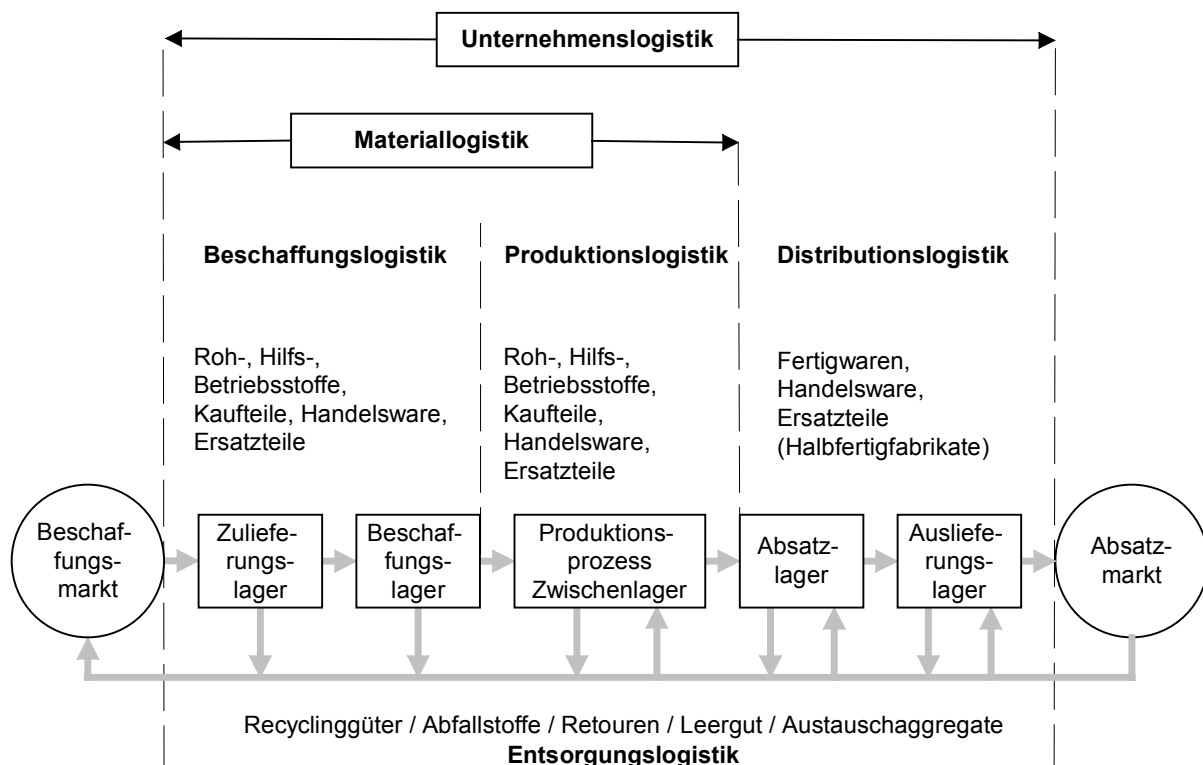


Bild 4.2: Funktionelle Abgrenzung von Logistiksystemen nach den Phasen des Güterflusses am Beispiel eines Unternehmens /Pfohl-2000/.

Unter dem Sammelbegriff „Unternehmenslogistik“ sind Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik funktionell abgegrenzt. Die Beschaffungslogistik bildet im

funktionellen Logistiksystem die erste Phase des Güterflusses. Sie beschäftigt sich mit der Versorgung des Produktionsprozesses mit Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, Kaufteilen sowie möglicherweise Handelswaren und gelieferten Ersatzteilen vom Beschaffungsmarkt. Die Produktionslogistik steuert den Fluss der Güter durch den Produktionsprozess. Aus der Produktion fließen Fertigfabrikate und auch Halbfertigfabrikate sowie für die Kunden bestimmte Ersatzteile zum Absatzlager. Die Distributionslogistik steuert den Absatz der Produkte auf dem Absatzmarkt. Dabei werden Beschaffungs- und Produktionslogistik zusammen auch als Materiallogistik bezeichnet. Die dritte Phase des Güterflusses bezeichnet man als Distributionslogistik.

Im Mittelpunkt der Betrachtung stand lange Zeit die Gestaltung und Optimierung der o. g. Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik. Die Distribution der Güter und die anschließende Konsumtionsphase bildeten den Abschluß der Logistikkette. Erst die kritische Situation der natürlichen Umwelt (Versiegen von Rohstoffressourcen, Überlastung der Natur als Aufnahmemedium) löste Mitte der achtziger Jahre die konzeptionelle Erweiterung der Logistik um die Entsorgungslogistik aus /Wehking-1988, Jünemann-1989, Gabler-1998/.

Heute richtet sich die Orientierung der Logistikkonzepte an der neuen Qualität der Wirtschaft als Kreislaufwirtschaft. Die Entsorgungslogistik ergänzt die bisherige versorgungsorientierte Logistik zu einer Kreislauflogistik. Bei dieser wird der Güterfluss zu einem Güterkreislauf weiterentwickelt (s. Bild 4.3). Damit rückt die Kreislaufführung von Produkten in den Vordergrund des Logistikmanagements. An die dritte Phase (Distributionslogistik) schließt sich somit die Entsorgungslogistik an, durch die sich im Idealfall ein geschlossener Materialflusskreislauf ergibt /Wehking-1991, Wehking-1995/.

In einer vierten Phase fließt der Güterstrom in einer umgekehrten Richtung der sogenannten Entsorgungslogistik. Nach Bild 4.2 erstreckt sich die Entsorgungslogistik über die gesamte Unternehmenslogistik. Mit der Einführung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und der hierin verankerten Produktverantwortung der Unternehmen gehört beispielsweise auch die Rückführung von Produkten nach Ablauf von deren Nutzungsphase an den Hersteller zu den Aufgaben der Entsorgungslogistik.

Die Entsorgung von Abfällen, die während des Produktionsprozesses anfallen, wird im Folgenden als *innerbetriebliche Entsorgungslogistik* als Teilsystem der gesamten betrieblichen Entsorgungslogistik bezeichnet (s. a. Bild 4.3):

„Die innerbetriebliche Entsorgungslogistik beinhaltet die Entsorgung der während des Produktionsprozesses anfallenden Abfälle im Unternehmen bzw. Betrieb¹⁰.“

¹⁰ Zwischen den Begriffen Unternehmen und Betrieb wird häufig die Unterscheidung getroffen, dass mit Unternehmen die rechtliche, finanzielle Einheit einer Betriebswirtschaft und mit Betrieb vor allem die technische Einheit bezeichnet wird, in der die Produktions- und Logistikprozesse ablaufen.

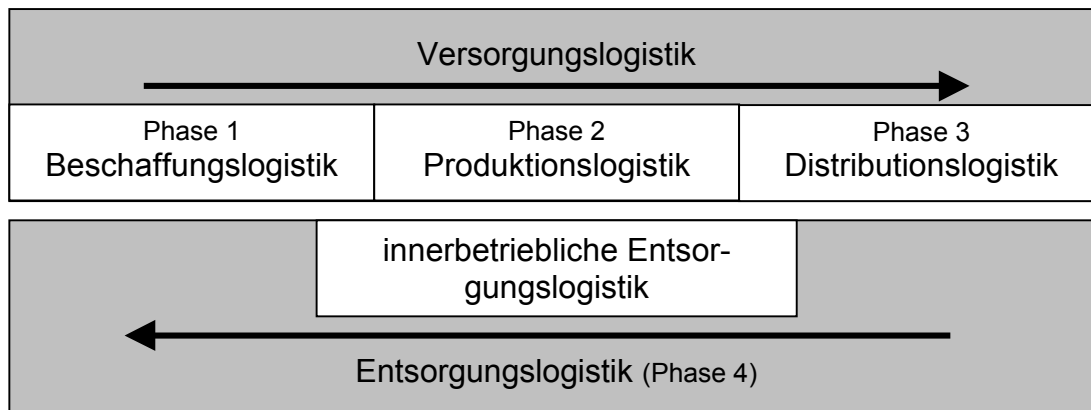


Bild 4.3: Entsorgungslogistik - aus funktionsorientierter Sicht; in Anlehnung an /Bruns-1997, Gabler-1998/.

4.2 Definitionen

Mit Hilfe der Definition von objekt- und prozessbezogenen Begriffen aus der Ver- und Entsorgungslogistik wird im Folgenden eine Abgrenzung der Thematik der Produktions- und Entsorgungsprozesse sowie -logistik vorgenommen. Die Objekte und Prozesse der Versorgungslogistik sollen an dieser Stelle nur im Rahmen einer allgemeingültigen Definition aufgeführt werden, da diese hinreichend in der Literatur beschrieben sind /Gudehus-1999, Jünemann-2000/.

4.2.1 Produktionsprozess und Produktionslogistik

Allgemein bewirken logistische Prozesse im Rahmen eines Transformationsprozesses eine Veränderung des Systemzustandes von Gegenständen der Logistik hinsichtlich Zeit, Ort, Menge, Zusammensetzung und Qualität. Die Gegenstände der Logistik sind /Jünemann-1989/:

- Güter (Materialien, Stoffe)
- Personen
- Informationen
- Energie
- Materialflussmittel (z. B. Güter- und Transportmittel)
- Produktionsmittel (z. B. energieerzeugende Anlagen)
- Informationsmittel (z. B. elektronische Datenträger)
- Infrastruktur (Gebäude, Flächen, Wege)

Durch die Verbindung der Objekte der Logistik (Güter, Personen, Informationen, Energie) mit den Arbeitsmitteln (Materialfluss-, Produktions- und Informationsmittel)

und der notwendigen Infrastruktur (Gebäude, Flächen, Wege) wird ein logistischer Prozess gebildet, der eine Veränderung des Systemzustandes hervorruft.

Als Teilsystem der Unternehmenslogistik plant, steuert und überwacht die Produktionslogistik den Materialfluss vom Rohmateriallager der Beschaffung über die unterschiedlichen Stufen des Produktionsprozesses bis hin zum Fertigwarenlager.

4.2.2 Entsorgungsprozess und Entsorgungslogistik

In der Literatur findet man eine Vielzahl von Definitionsansätzen für den Begriff „Entsorgungslogistik“. Eine umfassende Zusammenstellung und Beurteilung der Begriffsdefinitionen zur Entsorgungslogistik wurde durch Stölzle vorgenommen, der die publizierten Begriffsbestimmungen nach objektorientierten und flussrichtungsorientierten Merkmalen unterteilt /Stölzle-1993/. Begriffsbestimmungen, die in keine der zwei Kategorien fallen, wurden unter „Sonstige“ zusammengefasst. Hierunter fällt auch der Definitionsvorschlag von Stölzle, der unter „Entsorgungslogistik die Anwendung der Logistikkonzeption auf Reststoffe¹¹ versteht, um mit allen Tätigkeiten der raum-zeitlichen Transformation, einschließlich der Mengen- und Sortenänderung, einen ökonomisch und ökologisch effizienten Reststoff-Fluss zu gestalten“. Hier werden unter dem Begriff „Entsorgungslogistik“ die zur Entsorgung von Entsorgungsobjekten erforderlichen Transferaktivitäten zusammengefasst. Diese Definition entspricht der klassischen Auffassung von Logistik aus funktionsorientierter Sicht.

Eine nach dem Logistikverständnis des Logistikmanagements angelehnte Definition bezeichnet die Entsorgungslogistik als eine spezifische Managementkonzeption zur Entwicklung, Gestaltung, Lenkung und Realisierung effektiver und effizienter Flüsse von Entsorgungsobjekten (Abfälle und dazugehörige Informationen) in unternehmensweiten und -übergreifenden Wertschöpfungs- und Entsorgungssystemen /Gabler-1998/. Bestandteil der Entsorgungslogistik sind außerdem alle damit verbundenen Informationsprozesse. Dazu zählen auch alle Tätigkeiten, die mit dem Begleitschein- und Entsorgungsnachweisverfahren zu tun haben, Informationspflichten an Behörden, Abfallbilanzerstellung, etc..

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Beurteilung der Qualität der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik, insbesondere der Entsorgung von bereits angefallenen Industrieabfällen liegt, ist es sinnvoll eine weitere Eingrenzung der Definition des Begriffes „Entsorgungslogistik“ vorzunehmen.

¹¹ Die Bezeichnung „Reststoff“ wurde in §2 Abs. 3 des AbfG von 1986 unter dem „erweiterten Abfallbegriff“ aufgeführt. Nach dem Krw-/AbfG von 1996 wird nur noch in Abfälle zur Verwertung und Abfälle zur Beseitigung unterschieden (s. a. Kapitel 3.3).

Um sich dabei auch gleichzeitig von der Begriffbezeichnung zu unterscheiden, soll an dieser Stelle der Begriff „Abfalllogistik“ nach Ewers eingeführt werden /Ewers-1996/:

„Die Abfalllogistik befasst sich ausschließlich mit der technischen und organisatorischen Gestaltung der logistischen Infrastruktur zur Bewältigung bereits angefallener Abfälle. Im Gegensatz hierzu wird unter dem Begriff der Entsorgungslogistik nicht nur die physische Handhabung des Abfalls verstanden, sondern vor allem auch die umfassende Betrachtung zur Entwicklung von betrieblichen Konzepten zur Abfallvermeidung, -verringern, und Kreislaufführung von Produkten. Demnach wird die Abfalllogistik als Teilbereich der Entsorgungslogistik bezeichnet.“

Die Betrachtung der betrieblichen Konzepte im Rahmen der Abfallvermeidung, -verringern und Kreislaufführung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Im Folgenden können daher alle Begriffe, die im Zusammenhang mit der Entsorgungslogistik aufgeführten werden, auf das Aufgabengebiet der oben definierten Abfalllogistik reduziert werden.

Aufgabe der Abfalllogistik ist es, entsorgungslogistische Prozesse zeit- und kostenoptimal zu verbinden. Der Entsorgungsprozess verbindet wiederum die lokal gebundenen Anfallquellen des Abfalls mit den Abfallsenken (Orte der Endablagerung oder Verwertung), sowie die dazwischen liegenden örtlich gebundenen Teilprozesse der Entsorgung untereinander. Die Entsorgungslogistik sorgt dafür, dass aus einem stochastischen Anfall von Abfall ein bedarfsgerechtes und planbares Aufkommen an den Entsorgungsanlagen, wie z. B. Abfallsammelzentren, Umschlagplätzen und Verwertungs- und Beseitigungsanlagen wird /Matschke-1996/.

Zu den entsorgungslogistischen Teilprozessen zählen die sogenannten STULB-Prozesse, die sich wie folgt aufteilen lassen /Wehking-1996, Bruns-1997/:

- **Sammeln,**
- **Transportieren,**
- **Umschlagen,**
- **Lagern,**
- **Behandeln.**

Die *Sammlung* von Abfällen zählt im Unterschied zu den anderen genannten Teilprozessen zu den entsorgungsspezifischen Prozessen. Durch den Teilprozess *Transport* wird mit Hilfe von Transportmitteln eine Raumüberbrückung bzw. Ortsveränderung von Transportgütern, in diesem Fall von Abfällen erreicht. Beim innerbetrieblichen Transport werden Abfälle z. B. zu Behälterstandplätzen oder zentralen Sammelstellen auf dem Unternehmensgelände transportiert.

Beim Teilprozess *Umschlagen* werden Abfälle in ihrer Zusammenstellung durch Verlade-, Umlade- und Entladeprozesse verändert. Umschlagvorgänge treten beim Wechsel des Transportmittels und bei der Zwischenlagerung der Abfälle sowie an der Abfallquelle auf (vgl. Bild 4.4).

Von den klassischen Funktionen des Lagerns (Ausgleichsfunktion, Pufferfunktion, Sicherungsfunktion, Veredelungsfunktion und Spekulationsfunktion) kommt beim entsorgungslogistischen Teilprozess *Lagern* der Pufferfunktion besondere Bedeutung zu /Stölzle-1993/. Die Abfälle werden in der Regel vom Zeitpunkt ihres Anfalls bis zum Zeitpunkt ihres „Abtransportes“ zur externen Verwertungs- oder Beseitigungsanlage im Industrieunternehmen zwischengepuffert. Die Ziele der Lagerhaltung von Abfällen unterscheiden sich dabei deutlich von den Zielen der versorgungsorientierten Logistik. Die Ausgleichs- und Sicherungsfunktion spielt z. B. nur eine Rolle, wenn Abfälle in regelmäßigen oder zeitlich definierten Abständen einer Verwertung oder Beseitigung zugeführt werden müssen. Dies ist in der Regel aber nicht Aufgabe des Industrieunternehmens, sondern wird häufig durch den externen Entsorgungsdienstleister bzw. Betreiber der Verwertungs- oder Beseitigungsanlage übernommen. Es dominiert somit bei der Lagerhaltung im Bereich der innerbetrieblichen Entsorgung das Ziel, durch die Bereitstellung von ausreichender Lagerkapazität die Abfälle aus den Prozessen der Produktion in bestimmten oder auch unbestimmten Zeitintervallen aufnehmen zu können. Außerdem werden Abfälle in Industrieunternehmen gepuffert, um eine wirtschaftliche Losgröße für den Transport zur Verwertungs- bzw. Beseitigungsanlage zu gewährleisten.

| Entsorgungslogistischer Teilprozeß | Prozeßziel |
|------------------------------------|---|
| Erfassen / Sammeln | Sortenänderung, Mengenänderung, Zeitänderung |
| Konfektionierung | Transporteigenschaft ändern, Mengenrelation ändern |
| Transport | Raumüberwindung |
| Umschlag | Mengenänderung, Raumüberwindung |
| Zwischenlagerung | Mengenänderung, Zeitänderung |

Bild 4.4: Entsorgungslogistische Teilprozesse und Prozessziele in Anlehnung an /Matschke-1996, Stölzle-1993/.

Beim Teilprozess *Behandeln* werden Abfälle einer Umwandlung bezüglich ihrer stofflichen und/oder energetischen Eigenschaft z. B. durch physikalische, chemische oder thermische Einwirkung unterzogen. Der Behandlungsprozess der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik beschränkt sich in der Regel auf die physikalische Behandlung z. B. die Verdichtung der Abfälle, wodurch eine Volumenveränderung der Abfallfraktion hervorgerufen wird.

4.3 Zeit- und kostenkritische Zusammenhänge im Produktions- und Entsorgungsprozess

Abfälle unterscheiden sich durch spezifische Eigenschaften von den Objekten der Versorgungslogistik. Diese spezifischen Eigenschaften haben Einfluss auf die physischen Transferaufgaben (Transport, Lagerung, Umschlag) und die gesamte Abfalllogistik. Im Allgemeinen besitzt Abfall als Objekt der Entsorgungslogistik einen vergleichsweise niedrigen Wert, so dass Abfälle logistisch als nicht zeitkritische Objekte zu handhaben sind. Damit werden andere Schwerpunkte bezüglich der Lagerung, des Transportes sowie des Umschlages gesetzt, als dies bei hochwertigen und zeitkritischen Gütern im Versorgungsbereich der Fall ist. Da die Kapitalbindungskosten bei Abfällen im Vergleich zu Zwischen- und Endprodukten gering sind, ist eine Reduzierung des Lagerbestandes aus ökonomischer Sicht kein primäres Ziel, wenn man von den Kosten der Lagerflächen absieht. Da Abfälle überwiegend als Schüttgüter vorliegen und meistens eine geringe Schüttdichte (Volumenabfälle) aufweisen, führt dies beim Transport von Abfällen zu schlechten Kapazitätsnutzungen. Dieses Problem tritt aber auch bei Abfällen mit Stückgutcharakter auf, da in der Regel fehlende Verpackungen bzw. Ladehilfsmittel für Abfälle eine unzureichende Nutzung der Laderaumkapazitäten beim Transport erlauben. Daraus resultiert bei Abfällen im Allgemeinen eine vergleichsweise höhere Transportkostenempfindlichkeit als bei Objekten der Versorgungslogistik /Kilimann-1997/.

Einerseits besteht als Teilbereich der Abfalllogistik die Aufgabe darin, entsprechende Abfallmengen zu puffern, um wirtschaftliche Transporteinheiten zu erlangen, die dann zu bestimmten Zeitpunkten einer Verwertung oder Beseitigung zuzuführen sind. Andererseits ist eines der primären Ziele bei der Sammlung der Abfälle, eine termingerechte Leerung der Abfallsammelbehälter, die für die Sammlung der Abfälle in den Produktionsbereichen bereitgestellt werden, zu garantieren. In der Praxis wird daher in der Regel zwischen Unternehmen und Entsorgungsdienstleister vertraglich festgehalten, dass zu jedem Zeitpunkt der Produktion eine Befüllung der Abfallsammelbehälter gewährleistet sein soll, d. h. der Entsorgungsdienstleister hat dafür zu sorgen, dass die Sammelbehälter sich nicht überfüllen. Diese logistische Zielgröße

ist ausschlaggebend für die zur Erfüllung der Ziele bereitgestellte Sammel-, Transport- und Lagerlogistik.

Weitere Einflüsse auf die Sammlung, den Transport und die Lagerung der Abfälle gehen von der niedrigen Schadensempfindlichkeit und dem relativ hohem Anteil von Schüttgütern aus. Somit werden beim Transport und bei der Lagerung von Abfällen vergleichsweise geringere Qualitätsanforderungen gestellt.

4.4 Bestimmung der logistischen Qualität von Entsorgungsstrukturen

Im Gegensatz zum Produktionsgut, das Bestandteil eines Leistungserstellungsprozesses ist und letztendlich einen Marktwert erzielt, besitzen Abfälle als Objekt der Entsorgungslogistik im Allgemeinen einen niedrigen bis negativen Wert (s. Kapitel 4.3). Somit bekommen insbesondere die Qualität und Güte der Entsorgungslogistik einen besonderen Stellenwert, wenn es um die Optimierung und Kostenreduzierung bei der Entsorgung von Abfällen geht.

4.4.1 Definition Qualität

Die Qualität ist nach DIN 55350 allgemein definiert als *„...die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen“*, wobei die Beschaffenheit die *„Gesamtheit der Merkmale und Merkmalswerte“* bildet und eine Einheit jeder beliebige *„materielle und immaterielle Gegenstand der Betrachtung“* sein kann /DIN-55350/.

Die Merkmale und Merkmalswerte, die in dieser Arbeit zur Beurteilung der logistischen Qualität herangezogen werden, werden in den folgenden zwei Kapiteln beschrieben. Dies sind zum einen die logistischen Zielgrößen, die sich aus den logistischen Erfolgsfaktoren eines Unternehmens ableiten lassen. Die Qualität der Logistik wird durch die Optimierung dieser Zielgrößen verbessert. Zum anderen sind dies die logistischen Kennzahlen eines Unternehmens, die über das Erreichen bzw. Nichterreichen der logistischen Zielgrößen Auskunft geben, indem die Zielerreichung durch Kennzahlen quantifiziert wird und damit beurteilt werden kann, wie „gut“ die entsprechende Zielgröße erreicht worden ist. Bei der Beurteilung der logistischen Qualität dürfen nicht nur einzelne Zielgrößen und Kennzahlen betrachtet werden, sondern vor allem deren Auswirkung auf andere Logistikprozesse.

4.4.2 Logistische Zielgrößen der Ver- und Entsorgung

Die wesentlichen Zielgrößen der Produktionslogistik lassen sich aus den logistischen Erfolgsfaktoren von Produktionsunternehmen ableiten. Zu den Erfolgsfaktoren zählen die

- Lieferfähigkeit (Fähigkeit der Zusage gewünschter Liefertermine),
- Liefertreue (Einhaltung zugesagter Liefertermine),
- Preis (Marktfähigkeit, Produktionskosten),
- Wirtschaftlichkeit (hohe Auslastung, niedrige Lager- und Umlaufbestände),
- logistische Prozessfähigkeit (marktgerechte Lieferzeiten),
- logistische Prozesssicherheit (niedrige und stabile Durchlaufzeiten, hohe Termintreue) /Nyhuis-1999/.

Nach Gudehus werden die Ziele der Logistik in monetäre und nicht monetäre Zielgrößen aufgeteilt /Gudehus-1999/. Dabei werden monetäre Zielgrößen (Betriebskosten, Investitionen, Leistungskosten und Kapitalrückflussdauer) durch nicht monetäre Zielgrößen wie z. B. der Leistungssteigerung und Qualitätssicherung beeinflusst und beschränkt. Eine Leistungssteigerung kann z. B. herbeigeführt werden, wenn die Zielgrößen Personal- und Transportmittelbedarf sowie Transport- und Durchlaufzeiten minimiert und die Auslastung von Personal und Transportleistung maximiert werden. Zu den Zielen der Qualitätssicherung zählen z. B. die Lieferbereitschaft, die Termintreue, die Zuverlässigkeit und die Schadensfreiheit.

In Bild 4.5 sind die logistischen Zielgrößen für die Referenzprozesse der Produktionslogistik abgebildet. Beim Produzieren gilt es, niedrige Durchlaufzeiten und eine hohe Termintreue zu realisieren, um damit einerseits den Kundenanforderungen zu entsprechen, andererseits aber auch die Planungssicherheit zu erhöhen. Für das Unternehmen sind vor allem eine hohe Auslastung der bereitgestellten Kapazitäten sowie möglichst niedrige Umlaufbestände von Bedeutung, um so die durch die Produktionslogistik beeinflussbaren Kosten zu minimieren. Es ist offensichtlich, dass sich einige der Teilziele gegenseitig unterstützen und andere widersprechen /Nyhuis-1999/.

Die Referenzprozesse Transportieren und Lagern/ Bereitstellen werden anschließend im Zusammenhang der logistischen Zielgrößen der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik erläutert, da diese Prozesse aufgrund ihres prinzipiell ähnlichen Systemverhaltens übertragen werden können /Kilimann-1997/.

| | | Referenzprozesse der Produktionslogistik | | |
|------------------------|-------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|
| | | Produzieren und Prüfen | Transportieren | Lagern/ Bereitstellen |
| Logistische Zielgrößen | Termin-einhaltung | hohe Termintreue | hohe Termintreue | niedriger Lieferverzug |
| | Durchlaufzeit | niedrige Durchlaufzeit | niedrige Transport-durchlaufzeiten | niedrige Lagerverweilzeit |
| | Leistung | hohe Auslastung | hohe Auslastung | - |
| | Bestand | niedriger Umlaufbestand | niedriger Transportbestand | niedriger Lagerbestand |
| | Kosten | geringe Kosten je Leistungseinheit | geringe Kosten je Transportvorgang | geringe Lagerhaltungskosten |

Bild 4.5: Logistische Zielgrößen für die Referenzprozesse der Produktionslogistik /Nyhuis-1999/.

Die Referenzprozesse der Entsorgung lassen sich aus den sogenannten STULB-Prozessen der Entsorgungslogistik ableiten (vgl. Kapitel 4.2.2). Bis auf das Behandeln der Abfälle, das im Bereich der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik eher sekundäre Anwendung findet, können vor allem die Teilprozesse Sammeln (entsorgungsspezifischer Teilprozess), Transportieren, Umschlagen und Lagern als Referenzprozesse der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik herangezogen werden. Dabei werden die Teilprozesse Umschlagen und Lagern entsprechend den Teilprozessen Lagern und Bereitstellen der Produktion zusammengefasst (vgl. Bild 4.6).

| | | Referenzprozesse der innerbetrieblichen Abfalllogistik | | |
|--|-------------------|--|---|---|
| | | Sammeln | Transportieren | Umschlagen und Lagern |
| Logistische Zielgrößen | Termin-einhaltung | hohe Termintreue p | hohe Termintreue s | niedriger Lieferverzug s |
| | Durchlaufzeit | niedrige Durchlaufzeit s | niedrige Transport-durchlaufzeiten s | niedrige Lagerverweilzeit s |
| | Leistung | hohe Auslastung p | hohe Auslastung p | - |
| | Bestand | niedriger Bestand an Sammelsystemen p | niedriger Bestand an Transportsystemen p | niedriger Bestand an Lagersystemen p |
| | Kosten | geringe Kosten je Sammelvorgang p | geringe Kosten je Transportvorgang p | geringe Lagerhaltungskosten p |
| p = primäre Zielgröße s = sekundäre Zielgröße | | | | |

Bild 4.6: Logistische Zielgrößen für die Referenzprozesse der innerbetrieblichen Abfalllogistik.

Die logistischen Teilziele wurden in Bild 4.6 zusätzlich nach primärer und sekundärer Zielgröße klassifiziert. Die Maximierung bzw. Minimierung von sekundären Zielgrößen

ßen hat im Allgemeinen keinen großen Einfluss auf den Entsorgungsprozess. Aufwendige Maßnahmen zur Optimierung dieser Zielgrößen führen daher im Allgemeinen zu höheren Kosten. Eine Optimierung der sekundären Zielgrößen ist erst im Anschluss an die Optimierung der primären Zielgrößen sinnvoll. Ein Beispiel ist die *Lagerverweilzeit*. In der Praxis werden bestimmte Abfallfraktionen unter Berücksichtigung der Lagerhaltungskosten z. T. bewusst länger gelagert, um zum einen transportgerechte Mengen zu erhalten (Minimierung des Transportaufwands) und um zum anderen den richtigen Zeitpunkt abzuwarten, so dass auf dem Entsorgungsmarkt entsprechende Verwertungs- und Beseitigungspreise erzielt werden können. Dagegen trägt die Maximierung bzw. Minimierung von primären Zielgrößen unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf andere primäre Zielgrößen im Allgemeinen zur Optimierung der Entsorgungsprozesse bei.

Im Gegensatz zur Zielgröße *Bestand* der Referenzprozesse der Produktionslogistik, bei der mit *Bestand* das zu befördernde Produktionsgut bezeichnet wird, sind im Folgenden mit der Zielgröße *Bestand* für die Referenzprozesse der innerbetrieblichen Abfalllogistik die Sammel-, Transport- und Lagersysteme gemeint und nicht die zu befördernden Abfälle.

Beim Sammeln gilt es, niedrige *Durchlaufzeiten* bei hoher Auslastung der Sammelkapazitäten zu realisieren. Gleichzeitig soll bei niedrigem *Sammelbestand* (Anzahl der eingesetzten Sammelfahrzeuge und Sammelsysteme) eine hohe *Termin-treue*, d. h. rechtzeitige Entleerung der Sammelbehälter an den Abfallanfallstellen, erzielt werden. Bei Berücksichtigung dieser Teilziele können die *Kosten* je Sammelvorgang reduziert werden.

Unter dem Aspekt geringer *Transportkosten* wird angestrebt, die Anzahl der Transportmittel so weit wie möglich zu reduzieren und so deren *Auslastung* zu erhöhen. Andererseits müssen temporäre Transportengpässe vermieden werden, da diese einen Anstieg der *Transportdurchlaufzeit* sowie eine Reduzierung der *Termin-treue* bewirken.

Im Gegensatz zur Produktionslogistik steht als Zielgröße des Referenzprozesses *Umschlagen* und *Lagern* der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik vor allem die Minimierung der *Lagerhaltungskosten* im Vordergrund. Da, wie bereits in Kapitel 4.3 geschildert, die Kapitalbindungskosten bei Abfällen gering sind, ist eine Reduzierung der gelagerten Abfallmengen und der *Lagerverweilzeit* der Abfälle aus ökonomischer Sicht kein primäres Ziel.

Sowohl bei der Ver- als auch bei der Entsorgungslogistik treten Zielkonflikte auf, die das Bestreben, die logistischen Erfolgsfaktoren gezielt zu stärken, erschweren (Die Steigerung der *Termineinhaltung* bei der Sammlung der Abfälle kann z. B. durch einen höheren *Sammelbestand* erreicht werden, was unweigerlich zu einem Zielkon-

flikt führt.). Es existiert demnach prinzipiell nicht nur ein Ziel, dessen Wert es zu maximieren oder zu minimieren gilt, sondern es müssen immer die Auswirkungen von Maßnahmen auf alle Teilziele gleichzeitig berücksichtigt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Teilziele in ihrer Gewichtung stark unterscheiden können.

Die logistischen Zielgrößen sind von Einflussgrößen abhängig. Die logistische Zielgröße lässt sich somit als Funktion einer Einflussgröße (unabhängige Variable) darstellen. Bild 4.7 zeigt die verschiedenen Kennlinien für die Referenzprozesse der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik als Prinzipskizze.

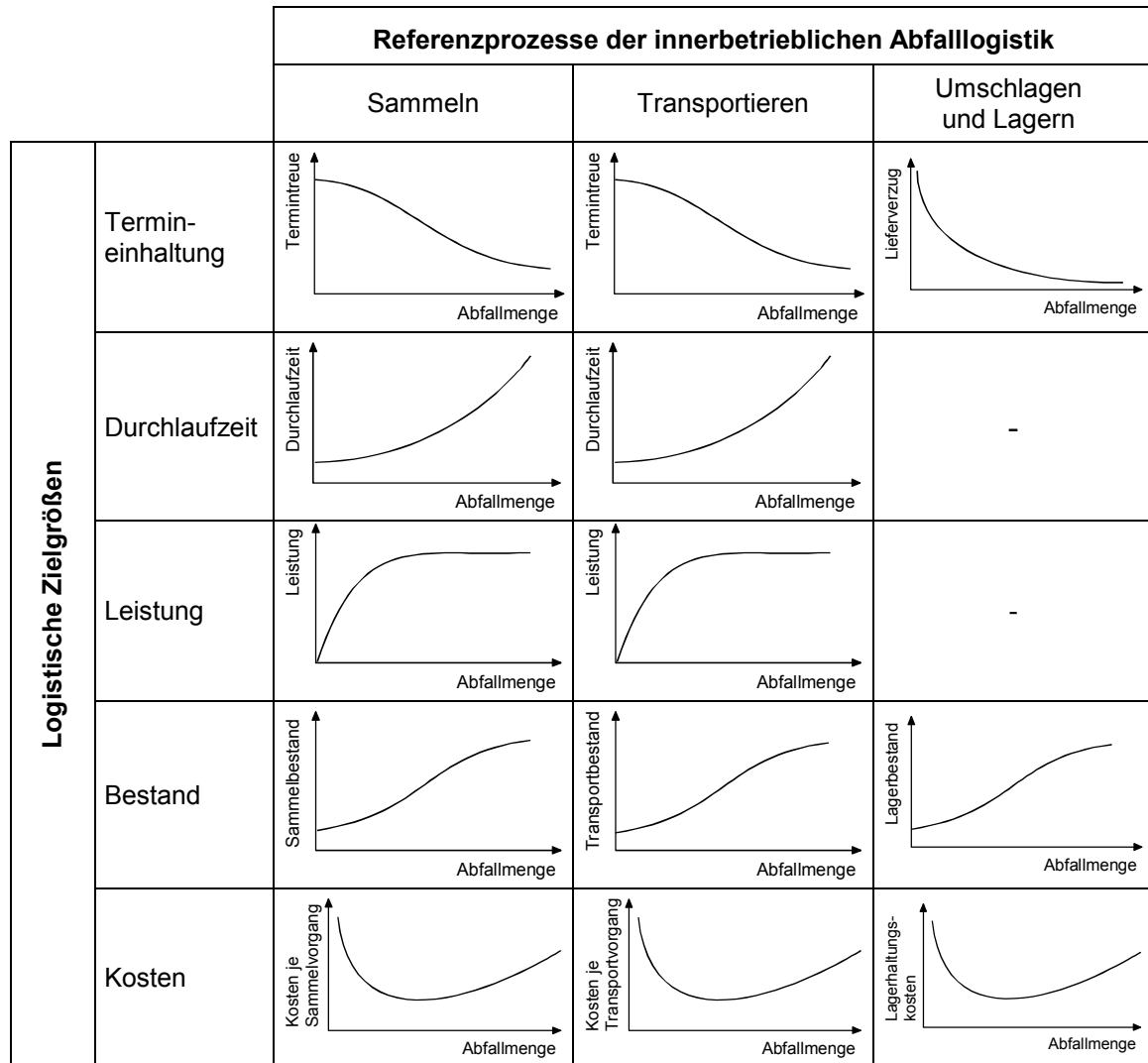


Bild 4.7: Logistische Kennlinien für die Referenzprozesse der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik in Anlehnung an /Nyhuis-1999/ - Prinzipskizzen.

Die Zielgrößen sind dabei in Abhängigkeit der zu handhabenden Abfallmenge aufgetragen, die hier als Einflussgröße gewählt wurde. Prinzipiell können auch die Durchlaufzeit, die Leistung und der Bestand als Einflussgrößen herangezogen werden, die sowohl als Einfluss- als auch Zielgröße angesehen werden können. Dagegen sind die Kosten und die Termineinhaltung immer Ergebnis eines Prozesses und somit nur mittelbar beeinflussbar und daher als Einflussgröße ungeeignet.

Mit steigender Abfallmenge, die im Allgemeinen zu höheren *Durchlaufzeiten* beim Sammel- und Transportvorgang führt, sinkt die *Termintreue*, d. h. die rechtzeitige Entleerung der Sammelbehälter an den Abfallanfallstellen kann unter Umständen nicht mehr termingerecht durchgeführt werden. Die Leistungskennlinie der Sammel- und Transportvorgänge, die die *Auslastung* der bereitgestellten Sammel- und Transportkapazitäten charakterisiert, ist bei hohen Abfallmengen nahezu unabhängig von der Abfallmenge. Bei geringen Abfallmengen können jedoch *Leistungs- bzw. Auslastungseinbußen* auftreten, da nicht ausreichend Abfälle für die Minimallösung an Sammel- und Transportkapazitäten zur Verfügung stehen, und diese somit nicht ausgelastet werden können. Der *Bestand* an Sammel-, Transport und Lagersystemen nimmt mit der Abfallmenge zu. Bei geringen Abfallmengen steigen *die Sammel- und Transportkosten* aufgrund der hieraus resultierenden Leistungs- und Auslastungsverluste der Sammel- und Transportkapazitäten; größere Abfallmengen führen dagegen aufgrund höherer *Bestände* auch zu höheren *Bestandskosten*.

Entsprechend gilt für die auf die Abfallmenge bezogenen *Lagerhaltungskosten*, dass bei geringen Abfallmengen die Fixkosten an bereitgestellten Lagersystemen hohe spezifische *Lagerhaltungskosten* verursachen, die mit Zunahme der zwischengelagerten Abfallmenge aber sinken. Bei sehr großen Abfallmengen nehmen die *Lagerhaltungskosten* aufgrund höherer *Lagerbestände* (Anzahl an Sammelbehälter für die Lagerung der Abfälle, Lagerstellfläche, Anzahl Umschlagmittel, etc.) zu. Die sekundäre Zielgröße *Lieferverzug* nimmt mit zunehmender Abfallmenge, die für den Abtransport bereitsteht, ab. Die sekundäre Zielgröße *Lagerverweilzeit* ist aufgrund der nicht zeitkritischen Eigenschaft des Abfalls im Allgemeinen unabhängig von der jeweiligen Abfallmenge und richtet sich z. T. nach den (regionalen) Preisen der Verwertungs- und Beseitigungswege im Entsorgungsmarkt.

4.4.3 Kennzahlen als Indikatoren der logistischen Qualität

Kennzahlen helfen, Aufschluss über die innerbetrieblichen Abläufe zu gewinnen, und unterstützen darüber hinaus auch die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit des Unternehmens mit der anderer Unternehmen zu vergleichen. In diesem Zusammenhang können Kennzahlen hilfreich eingesetzt werden, da sich mit ihnen Betriebssituationen quantifiziert erfassen lassen.

4.4.3.1 Logistische Kennzahlen

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Logistik hat sich in den letzten Jahren ein Referenz-System entwickelt, das auf der Messung der Leistung in den drei Koordinaten Kosten, Qualität und Zeit beruht. Um die Leistungsfähigkeit eines Unterneh-

mens zu verbessern, ist eine bewusste Auseinandersetzung mit dem Referenz-System erforderlich /Bölzing-1999/. Die Ermittlung und Pflege von Logistikkennzahlen aus den Bereichen Kosten, Qualität und Zeit helfen dabei, die Logistikeffizienz zu quantifizieren und damit messbar und vergleichbar zu machen. Nach VDI 4400 sind Kennzahlen dazu geeignet, die Effizienz der Produktionslogistik branchenunabhängig zu messen. Neben dem Einsatz der Kennzahlen im Rahmen von Benchmarkingstudien können diese auch für ein innerbetriebliches Controlling genutzt werden. In dem in Bild 4.8 dargestellten Kennzahlensystem werden die Kennzahlen einem Zielsystem zugeordnet. Dieses Zielsystem basiert u. a. auf den in Kapitel 4.4.2 vorgestellten Zielgrößen der Versorgung und ist aus drei Ebenen aufgebaut /VDI-4400/.

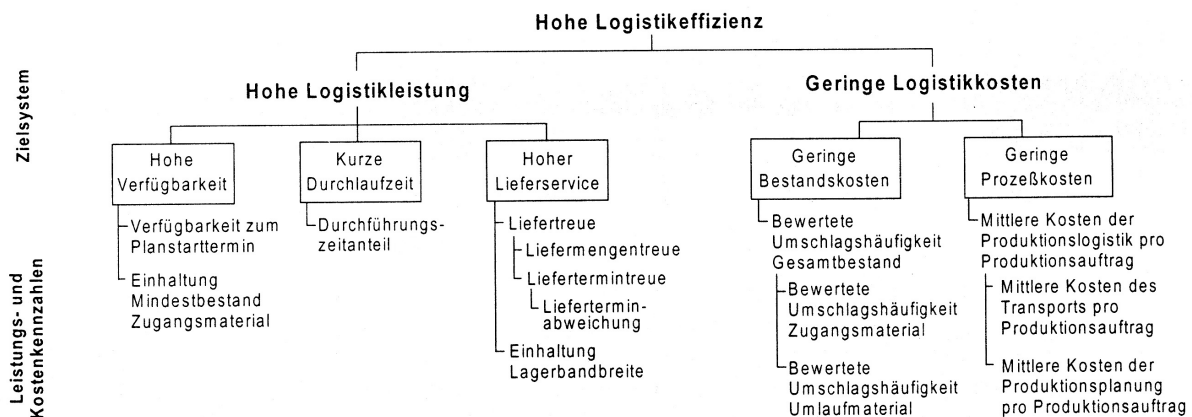


Bild 4.8: Kennzahlensystem „Produktion“ /VDI-4400/.

Die oberste Ebene bezeichnet das Ziel einer hohen Logistikeffizienz. Dieses Ziel wird durch eine möglichst hohe Logistikleistung und durch möglichst geringe Logistikkosten, die in der zweiten Ebene aufgeführt sind, erreicht. In der dritten Ebene stehen die logistischen Ziele hohe Verfügbarkeit, kurze Durchlaufzeit und hoher Lieferservice, sowie geringe Bestands- und Prozesskosten, deren Erreichen eine hohe Logistikleistung bzw. geringe Logistikkosten zur Folge haben. Die Kennzahlen dienen zur Quantifizierung der Logistikziele und werden den Zielen der dritten Ebene zugeordnet.

4.4.3.2 Spezifische Kennzahlen der innerbetrieblichen Entsorgung

Die entsorgungsspezifischen Kennzahlen können aus den logistischen Zielgrößen der Referenzprozesse der innerbetrieblichen Abfalllogistik (Bild 4.6) abgeleitet werden. Die gebildeten Kennzahlen sind auf die in dieser Arbeit entwickelten Simulation ausgerichtet und beziehen sich vor allem auf die primären nicht monetären Zielgrößen (Termineinhaltung, Durchlaufzeit, Leistung, Bestand). Die monetäre Zielgröße (Kosten) wird im wesentlichen von den nicht monetären Zielgrößen beeinflusst und begrenzt. Demnach ist der quantitative Wert dieser Zielgröße jeweils das Resultat

aus der Maximierung bzw. Minimierung der nicht monetären Zielgrößen /Gudehus-1999/. Zum Beispiel nehmen die spezifischen Betriebskosten eines Fördermittels mit der Zunahme der Auslastung des Fördermittels ab. Im Folgenden sind die 4 wichtigsten logistischen Kennzahlen¹² zur Quantifizierung der nicht monetären Zielgrößen der innerbetrieblichen Entsorgung aufgeführt, die vor allem als Ergebniskennzahlen in der Simulation Verwendung finden und deren Berechnung in Kapitel 6.3 - 6.6 vorgestellt wird:

- A. Wartezeiten bei der Auftragsabwicklung (Leerung der Sammelbehälter):
 - absolute Wartezeit der Sammelbehälter [s], mittlere Wartezeit [s],
- B. Zeitliche Auslastung von Kapazitäten der Simulationsfahrzeuge:
 - absolute Auslastung [s] bzw. [%], mittlere Auslastung [s] bzw. [%],
- C. Füllstand der Abfallsammelbehälter:
 - mittlerer Füllstand [%],
- D. Registrierung der Bearbeitung von Aufträgen zur Leerung der Behälter:
 - mittlerer Anteil nicht erledigter Aufträge [%].

In Bild 4.9 sind die o. g. Kennzahlen der innerbetrieblichen Entsorgung der logistischen Zielgröße zugeordnet und nach den Referenzprozessen der innerbetrieblichen Abfalllogistik strukturiert.

| | | Referenzprozesse der innerbetrieblichen Abfalllogistik | Kennzahl |
|---------------------------------------|------------------------------|--|------------------------------------|
| primäre logistische Zielgrößen | Sammeln | | |
| | 1.1 | Termineinhaltung, Termintreue | A, C, D |
| | 1.2 | Leistung, Auslastung | B, D |
| | 1.3 | Bestand an Sammelsystemen | A, C, D |
| | 1.4 | Kosten je Sammelvorgang | gering, wenn 1.1 – 1.3 optimal |
| | Transportieren | | |
| | 2.1 | Leistung, Auslastung | B, D |
| | 2.2 | Bestand an Transportsystemen | B |
| | 2.3 | Kosten je Transportvorgang | gering, wenn 2.1 u. 2.2 optimal |
| | Umschlagen und Lagern | | |
| | 3.1 | Bestand an Lagersystemen | C |
| | 3.2 | Lagerhaltungskosten | gering, wenn 3.1 optimal |

Bild 4.9: Zuordnung der Kennzahlen der innerbetrieblichen Entsorgung zur entsprechenden logistischen Zielgröße.

¹² Weitere Kennzahlen der innerbetrieblichen Entsorgung werden in Kapitel 7.1.2 im Zusammenhang der Ergebniskennzahlen nach Durchlauf eines Simulationsexperiments aufgeführt.

5 Einsatz von Simulationstechnik zur Abbildung der Abfalllogistik im Modell

Unter Simulation versteht man allgemein eine möglichst gute Nachbildung (Modell) eines Ausschnittes der realen Welt. Dieses Modell wird dann stellvertretend dazu benutzt, um Auskunft über das abgebildete System und seine Komponenten zu erhalten. Bei der Modellbildung werden einzelne aus der Problemstellung und der Zielsetzung abgeleitete Zusammenhänge gedanklich isoliert. Durch Abstraktion werden die spezifischen Systemkennzeichen so weit herausgearbeitet, dass ein auf das Wesentliche beschränktes Abbild des Originalsystems entsteht. Die mathematische Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen wird aus den elementaren Gesetzmäßigkeiten abgeleitet /Nyhuis-1999/.

Die Simulation ist nicht so sehr ein exaktes mathematisches Verfahren, sondern eher ein experimentelles Vorgehen. Sie kann mit Erfolg überall dort eingesetzt werden, wo exakte Verfahren zu aufwendig oder nicht möglich sind /Arnold-1998/.

Ein Vorteil der Simulation besteht darin, dass einmal erstellte Modelle leicht beliebig variiert werden können und dass - sehr entscheidend für die Abbildung der Realität - Beeinträchtigungen des Modells durch Zufalls-Elemente (Störungen) berücksichtigt werden können.

Ein System wird festgelegt durch

1. seine Ziele,
2. seine Art und Eigenschaften (technische Bauelemente, Maschinen, Werkstücke) und
3. die Beziehung zwischen den Elementen (Informationsaustausch, Steuerungsströme, Verkehrswege, technische Verbindungen).

Allgemein transformiert ein System Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen. Ergebnisse und Erkenntnisse jeder Simulation werden entscheidend durch das untersuchte Ersatzsystem, also das Modell beeinflusst.

Die Forderung nach Realitätsbezogenheit (z. B. Berücksichtigung von Störeinflüssen) führt schnell zu Modellen, für die keine analytischen (gerechnete oder rechenbare) Lösungsverfahren existieren, die ineffizient sind oder (wegen der nichteinbeziehenden Störungen) keine Aussagekraft haben. Hier bleibt dann nur noch die Simulation, um die gewünschte Sicherheit im voraus zu erhalten.

Simulation wird definiert als die Nachahmung von Systemabläufen. Wichtigstes Untersuchungsverfahren ist das Experiment. Das Experiment besteht darin, in einer Versuchsanordnung - dem Simulationsmodell - einen Impuls auszulösen, das Modell mit kontrollierten oder zufälligen Eingabedaten anzustoßen und die experimentellen

Ergebnisse zu beobachten. Die Simulation ermöglicht das Durchspielen strategischer Entscheidungen und die Beobachtung ihrer Auswirkungen im Hinblick auf die vorgegebenen Ziele unter finanziellen und servicebezogenen Gesichtspunkten /Noche-1992/.

5.1 Simulationskonzepte

Grundlage eines Simulationssystems bildet das Simulationskonzept. Bild 5.1 zeigt die vier grundsätzlichen Prinzipien.

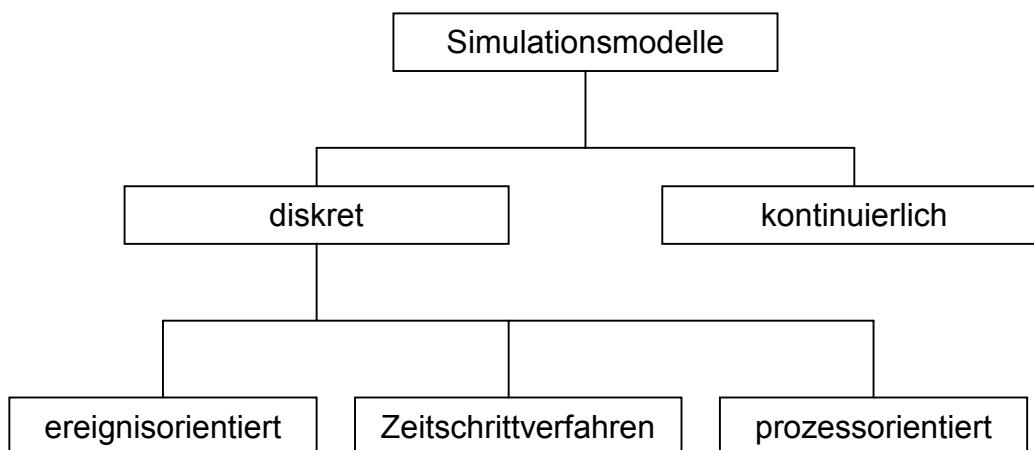


Bild 5.1: Gliederung von Simulationskonzepten in Anlehnung an /Schneider-1994/

Entsprechend der Ereignisabfolge der Prozesse wird zwischen zeitdiskreten und kontinuierlichen Konzepten bzw. Modellen unterschieden, wobei das letztere bei Prozessen mit kontinuierlichen Zustandsänderungen Einsatz findet. Kontinuierliche Simulationsmodelle sind dadurch gekennzeichnet, dass sowohl die Zeit als auch die Zustände stetig und somit in infinitesimal kleinen Inkrementen veränderlich sind. In diskreten Simulationsmodellen wird der Zustand eines dynamischen Systems durch zeitabhängige Zufallsvariablen beschrieben, die sich durch den Eintritt von diskreten Ereignissen an bestimmten, endlich vielen Zeitpunkten ändern /Weber-1999, Heinzl-1999/.

Zeitdiskrete Modelle sind wie folgt gegliedert:

Beim Zeitschritt-Verfahren wird der betrachtete Simulationszeitraum in konstante Zeitintervalle unterteilt. Eine Aktualisierung von Zustandsänderungen findet jeweils am Ende eines Intervalls statt. Ergebnis sind klassen- oder intervallbezogene Aussagen über stattgefundenere Ereignisse.

Beim prozessorientierten Ansatz werden geschlossene Ereignisfolgen, die die abzubildenden Prozesse charakterisieren, während der Simulation aktiviert und aufgezeichnet.

Das Ereigniskonzept orientiert sich an Zeitintervallen variabler Länge, die durch den Prozess generiert werden. Ergebnis sind Ereignislisten, die zu den jeweiligen Zeitpunkten notiert werden.

5.2 Regelkreis der Simulation

Der wichtigste Schritt beim Aufbau von Simulationsmodellen ist die eigentliche Modellbildung, d. h. das Umsetzen des zu betrachtenden Realsystems in eine Modellwelt. Simulationsdurchführung, Ergebnisinterpretation und Bewertung führen dann zu Konsequenzen, die auf das Realsystem zu übertragen und anzuwenden sind. Der Vorgang der Modellbildung durchläuft dabei eine Reihe von Abstraktionsschritten. Zunächst muss ein gedankliches Modell erzeugt werden. In dieser Phase wird über relevante und vernachlässigbare Systemelemente entschieden, wobei das Realsystem gedanklich abstrahiert wird. Während dieses Vorgangs werden aus dem Realsystem die zentralen Informationen herausgefiltert und dadurch in ihrer Komplexität reduziert /Westkämper-1999/. Der zweite Schritt ist die formale Umsetzung des Gedankenmodells in das Simulationsmodell. Anschließend werden statische und dynamische Kenngrößen der Systemelemente sowie Simulationsparameter festgelegt. Abschließend erfolgt eine Kontrolle des erstellten Modells bezüglich Funktionalität und Abbildungsgenauigkeit (vgl. Bild 5.2). Hierbei ist zu beachten, dass eine vollständige Übereinstimmung zwischen Realsystem und Modell aufgrund der idealisierten und abstrahierten Umsetzung nie erreicht werden kann.

Der Anwender muss dann eine Plausibilitätsprüfung der Simulationsergebnisse vornehmen, d. h. es muss sichergestellt werden, dass das erstellte Modell ein hinreichend genaues Abbild des Realsystems darstellt.

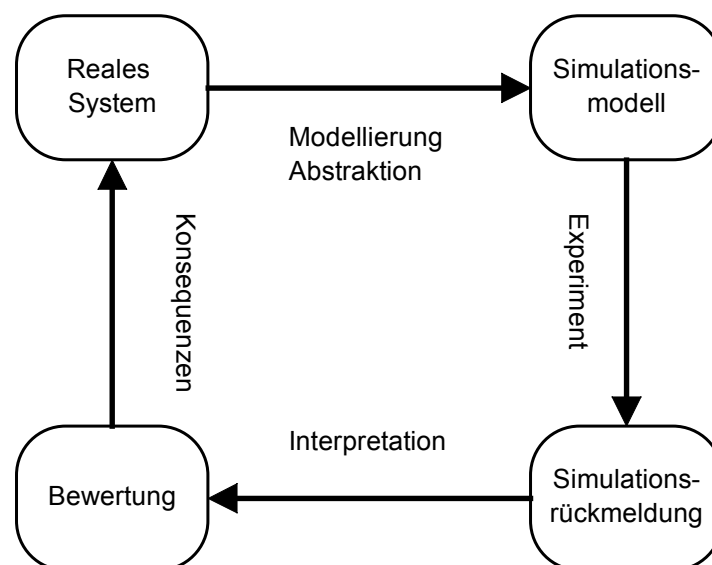


Bild 5.2: Regelkreis der Simulationsanwendung /Kuhn-1993/.

Bild 5.2 zeigt den Regelkreis der Simulationsanwendung ausgehend von der Umsetzung (Modellierung und Abstraktion) des Realsystems in ein Simulationsmodell über die Simulationsdurchführung, Bewertung und Interpretation der Simulationsergebnisse bis zur Umsetzung der Simulation in das reale System.

Dabei können und sollten die Konsequenzen aus der Simulation für das reale System zunächst noch einmal im Modell simuliert werden.

5.3 Allgemeine Zusammenhänge in der Simulation

Wie bereits erwähnt, durchläuft der Vorgang der Modellbildung eine Reihe von Abstraktionsschritten, um u. a. eine zu detaillierte und damit zu komplexe Abbildung der Realität zu vermeiden. Mit zunehmender Komplexität des Simulationsmodells steigt auch der Interpretationsaufwand. Dies bedeutet, dass im Falle der höchsten Detaillierung des Simulationsmodells eine Interpretation der Simulationsergebnisse nicht mehr gewährleistet werden kann /VDI-3633/.

Für die Modellbildung, also die Überführung der realen innerbetrieblichen Entsorgungsstrukturen in ein rechnerinternes Simulationsmodell, sind die relevanten Entsorgungsprozesse wichtig, die anschließend in der Simulation ihre Anwendung finden sollen. Mit relevanten Entsorgungsprozessen sind vor allem die Prozesse gemeint, die den höchsten logistischen Aufwand innerhalb der STULB-Prozesse (vgl. Kapitel 4.2.2) verursachen. Durch diesen Vorgang findet eine Abstraktion des realen Systems im Sinne einer Strukturierung und Eingrenzung der zu untersuchenden entsorgungslogistischen (Teil-)Prozesse statt.

In Kapitel 3.5.4 wurde beschrieben, welche relevanten Prozesse der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik aus der Datenerhebung in den betrachteten 36 Industrieunternehmen abgeleitet werden konnten. Diese dienen nun als Basis für die im Simulationsmodell zu generierenden Transportketten. Die allgemeine Vorgehensweise, wie aus der Ist-Aufnahme der realen Prozesse der innerbetrieblichen Abfalllogistik die Transportketten entwickelt und durch Abstraktion der realen Transportketten in der Simulation angepasst wurden, zeigt das Bild 5.3 in einer schematischen Übersicht.

Die modulare Zusammenstellung der Prozesszusammenhänge in Kapitel 3.5.4 ist vor allem für die Umsetzung der realen Prozesse in das Simulationsmodell von erheblichem Vorteil. Für die Modellbildung in der Simulation ergeben sich hierdurch folgende Vorteile:

- Die Modellierung des individuellen Entsorgungskonzeptes eines Unternehmens wird durch Kombination der Modellelemente in der Simulationsumgebung erheblich vereinfacht.

- Jedes Modellelement enthält bereits alle erforderlichen Parameter, die für den Simulationsablauf notwendig sind. Eine umständliche Zusammenstellung der Eingangsgrößen entfällt.
- Falsche oder unrealistische Kombinationen werden bei der Eingabe der Eingangsgrößen nicht zugelassen, so dass fehlerhafte Simulationsdurchläufe von vornherein vermieden werden.

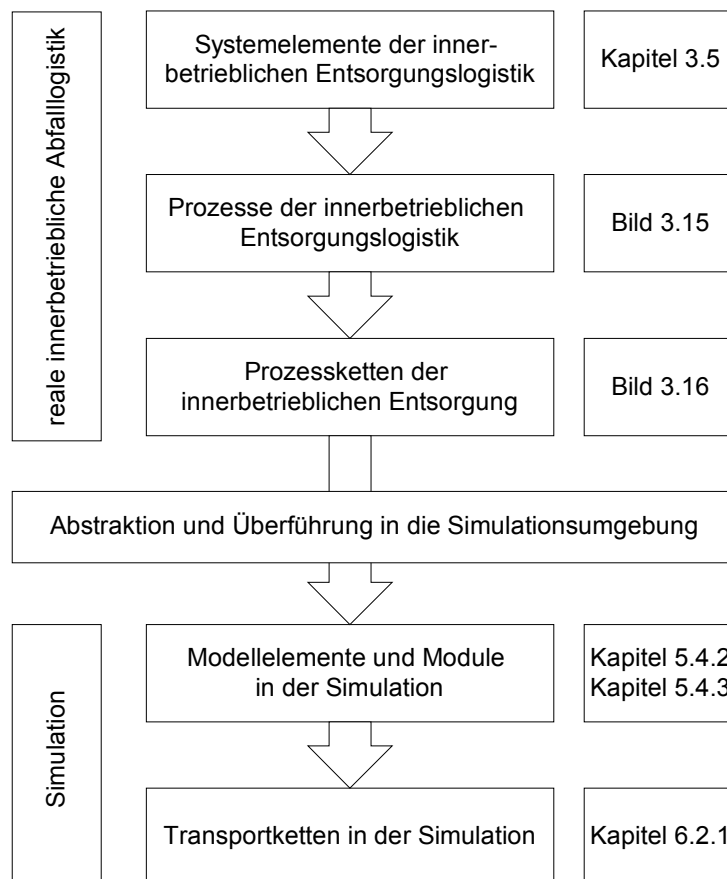


Bild 5.3: Vorgehensweise bei der Überführung der realen Prozesse in die Simulation.

Der Einsatz von Simulationen bietet sich insbesondere an, wenn

- das zeitdynamische Verhalten eines Systems analysiert werden soll,
- Experimente am Realsystem zur Gewinnung gewünschter Erkenntnisse nicht durchgeführt werden können oder
- exakte, analytische Berechnungsverfahren nicht eingesetzt werden können oder zu komplex werden / Kuhn-1998, Nyhuis-1999/.

Eine detaillierte Analyse des zeitdynamischen Verhaltens der innerbetrieblichen Abfalllogistik, wäre mit zusätzlichen Untersuchungen in den betrachteten Unternehmen verbunden gewesen, die den hierfür erforderlichen Aufwand nicht gerechtfertigt hät-

ten. Aus diesem Grund wurde das im folgenden Kapitel vorgestellte Simulationsprogramm entwickelt, das eine Untersuchung des zeitdynamischen Verhaltens der innerbetrieblichen Abfalllogistik eines Unternehmens im Modell mit einem vertretbaren Aufwand erlaubt.

Außerdem ermöglicht die Simulation dem Betrachter noch unbekannte Ausgangsgrößen zu ermitteln, die ein mathematisches Modell nicht oder nur mit höchster Komplexität abbilden kann. An dieser Stelle sei hier die Ermittlung der Anzahl getätigter Umleerungen von Sammelbehältern in einem bestimmten Zeitraum erwähnt. Die Simulation generiert die Umleerungen selbst, über die Eingangsgröße der Jahresabfallmengen, Anzahl der Behälter, Befüllungsgrad, Sammelstrategie der Fahrzeuge und einer (stochastischen) Verteilung des Abfallanfalls, die je nach Abfallart unterschiedlich verteilt ist. Eine Eingabe der Anzahl an Umleerungen pro Zeiteinheit (nach Abfallart, Behältersystem, etc.) vor der Simulation - eine Eingangsgröße die überwiegend unbekannt ist - entfällt.

5.4 Das Simulationsprogramm SimdiAI

Für die Beurteilung und Optimierung der logistischen Qualität von bestehenden oder aber auch neu geplanten innerbetrieblichen Entsorgungsstrukturen wurde das Simulationsprogramm **SimdiAI** (**Simulation der innerbetrieblichen Abfalllogistik**) entwickelt. Mit Hilfe dieses Simulationswerkzeugs können reale innerbetriebliche Entsorgungsprozesse oder noch in der Planung stehende Projekte vor der Umsetzung des Abfalllogistikkonzeptes modelliert und anschließend simuliert werden.

Bild 5.4 zeigt den schematischen Ablauf der Simulation in SimdiAI.

Die folgenden Kapitel beschreiben die Vorgehensweise bei der Erstellung der Simulation. Dabei wird zwischen dem eigentlichen *Simulationsprogramm* zur Durchführung der Simulation und dem *Simulationsmodell*, welches durch den Anwender erzeugt wird (Modellbildung), unterschieden. Bevor auf die Modellbildung und die einzelnen Modellelemente und Module des Simulationsprogramms eingegangen wird, sollen an dieser Stelle in einem Überblick die Aufbau- und Ablaufstrukturen des Simulationsprogramms aufgezeigt werden. Weiterhin werden die wesentlichen Zufallsprozesse bei der Verteilung der Abfallmengen in der Simulation aufgezeigt und der gesamte Simulationsablauf von der Eingabe der Eingangsgrößen (Parameter) bis zur Aufbereitung der Simulationsdaten in Tabellen- und Diagrammform vorgestellt. In einer abschließenden Auswertung werden die Simulationsergebnisse interpretiert und bewertet.

Obwohl in Kapitel 5.4 auf die Erstellung des Simulationsprogramms und die Durchführung eines Simulationsexperiments in einem Planspiel eingegangen wird, soll die-

ses Kapitel keine reine Programm- und Softwareokumentation beinhalten. Das Ziel ist vielmehr, anhand der Simulationsumgebung die Möglichkeiten der Simulation zu beschreiben, die Umsetzung der realen betrieblichen Abfalllogistik in der Simulation aufzuzeigen und die Randbedingungen und Restriktionen, die dieser Simulation zugrunde liegen, aufzuführen.

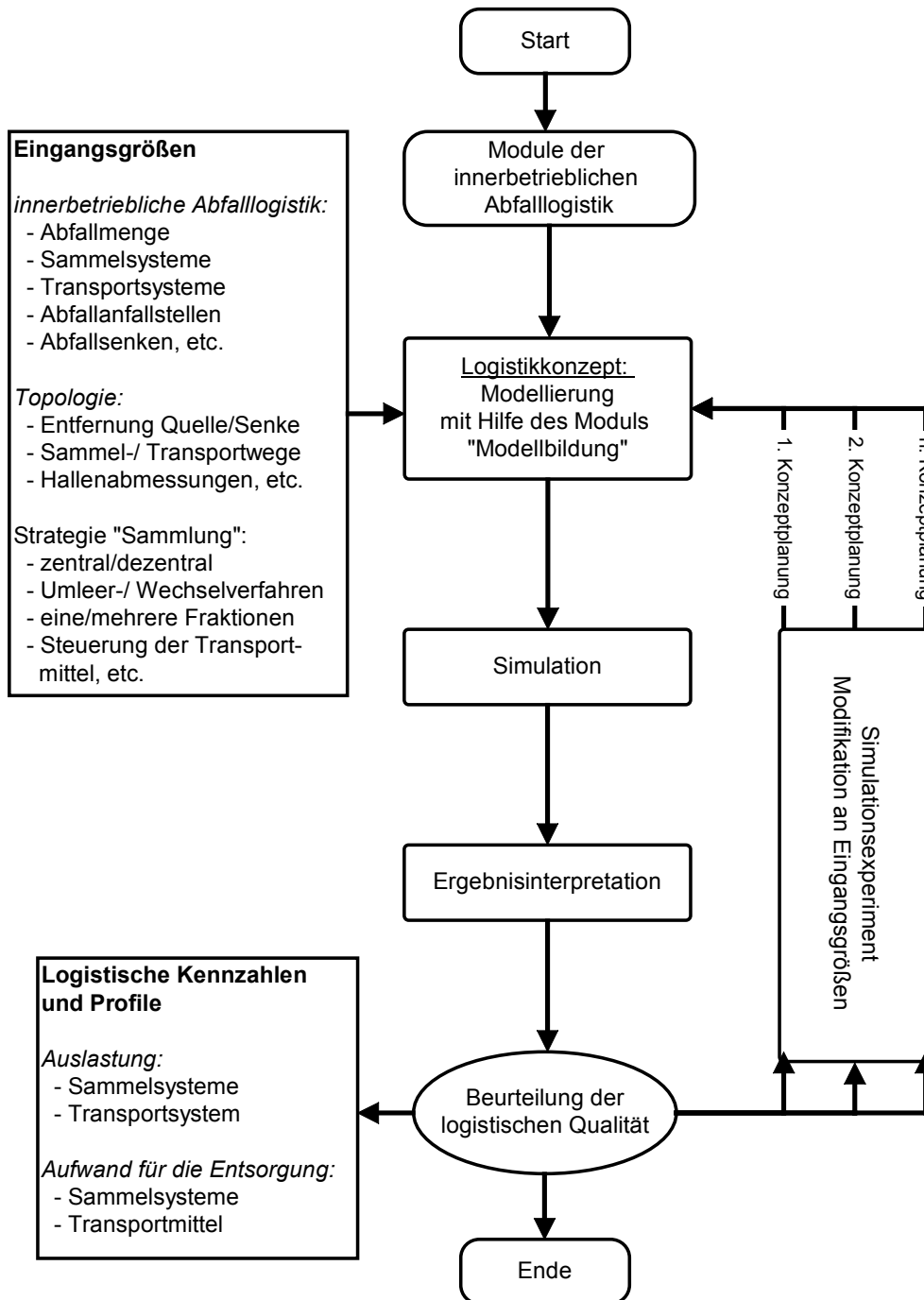


Bild. 5.4: Schematischer Ablauf eines Simulationsexperiments in SimdiAI.

5.4.1 Auswahl der Simulationssoftware

Für die Erstellung des Simulationsprogramms wurde die Simulationssoftware Simple++ 7.0 der Tecnomatix AESOP GmbH & Co. KG Stuttgart eingesetzt.

Simple++ ist eine Software, die speziell für die Modellierung von Materialflusssimulationen entwickelt wurde. Die Architektur ist vollständig objektorientiert, so dass die Vorteile von Hierarchie, Vererbung und Wiederverwendung von Objekten dem Anwender bei der Modellierung zur Verfügung stehen /Simple-1999/.

Simple++ enthält vordefinierte bewegliche und unbewegliche Materialflussbausteine, die die Grundbausteine eines Simulationsmodells bilden. Die beweglichen Materialflussbausteine (Fahrzeug, Förderhilfsmittel, Fördergut) repräsentieren die physischen oder logistischen Teile, die sich durch ein Modell bewegen. Diese Bausteine werden über aktive und passive unbewegliche Materialflussbausteine durch das Simulationsmodell transportiert. Aktive Bausteine (Einzelstation, Förderstrecke, Puffer, etc.) transportieren die beweglichen Materialflussbausteine automatisch weiter wohingegen bei passiven Materialflussbausteine (z. B. Lager) der Weitertransport definiert werden muss /Simple-1999/.

Die in Simple++ integrierte Informationsflusssprache „SimTalk“ erweitert die Möglichkeit der Modellierung. Reichen die vordefinierten Eigenschaften der einzelnen Materialflussbausteine nicht aus, um die Problemstellung im Materialfluss zu lösen, kann mit Hilfe von „SimTalk“ das Verhalten dieser Bausteine detailliert bzw. grundlegend verschieden formuliert werden. Damit kann unabhängig von den Eigenschaften der vordefinierten Materialflussbausteine eine hiervon lösgelöste Steuerung der Bausteine im Simulationsmodell erfolgen /Simple-1999/. Im Simulationsprogramm SimdiAl wird mit Hilfe von „SimTalk“ z. B. die automatische Generierung des Simulationsmodells, die Steuerung der Fahrzeuge in der Simulation (z. B. Sammel- und Transportmittel) und der gesamte Datenaustausch über die IDM-Schnittstelle (s. u.) zwischen Simple++ und z. B. MS-Excel gelöst.

Mit Hilfe der Dateischnittstelle ist der Austausch von Daten zu externen Programmen möglich. Simulationsdaten können so in Dateien gespeichert werden, die dann z. B. in Tabellenkalkulationsprogrammen weiterverwendet werden können. Auch der umgekehrte Weg ist möglich. Die integrierte IDM-Schnittstelle (ISA Dialog Manager) ermöglicht, benutzerdefinierte Dialoge aufzurufen, um dem Anwender die Bedienung der Simulation zu erleichtern /Simple-1999/.

5.4.2 Modellelemente

Bei der bausteinorientierten Simulation können die in Bild 5.5 aufgeführten typischen Modellelemente klassifiziert werden.

Die Modellierung des Simulationsmodells ist die Umsetzung des realen Systems in den Simulator. Bei der bausteinorientierten Modellbildung werden die Modellierungselemente (Bausteine) aus einer Bibliothek entnommen, angeordnet, miteinander verbunden und durch Zuweisung der Eingabeparameter spezifiziert. Simple++ bietet hierbei die Möglichkeit, eine beliebige Kombination von Bausteinen wiederum als ein übergeordnetes Modellierungselement zu definieren. Somit lassen sich eigene der jeweiligen Simulationsanwendung angepasste Bausteine entwickeln, die der Bausteinbibliothek zugeordnet werden können.

| Modellelemente | |
|----------------------------|---|
| Klasse im Simulator | Bezeichnung |
| Systemgrenze | Quellen, Senken |
| Zeitverbrauchende Elemente | Arbeitsstation, Einzelstation, Parallelstation |
| Bewegte Elemente | Fahrzeug, Förderhilfsmittel, Fördergut |
| Unbewegte Elemente | Lager, Puffer, Förderstrecke, Halle |
| Steuerelemente | Ablaufstrategien, Flusssteuerung, Störungen, Pausen, etc. |

Bild 5.5: Modellelemente in der bausteinorientierten Simulation in Anlehnung an /Kuprat-1991, Kuhn-1993/.

Für die Umsetzung der innerbetrieblichen Abfalllogistik in ein Simulationsmodell ist es notwendig, die Systemgrenzen der Simulation zu definieren. Vor- und nachgelagerte Prozesse, die nicht Teil des simulierten Systems sind, gilt es durch die Festlegung der Systemgrenzen auszuschließen. In der Realität beginnt der Materialfluss des Abfalls direkt am jeweiligen Arbeits- bzw. Produktionsplatz und wird dann in entsprechenden Abfallbehältern in unmittelbarer Nähe des jeweiligen Arbeits- bzw. Produktionsplatzes gesammelt. Das Ende des Materialflusses liegt im realen System, wenn ausschließlich die innerbetriebliche Abfalllogistik betrachtet wird, an der Werks- grenze, d. h. sobald die Abfälle das Werksgelände verlassen. In der Simulation wird die Befüllung der Abfallsammelbehälter am Arbeits- bzw. Produktionsplatz als Quelle und die zentrale Abfallsammelstelle (ZS) sowie die dezentrale Abfallsammelstelle (DS), sofern hier eine direkte Abfuhr der Abfälle ohne Zwischenlagerung an der dezentralen Senke stattfindet, als innerbetriebliche Senke definiert.

Zeitverbrauchende Elemente dienen dazu, einen Arbeitsvorgang in der Simulation zeitlich festzulegen. Arbeitsvorgänge, wie z. B. das Umleeren der Abfallsammelbehälter in das Sammelfahrzeug bzw. die Umleerung an der Senke, können mit Hilfe dieser Bausteine im Simulator abgebildet werden.

Das in der Simulation zur Sammlung und Transport der Abfälle eingesetzte Transportmittel gehört zur Klasse der bewegten Elemente. Bewegte Elemente können sich auf Förderstrecken bzw. wie in diesem Fall auf Fahrwegen (unbewegte Elemente) fortbewegen. Dem Beginn und dem Ende einer Fahr- bzw. Förderstrecke ist ein Ereignis zugeordnet. Zu jedem Ereignis kann ein Steuerelement aufgerufen werden, über das die weitere Ablaufsteuerung eines bewegten Elements gesteuert oder weitere Ereignisse ausgelöst werden können.

5.4.3 Aufbau des Simulationsprogramms SimdiAI

Das Simulationswerkzeug Simple++ bietet die Möglichkeit Modellelemente in einem Netzwerk so miteinander zu kombinieren, dass der Materialfluss eines Unternehmens abgebildet werden kann. Dazu werden die vordefinierten Bausteine in ein Netzwerk eingesetzt und mit anderen Bausteinen entsprechend des Materialflusses verbunden. Dieser Vorgang wird durch den Anwender des Simulationswerkzeugs durchgeführt und setzt voraus, dass dieser bei der Erstellung des Simulationsmodells die Eingangsgrößen in die entsprechenden Bausteine einfügt, die aus dem realen Materialflussschema eines Unternehmens gewonnen wurden.

Daraus ergeben sich jedoch folgende Nachteile:

- Der Aufwand für die Erstellung jedes weiteren Materialflussmodells zur Abbildung der Abfalllogistik anderer Unternehmen in der Simulation ist entsprechend hoch, da das Simulationsmodell vollständig neu durch den Anwender aufgebaut werden muss.
- Der Anwender benötigt Kenntnisse und Erfahrung im Umgang mit dem Simulationswerkzeug bei der Erstellung des Materialflussmodells in der Simulationsumgebung.

Um diesen Nachteilen entgegenzuwirken, wurde von Beginn an die Automatisierung des Modellbildungsprozesses im Simulationsprogramm berücksichtigt. Dem Anwender - z. B. Fabrikplaner - wird somit die Möglichkeit gegeben, sich auf die Planung der Abfalllogistik zu konzentrieren, ohne dass besondere Simulationskenntnisse bei der Anwendung der Simulation von Nöten sind. Die automatische Generierung des Simulationsmodells wird im folgenden Kapitel 5.4.4 „Die Modellbildung“ näher erläutert.

Der Aufbau des Simulationsprogramms SimdiAI kann in die drei Module *Modellbildung*, *Abfallgenerierung* und *Abfalllogistik* aufgeteilt werden (vgl. Bild 5.6).

Die Modellbildung stellt die Schnittstelle zum Anwender her. Über dieses Modul erzeugt der Anwender das zu untersuchende Simulationsmodell. Hier werden die realen Daten aus einem Unternehmen auf das rechnerinterne Simulationsmodell übertragen. Das Modul *Modellbildung* unterscheidet sich von den beiden anderen dahingehend, dass die Modellbildung abgeschlossen sein muss, bevor die Simulationszeit gestartet wird.

Nach Abschluss der Modellbildung durch den Anwender werden automatisch die Eingangsgrößen im Simulationsprogramm in Tabellen hinterlegt, auf die insbesondere die Module *Abfallgenerierung* und *Abfalllogistik* während der Simulationszeit zurückgreifen können.

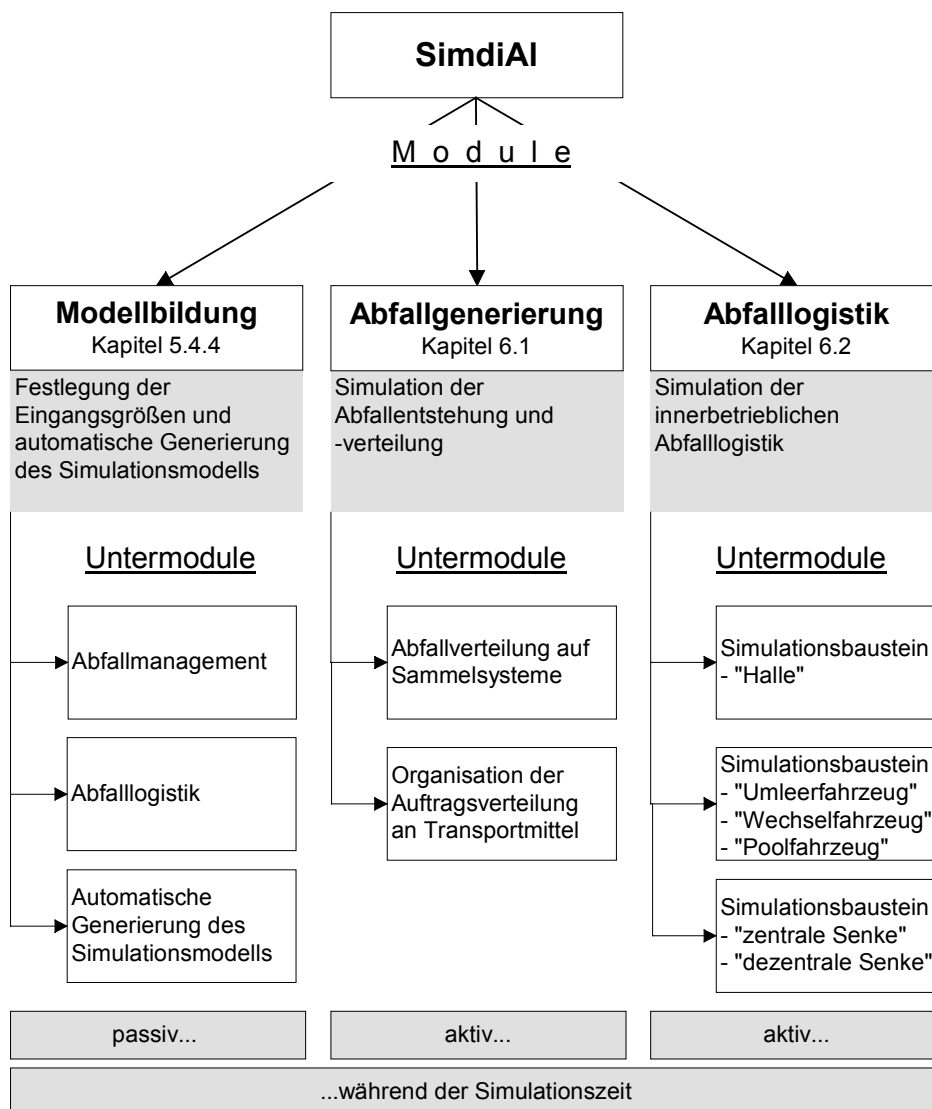


Bild 5.6: Schematischer Aufbau des Simulationsprogramms SimdiAI.

Zunächst soll die Vorgehensweise bei der Modellbildung durch den Anwender beschrieben werden. Hierzu gehören die Festlegung der Eingangsgrößen vor dem Start der Simulation. In diesem Zusammenhang wird zusätzlich auf die spezifischen Eigenschaften des Simulationsprogramms eingegangen. Gemäß dem chronologischen Vorgehen bei der Durchführung eines Simulationsexperiments erfolgt die Beschreibung der während der Simulationszeit aktiven Module *Abfallgenerierung* und *Abfalllogistik* im Anschluss an die Modellbildung.

Das Modul *Abfallgenerierung* sorgt für den zeitlich verteilten Abfallanfall während der Simulation und generiert Aufträge an die Transportmittel zur Sammlung und zum Transport der Abfälle, sobald die entsprechenden Abfallsammelbehälter geleert werden müssen (vgl. Kapitel 6.1).

Das Modul *Abfalllogistik* übernimmt die Entsorgung der im Modul *Abfallgenerierung* erzeugten Abfälle. In Kapitel 6.2 werden dazu die möglichen Transportketten, die in der Simulation für diese Aufgabe eingesetzt werden, vorgestellt. Diese Transportketten sind das Ergebnis der Abstraktion bzw. Reduktion der realen Abfalllogistik im Simulationsmodell.

5.4.4 Die Modellbildung

Vor dem Start der Simulation müssen die erforderlichen Parameter durch den Anwender festgelegt werden. Dabei wird der Anwender durch Eingabemasken, die die erforderlichen Parameter enthalten, unterstützt.

Das Modul *Modellbildung* kann weiter in die Untermodule zur Eingabe der Eingangsgrößen

- *Abfallmanagement*,
- *Abfalllogistik*

und in das Untermodul zur

- *automatischen Generierung des Simulationsmodells*

aufgeteilt werden (vgl. Bild 5.6).

Die automatische Generierung des Simulationsmodells kann erst im Anschluss an die Festlegung der Eingangsgrößen in den Modulen *Abfallmanagement* und *Abfalllogistik* ausgeführt werden.

Das Untermodul „Abfallmanagement“ der Modellbildung:

Die jährliche Abfallbilanz eines Unternehmens ist die Basis eines jeden entsorgungslogistischen Planungsinstruments. Aus diesem Grund wird auch hier bei der

Modellbildung mit der Festlegung der jährlichen Abfallmengen pro Abfallfraktion begonnen. Zusätzlich zur Abfallmenge wird die Dichte der Abfallfraktion angegeben. Dabei wird unterschieden, ob der Abfall unverdichtet (uv) oder verdichtet (v) gesammelt wird. Auch die Kombination ist möglich, wenn z. B. der Abfall in der Halle unverdichtet gesammelt und anschließend auf Werksebene in einem Presscontainer (dezentrale Sammelstelle) verdichtet wird.

Das Modul „Abfallmanagement“ bietet eine Schnittstelle zum Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel an, über die die Abfallbilanz in das Simulationsprogramm importiert werden kann. Grundsätzlich gibt es keine Einschränkung bezüglich der Anzahl zu simulierender Abfallfraktionen. Durch den Aufruf der Verknüpfung kann Excel direkt aus dem Modul in Simple++ gestartet werden. Dabei wird gleichzeitig eine „Vorlage-Datei“ geladen, in die die Abfallmengen und -dichten eingetragen bzw. aus einer anderen Excel-Tabelle kopiert werden können (vgl. Bild 5.7).

The screenshot shows a Microsoft Excel window titled 'Abfallbilanz.xls'. The active sheet contains a table with the following data:

| | A | B | C | D | E |
|----|--------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | Kürzel | Abfallart | Menge [t/a] | Dichte uv (t/m ³) | Dichte v (t/m ³) |
| 2 | AF1 | PPK (Papier/Pappe/Kartonage) | 1668 | 0,2 | 0,6 |
| 3 | AF2 | Folienabfälle | 277 | 0,05 | 0,2 |
| 4 | AF3 | Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall | 2845 | 0,3 | 0,6 |
| 5 | AF4 | Holzballagen unbehandelt | 797 | 0,15 | 0,5 |
| 6 | AF5 | Holzballagen behandelt | 184 | 0,15 | 0,5 |
| 7 | AF6 | Ölemulsionengemische | 344 | 0,7 | 0,7 |
| 8 | AF7 | Lackschlamm | 4 | | |
| 9 | AF8 | Styroporabfälle | | | |
| 10 | AF9 | Ölverschmutzte Betriebsmittel (ÖVB) | 1 | | |
| 11 | AF10 | FE-Schrott | 47 | | |
| 12 | AF11 | Aluminiumabfälle | 1 | | |
| 13 | AF12 | NE-metallhaltige Abfälle | | | |

A dialog box titled 'Hinweis' is overlaid on the table, containing the following instructions:

1. Abfalldaten in Excel-Tabelle eingeben
2. Datei speichern als ".txt" - Datei.
3. Excel-Tabelle schließen.
4. Anschließend mit 'OK' bestätigen.

The dialog box has an 'OK' button at the bottom.

Bild 5.7: Eingabe der Abfallmengen und -dichten über eine Excel-Verknüpfung.

Nach dem Import der Abfalldaten stehen diese für die Simulation in Simple++ zur Verfügung.

Der nächste Schritt ist die Festlegung der Verteilung der einzelnen Abfallmengen pro Abfallfraktion. Diese Festlegung erfolgt dialoggeführt mittels der IDM-Schnittstelle. Zunächst wird aus einer Auswahlmaske die Abfallfraktion ausgewählt (vgl. Bild 5.8), für die eine Verteilung vorgegeben werden soll.

Falls keine Verteilung für eine Abfallfraktion festgelegt wird, verwendet die Simulation eine vorgegebene Einstellung, d. h. eine konstante Verteilung der Abfallmenge auf die Monate (Abfallanfall an den Werktagen Montag bis Freitag und in der Fröhschicht).

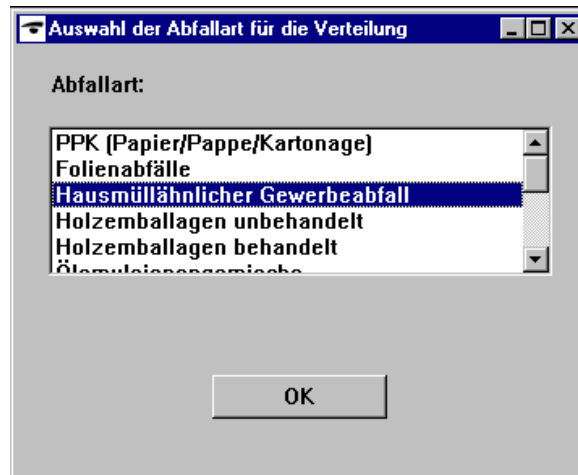


Bild 5.8: Auswahl der Abfallfraktion zur Festlegung der Abfallmengenverteilung.

Durch die Auswahl einer Abfallfraktion öffnet sich die Eingabemaske zur Festlegung der Abfallmengenverteilung (vgl. Bild 5.9). In Bild 5.10 ist die entsprechende Eingabemaske zur Abfallmengenverteilung im Detail dargestellt.

Bild 5.9: Eingabemaske zur Abfallmengenverteilung.

Die Verteilung der Abfallmenge einer Abfallfraktion kann auf drei unterschiedliche Methoden erfolgen. Dabei wird die gesamte im Jahr anfallende Abfallmenge einer Abfallfraktion auf die Tage verteilt, an denen der Abfall anfällt. Die Tage, an denen der Abfall einer Abfallfraktion anfällt, werden zuvor durch den Anwender definiert. In allen drei Fällen ergibt der kumulierte Wert der über die Simulationszeit verteilten Abfallmengen nach Ablauf der Simulation die gesamte Abfallmenge pro Jahr und Fraktion:

1. Verteilung der Abfallmenge durch Vorgabe von „Mengentendenzen“ in der Eingabemaske (kein „k. A.“, wenig „<>“, mittel „<><>“ und viel „<><><>“ Abfallanfall, vgl. Bild 5.9):

Die Verteilung der Jahresmenge erfolgt nach dem Prinzip des arithmetischen Mittels. Danach berechnet sich die monatliche Abfallmenge m_i wie folgt:

$$m_i = \frac{w_i \cdot M}{\sum_{j=1}^{12} w_j} \quad (5.1)$$

Es sind:

m_i = Abfallmenge im Monat i ($i = 1 \dots 12$)

w_i = Wertigkeitsfaktor des Abfallanfalls im Monat i ($i = 1 \dots 12$).

Der Wertigkeitsfaktor nimmt dabei die folgenden Werte an:

- Kein Abfallanfall: $w = 0$
- geringer Abfallanfall: $w = 1$
- mittlerer Abfallanfall: $w = 2$
- hoher Abfallanfall: $w = 3$

M = Gesamtjahresabfallmenge der betrachteten Abfallfraktion

$\sum_{j=1}^{12} w_j$ = Summe aller Wertigkeitsfaktoren

Die weitere Verteilung der Monatsmengen auf die Anfalltage bis einschließlich der Schichten erfolgt entsprechend der o. g. Verteilung nach dem Prinzip des arithmetischen Mittels.

Diese Art der Verteilung der Abfallmenge kann angewendet werden, wenn die gewählte Abfallfraktion sehr selten anfällt, z. B. einmal pro Woche, aber trotzdem in der Simulation berücksichtigt werden soll (Simulationstage ohne Abfallanfall erhalten dann den Wertigkeitsfaktor $w=0$), oder wenn die Annahme einer stochastischen Verteilung zu unsicher bzw. eine empirische Verteilung

nicht bekannt sind. Eine konstante Verteilung der Abfallmenge liegt vor, wenn der Wertigkeitsfaktor nicht über die Monate verändert wird.

2. Stochastische Verteilung:

Durch Annahme einer Verteilungsfunktion, z. B. der Normalverteilung und Festlegung ihrer Parameter (vgl. Kapitel 6.7 „Statistik und Verteilungen“).

3. Empirische Verteilung:

Sind z. B. anhand der Abfallbilanz aus dem letzten Jahr die täglichen Abfallmengen bekannt, so kann durch Notieren der Häufigkeiten, mit denen die täglichen Abfallmengen in festgelegten Bereichen (Klassen) auftreten eine Häufigkeitsverteilung der Abfallfraktion aufgestellt werden. Die Zuordnung der kumulierten relativen Häufigkeiten zu den Realisationsmöglichkeiten führt zur empirischen Verteilungsfunktion (vgl. auch Kapitel 6.7 „Statistik und Verteilungen“) /Schlittgen-1995/.

Die Festlegung der Abfallmengenverteilung nach der 1. Methode kann zusätzlich für jeden Monat detailliert werden. Dabei können „Mengtendenzen“ für jeden Simulationstag angegeben werden (vgl. Bild 5.10).

Abfallverteilung - Detail

VERTEILUNG DER ABFALLMENGEN - DETAIL

Monat:

| | Montag | Dienstag | Mittwoch | Donnerstag | Freitag | Samstag | Sonntag |
|----------|--------|----------|----------|------------|---------|-------------|-------------|
| Woche 1: | <>< | <><> | <>< | <>< | <><> | kein Anfall | kein Anfall |
| Woche 2: | <>< | <><> | <>< | <>< | <><> | kein Anfall | kein Anfall |
| Woche 3: | <>< | <><> | <>< | <>< | <><> | kein Anfall | kein Anfall |
| Woche 4: | <>< | <><> | <>< | <>< | <><> | kein Anfall | kein Anfall |

Schicht:

| | | | | | | | |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Früh: | <>< | <>< | <>< | <>< | <>< | kein Anfall | kein Anfall |
| Spät: | < | < | < | < | < | kein Anfall | kein Anfall |
| Nacht: | kein Anfall | kein Anfall | kein Anfall | kein Anfall | kein Anfall | kein Anfall | kein Anfall |

OK Abbrechen

Bild 5.10: Eingabemaske zur Abfallmengenverteilung im Detail.

Das Untermodul „Abfalllogistik“ der Modellbildung:

Nachdem im Untermodul *Abfallmanagement* die Abfallfraktionen (Anzahl Abfallarten und Menge pro Abfallart) sowie deren Verteilung definiert wurden, stehen diese nun für das Untermodul *Abfalllogistik* zur Verfügung.

Bild 5.11 zeigt das vereinfachte Layout eines Musterunternehmens, das als Vorlage für das Planspiel dient.

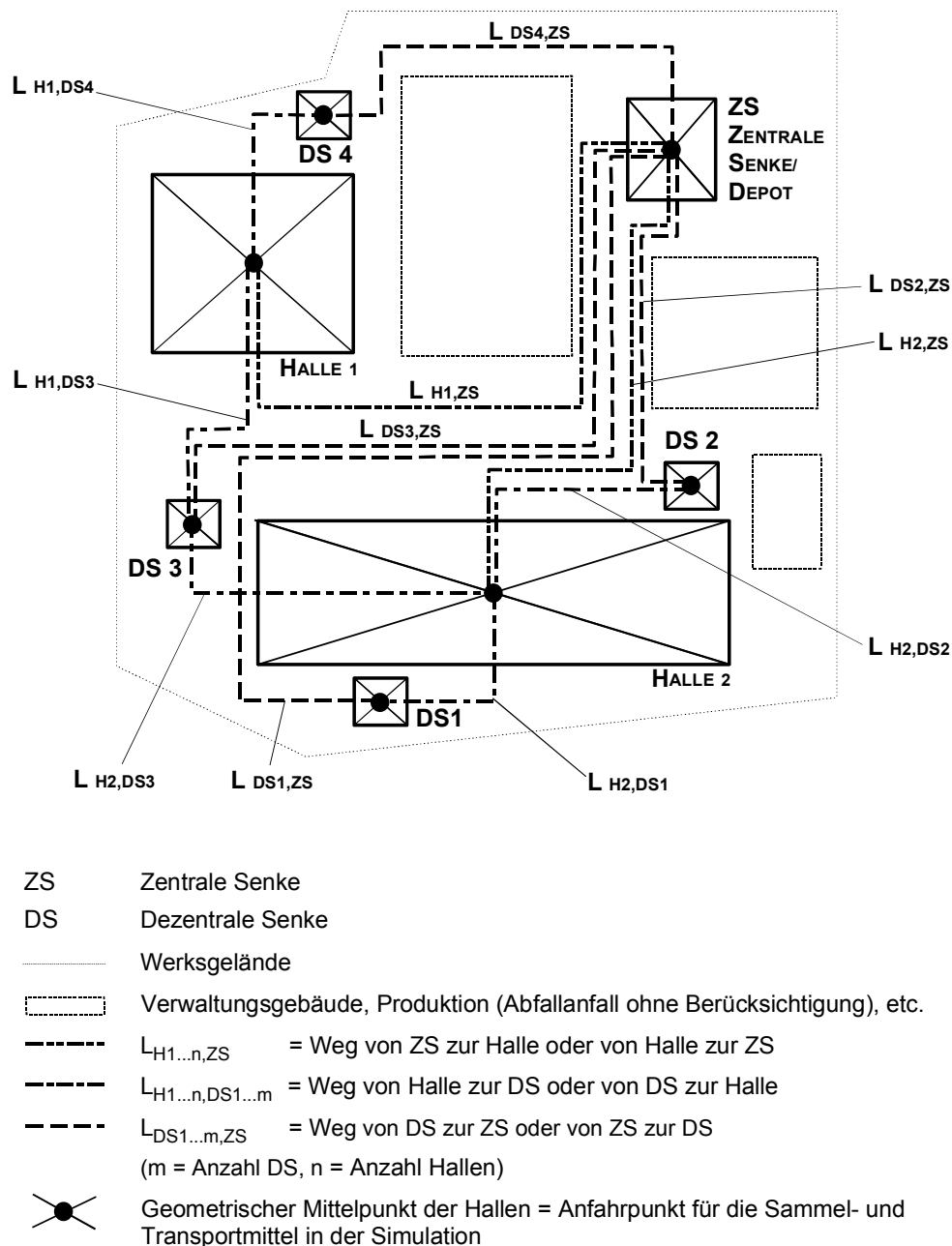


Bild 5.11: Vereinfachtes Layout eines Musterunternehmens im Planspiel.

Im Untermodul *Abfalllogistik* werden die Eingangsgrößen der Abfalllogistik und alle Quelle-Senke-Beziehungen festgelegt, also der Materialfluss des Abfalls von der Abfallquelle bis zur innerbetrieblichen Abfallsenke definiert, bevor dann die Simulati-

on gestartet werden kann. Um diesen Vorgang zu veranschaulichen, soll an einem einfachen Beispiel eines Musterunternehmens die Eingabe der Parameter der Abfalllogistik durchgeführt werden.

Im Layout des Musterunternehmens in Bild 5.11 sind zwei Produktionshallen dargestellt, für die die innerbetriebliche Entsorgung der Abfälle organisiert wird. Die zentrale Abfallsenke (ZS) ist gleichzeitig auch Depot für die sich im Einsatz befindenden Sammel- und Transportmittel, d. h. der Start- und Endpunkt zu Beginn und am Ende der Einsatzzeiten eines Transportmittels ist das Depot. Weiterhin sind die für die dezentrale Sammlung erforderlichen dezentralen Senken (DS) dargestellt. In Verbindung mit den in Bild 5.12 tabellarisch dargestellten Quelle-Senke-Beziehungen, in der die Abfallanfallstelle der Abfälle und deren Mengenverteilung auf die jeweilige Halle sowie die innerbetriebliche Abfallsenke für jede Abfallfraktion zugeordnet sind, stehen die Materialflüsse der Abfälle fest. Die Art der Sammlung, d. h. mit welchem Transportmittel und mit welchem Sammelverfahren die Abfälle gesammelt und transportiert werden, wird später durch die Konfiguration der Transportmittel bestimmt.

| Quelle - Senke - Beziehung im Planspiel | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|----------|-----|-----|
| Abfallfraktion: | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 | |
| <i>Quelle</i> - Abfallanfallstelle / Mengenverteilung auf die Hallen: | | | | | | |
| Halle 1 - Anteil [%] | 100 | | 100 | | 50 | |
| Halle 2 - Anteil [%] | | 100 | | 100 | | 50 |
| <i>Senke</i> - innerbetriebliche Abfallsenke (Systemgrenze): | | | | | | |
| zentrale Senke (ZS) | ZS1 | ZS2 | ZS3 | | | ZS4 |
| dezentrale Senke (DS) | | | | DS1, DS2 | DS3 | |
| ZS über Poolstelle | DS4 | | | | | |

Bild 5.12: Zuordnung der Quelle-Senke-Beziehung für die Abfallfraktionen im Planspiel.

Vor jeder Modellbildung sind die Daten eines zu betrachtenden Unternehmens in Form eines Layouts, in Anlehnung an das in Bild 5.11 vorgestellten Layouts des Musterunternehmens, sowie die Quelle-Senke-Beziehung der einzelnen Abfallfraktionen aufzubereiten. Unter Verwendung von CAD-Layouts oder maßstäblichen Zeichnungen des Unternehmens werden die Standorte der zentralen und dezentralen Senken eingetragen, anschließend die im Folgenden aufgeführten Wegstrecken ermittelt und in die entsprechenden Eingabemasken (vgl. Bild 5.14 und 5.15) eingegeben.

Bei dieser Zusammenstellung der Unternehmensdaten kommt der Ermittlung der Wegstrecken zur innerbetrieblichen Sammlung und zum Transport der Abfälle mittels der Transportmittel eine zentrale Bedeutung zu. Unterschieden werden dabei die

Wegstrecken, die vom jeweiligen Sammel- und Transportmittel auf Werksebene und auf Bereichs- bzw. Arbeitsplatzebene zurückgelegt werden /VDI-4413/. Die Bereichs- bzw. Arbeitsplatzebene ist durch die Abfallsammlung in der Halle gekennzeichnet. Die Fahrstrecken auf Bereichs- bzw. Arbeitsplatzebene befinden sich somit ausschließlich in den Hallen. Die Sammlung der Abfälle auf Arbeitsplatzebene erfolgt dabei von einem Arbeitsplatz zum nächsten Arbeitsplatz. Ein Bereich ist dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Arbeitsplätze zu einem „Bereich“ zusammengefasst sind, für den jeweils nur ein Sammelbehälter pro Fraktion bereitgestellt wird. Die Simulation berechnet diese Wege eigenständig anhand einer Wegematrix aus den Parametern der Hallenlänge und -breite sowie der Anzahl der in der Halle für die jeweilige Abfallfraktion bereitgestellten Sammelbehälter. Bei der Planung der Modellbildung werden diese Wegstrecken daher nicht benötigt und sollen daher erst später betrachtet werden. Die Berechnung dieser Sammel- und Transportwege auf Bereichs- bzw. Arbeitsplatzebene unterscheidet sich nach dem Sammelverfahren der Transportmittel und wird deshalb zusammen mit der Logistik und Sammelstrategie der Transportmittel in Kapitel 6.2.3 näher erläutert.

Im Gegensatz zu den Fahrwegen auf Bereichs- bzw. Arbeitsplatzebene müssen die Fahrwege auf Werksebene durch den Anwender anhand des Layouts bestimmt und bei der Modellbildung in der entsprechenden Form vorgegeben werden.

In der Simulation werden insgesamt drei verschiedene Wegstrecken für die Transporte auf der Werksebene unterschieden (vgl. Bild 5.11):

- Wegstrecke L1: Entfernung von der zentralen Senke ZS (Depot) zum geometrischen Mittelpunkt der jeweiligen Halle ($L_{H1\dots n, ZS}$; n = Anzahl Hallen)
- Wegstrecke L2: Entfernung vom geometrischen Mittelpunkt der Halle zur dezentralen Senke DS ($L_{H1\dots n, DS1\dots m}$; m = Anzahl dezentraler Senken, n = Anzahl Hallen)
- Wegstrecke L3: Entfernung von der dezentralen Senke DS zur zentralen Senke ZS (Depot) ($L_{DS1\dots m, ZS}$; m = Anzahl dezentraler Senken)

Nachdem die Daten des betrachteten Unternehmens in der o. g. Form aufbereitet worden sind, kann das Untermodul *Abfalllogistik* der Modellbildung gestartet werden. Die Eingabe der Daten erfolgt über dialoggeführte Eingabemasken, die in Visual Basic erstellt wurden und über die Dateischnittstelle von Simple++ aufgerufen werden.

Bild 5.13 zeigt die Eingabemaske zur Konfiguration der Abfalllogistik. Parameter, die bereits zur Konfiguration der Abfalllogistik eingegeben wurden, können jederzeit in den Kontrollfenstern der Hallenkonfiguration bzw. Transportmittelkonfiguration überprüft und gegebenenfalls wieder modifiziert werden.

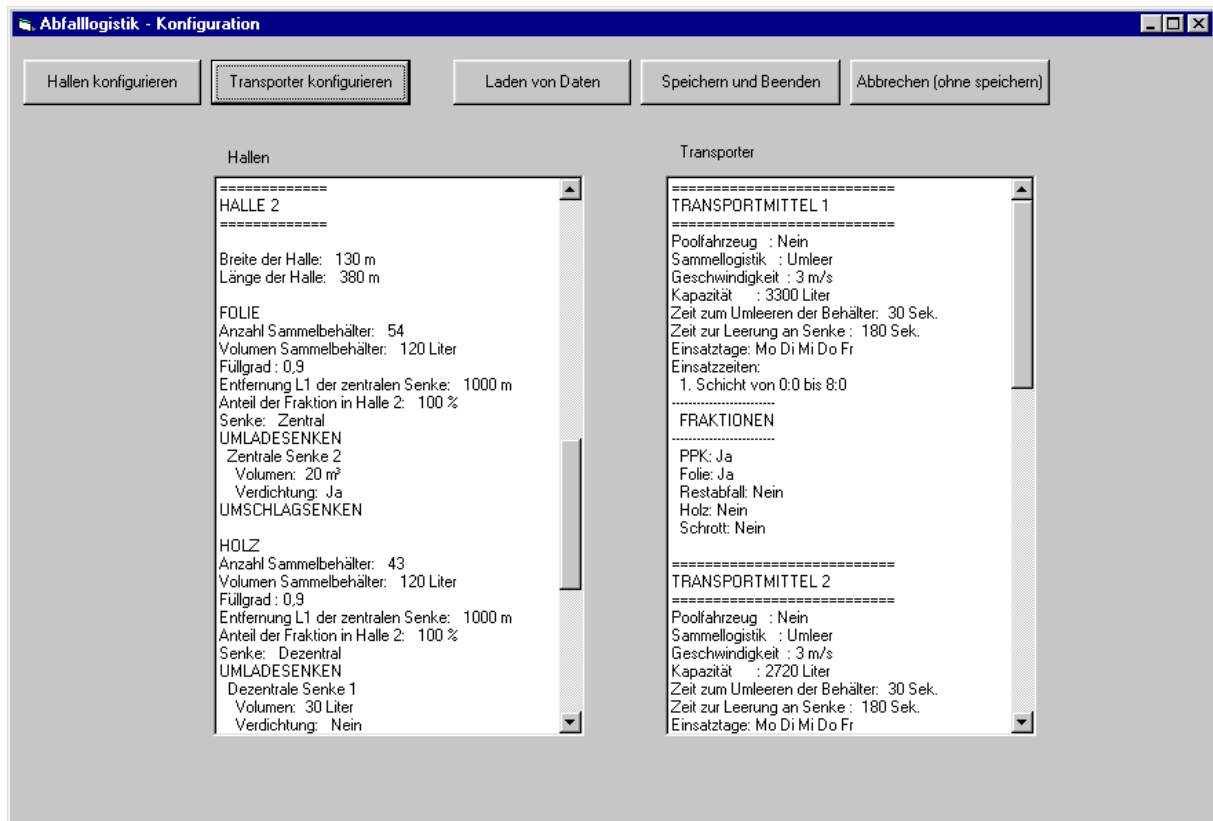


Bild 5.13: Eingabemaske zur Konfiguration der Abfalllogistik in SimdIAL.

Es stehen folgende Menüpunkte für die Eingabe der Planungsdaten zur Auswahl:

- Hallen konfigurieren:

In diesem Dialog werden die Produktionshallen und die hier anfallenden Abfälle einschließlich der für die Sammlung der Abfälle bereitgestellten Abfallsammelbehälter konfiguriert. Bevor der in Bild 5.14 dargestellte Dialog zur Konfiguration der Hallen erscheint, wird die Anzahl der zu konfigurierenden Hallen abgefragt. Anschließend muss eine prozentuale Verteilung der Abfallmengen aller Abfallfraktionen auf die einzelnen Hallen angegeben werden (die Abfallarten und -mengen wurden bereits im Untermodul *Abfallmanagement* festgelegt und werden für die Verteilung automatisch aufgelistet). Gemäß der aufgestellten Quelle-Senke-Beziehungen im Planspiel (vgl. Bild 5.12) fallen die Abfallfraktionen AF1 und AF3 ausschließlich in Halle 1 an, und werden deshalb mit 100% in Halle 1 eingetragen. Entsprechendes gilt für die Abfallfraktionen AF2 und AF4 in Halle 2. Die Abfallfraktion AF5 fällt zu 50% sowohl in Halle 1 als auch in Halle 2 an.

Bei der Teilkonfiguration „Halle“ werden u. a. die Anzahl der Hallen, die Anzahl der Abfallfraktionen pro Halle, die Anzahl und Größe der Abfallsammelbehälter in den Hallen, die Anzahl dezentraler Senken sowie die Entfernungen festgelegt, d. h. die

Wegstrecken, z. B. von der zentralen Senke zur Halle oder zur dezentralen Senke (vgl. Bild 5.14 und Bild 5.15).

Bild 5.14: Konfiguration der Abfallsammelsysteme pro Abfallfraktion und Halle.

Bild 5.15: Konfiguration der dezentralen Senken.

Bei der Konfiguration der dezentralen Senken werden in einem Pulldown-Menü alle dezentralen Senken aufgelistet, die bereits für die Sammlung der ausgewählten Abfallfraktion - in diesem Fall PPK (Papier, Pappe, Kartonage) - generiert wurden. Als Parameter bleiben noch die Wegstrecke von der Halle zur dezentralen Senke (L2) und die Wegstrecke von der dezentralen Senke zur zentralen Senke (L3). Letztere spielt vor allem eine Rolle, wenn die dezentrale Senke eine Poolstelle ist und somit eine zweistufige Sammlung erfolgt. Bei der Konfiguration der dezentralen Senke in Bild 5.15 wird für die Abfallfraktion PPK (AF1) die dezentrale Senke als Poolstelle definiert, indem für die Systemgrenze „nein“ und gleichzeitig die zentrale Senke ZS1 ausgewählt wird (vgl. auch Bild 5.12).

Dieses Beispiel zeigt, wie bei der Erstellung des Simulationsmodells und insbesondere der Konfiguration der Abfalllogistik der Anwender unterstützt wird, so dass von vornherein Fehler bei der Modellerstellung vermieden werden können.

Wird eine Abfallfraktion in mehr als einer dezentralen Senke gesammelt, so werden die zu entleerenden Abfallmengen auf die dezentralen Senken gleichverteilt. Im Planspiel wird die Abfallfraktion AF4 aus Halle 2 in den dezentralen Senken DS1 und DS2 gesammelt (vgl. auch Bild 5.12).

- Transportmittel konfigurieren:

In diesem Dialog werden die Sammel- und Transportmittel konfiguriert, die die Sammlung und den Transport der Abfälle in der Simulation übernehmen. Bevor mit der Konfiguration der Sammel- und Transportmittel begonnen werden kann, wird die Anzahl der zu konfigurierenden Sammel- und Transportmittel abgefragt. Anschließend steht der in Bild 5.16 dargestellte Dialog zur Konfiguration der Sammel- und Transportmittel zur Verfügung.

Durch die Festlegung der Sammellogistik „Wechsel“ oder „Umleer“, wird die Sammelstrategie der Simulationsfahrzeuge definiert. Wird das Feld „Poolfahrzeug“ aktiviert, so wird ein Simulationsfahrzeug des Typs „Poolfahrzeug“ konfiguriert, das ausschließlich für Sammel- und Transportaufgaben von einer dezentralen Senke zur zentralen Senke zuständig ist. Die Sammelstrategien werden ausführlich in Kapitel 6.2.2 erläutert. Ist das Feld „Poolfahrzeug“ nicht aktiviert, werden Simulationsfahrzeuge des Typs „Sammel- und Transportmittel“ für die Sammlung der Abfälle in der Halle konfiguriert (vgl. Bild 6.4 Fahrzeugtypen in der Simulation).

Bei der Teilkonfiguration „Transportmittel“ werden u. a. die Kapazität des Transportmittels beim „Umleerfahrzeug“ bzw. die Anzahl der mitgeführten Wechselbehälter beim „Wechselfahrzeug“, die Fahrgeschwindigkeit, die Umleer- bzw. Wechselzeiten der Abfallsammelbehälter in der Halle und an der Senke sowie die Einsatzzeiten des Transportmittels (vgl. Bild 5.17) festgelegt.

Mit der Zuweisung einer oder mehrerer Abfallfraktionen an das Transportmittel, ist die Transportkette für die jeweils zugewiesene Abfallfraktion definiert.

Transportmittel konfigurieren

Transportmittel 1

Transportmittel 1
Transportmittel 2
Transportmittel 3
Transportmittel 4

Transportmittel 1

Poolfahrzeug

Sammellogistik: Wechsel Umleer

Volumen pro Behälter: Liter

Geschwindigkeit: m/s

Anzahl Behälter:

Fraktionen

| | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> PPK | <input type="checkbox"/> Fraktion 6 | <input type="checkbox"/> Fraktion 11 | <input type="checkbox"/> Fraktion 16 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Folie | <input type="checkbox"/> Fraktion 7 | <input type="checkbox"/> Fraktion 12 | <input type="checkbox"/> Fraktion 17 |
| <input type="checkbox"/> Restabfall | <input type="checkbox"/> Fraktion 8 | <input type="checkbox"/> Fraktion 13 | <input type="checkbox"/> Fraktion 18 |
| <input type="checkbox"/> Holz | <input type="checkbox"/> Fraktion 9 | <input type="checkbox"/> Fraktion 14 | <input type="checkbox"/> Fraktion 19 |
| <input type="checkbox"/> Schrott | <input type="checkbox"/> Fraktion 10 | <input type="checkbox"/> Fraktion 15 | <input type="checkbox"/> Fraktion 20 |

Bild 5.16: Konfiguration der Transportmittel.

Einsatzzeiten

Einsatzzeiten

| | Stunde | Minute | | Stunde | Minute | | | |
|--|--------|--------------------------------|---|--------------------------------|--------|--------------------------------|---|--------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> 1. Schicht | von | <input type="text" value="0"/> | : | <input type="text" value="0"/> | bis | <input type="text" value="8"/> | : | <input type="text" value="0"/> |
| <input type="checkbox"/> 2. Schicht | von | <input type="text" value="0"/> | : | <input type="text" value="0"/> | bis | <input type="text" value="0"/> | : | <input type="text" value="0"/> |
| <input type="checkbox"/> 3. Schicht | von | <input type="text" value="0"/> | : | <input type="text" value="0"/> | bis | <input type="text" value="0"/> | : | <input type="text" value="0"/> |

Wochentage

| | | | | |
|--|--|--|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Montag | <input checked="" type="checkbox"/> Dienstag | <input checked="" type="checkbox"/> Mittwoch | <input checked="" type="checkbox"/> Donnerstag | <input checked="" type="checkbox"/> Freitag |
| <input type="checkbox"/> Samstag | <input type="checkbox"/> Sonntag | | | |

Bild 5.17: Konfiguration der Einsatzzeiten der Transportmittel.

- Laden von Daten

Einmal abgespeicherte Konfigurationen einer vollständigen Modellbildung der Abfalllogistik können mittels dieses Menüpunkts wieder eingeladen werden. Dies verringert den Aufwand bei der Eingabe der Parameter, wenn nach Abschluss eines Simulationsexperiments nur ein Parameter verändert werden soll und die restlichen Parameter beibehalten werden.

- Speichern und Beenden

Die aktuelle Konfiguration zur Modellbildung wird als txt-Datei gespeichert und steht nun einem Import für das Simulationsprogramm zur Verfügung. Der Import der Daten erfolgt automatisch durch Bestätigung des Hinweisfensters, das beim Start der Eingabemaske zur Konfiguration der Abfalllogistik aus dem Simulationsprogramm geöffnet wurde.

- Abrechnen (ohne Speichern)

Die aktuelle Konfiguration zur Modellbildung wird nicht gespeichert. Es erfolgt auch kein Import der Daten in das Simulationsprogramm.

Zusammenfassend sind in Bild 5.18 sämtliche Parameter aufgeführt, die nach Beendigung der Modellbildung für die Simulation in den entsprechenden Tabellen des Simulationsprogramms SimdiAI bereitstehen. In diesem Fall sind die Planungsdaten des Planspiels zugrundegelegt. Für die Ermittlung, Aufbereitung und Bereitstellung (Eingabe in das Simulationsprogramm) der erforderlichen Eingabeparameter im Planspiel kann mit einem Zeitaufwand von ca. 1 h gerechnet werden. Für komplexere, innerbetriebliche Entsorgungskonzepte erhöht sich der Aufwand vor allem bei der Ermittlung und Aufbereitung der Eingabeparameter entsprechend.

| SimdiAL - Eingabeparameter (Planspiel) | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| Abfallarten und -mengen | | | | | |
| Kürzel | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 |
| Bezeichnung | PPK | Folie | Restabfall | Holz | Fe-Schrott |
| Menge [t/a] | 500 | 150 | 600 | 300 | 3500 |
| Dichte (unverdichtet) [t/m ³] | 0,2 | 0,05 | 0,25 | 0,2 | 0,6 |
| Dichte (verdichtet) [t/m ³] | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | - |
| Hallen | | | | | |
| Kürzel | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
| Hallenlänge [m] | 180 | 380 | - | - | - |
| Hallenbreite [m] | 125 | 130 | - | - | - |
| Anzahl Fraktionen | 3 | 3 | - | - | - |
| Fraktion | AF1 | AF2 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS4 | - | - | - | - |
| Behälterzahl | 87 | 54 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 120 | 120 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF3 | AF4 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | - | DS1, DS2 | - | - | - |
| Behälterzahl | 75 | 43 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 120 | 120 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF5 | AF5 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS3 | - | - | - | - |
| Behälterzahl | 65 | 83 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 500 | 500 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 50 | 50 | - | - | - |
| *) Wenn keine dezentrale Senke angegeben ist, wird zentral gesammelt. | | | | | |
| Zentrale Senken | | | | | |
| Kürzel | ZS1 | ZS2 | ZS3 | ZS4 | ZS5 |
| Abfallfraktion: | AF1 | AF2 | AF3 | AF5 | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | UL | - |
| Verdichtung | ja | ja | ja | nein | - |
| Volumen [m ³] | 30 | 20 | 30 | 40 | - |
| über Poolstelle: | DS4 | - | - | - | - |
| Dezentrale Senken/ Poolstelle | | | | | |
| Kürzel | DS1 | DS2 | DS3 | DS4 | DS5 |
| Abfallfraktion: | AF4 | AF4 | AF5 | AF1 | - |
| aus Halle: | 2 | 2 | 1 | 1 | - |
| Weg_Halle_DS [m] | 90 | 100 | 130 | 85 | - |
| Weg_DS_ZS [m] | 720 | 240 | 610 | 920 | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | US | - |
| Systemgrenze (nein=Poolstelle): | ja | ja | ja | nein | - |
| Verdichtung | nein | ja | nein | - | - |
| Volumen [m ³] | 30 | 20 | 40 | - | - |
| Transportmittel | | | | | |
| Kürzel | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
| Umleeren oder Wechseln | u | u | w | w | - |
| Kapazität [l] | 3300 | 2720 | - | - | - |
| Anzahl mitgeführter Behälter | 3 | 4 | 1 | 5 | - |
| Geschwindigkeit [m/s] | 3 | 3 | 3,5 | 5 | - |
| Poolfahrzeug | nein | nein | nein | ja | - |
| Anzahl AF | 2 | 2 | 1 | 1 | - |
| AF1 | x | - | - | x | - |
| AF2 | x | - | - | - | - |
| AF3 | - | x | - | - | - |
| AF4 | - | x | - | - | - |
| AF5 | - | - | x | - | - |
| Umleer-/Wechselzeiten | | | | | |
| - in der Halle/ an Poolstelle [s]: | 30 | 30 | 20 | 60 | - |
| - an der Senke [s]: | 180 | 180 | 60 | 300 | - |
| Einsatzzeiten: | | | | | |
| Tage | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | - |
| Schicht | früh | früh | früh | früh | - |
| Zeit [h:min] | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | - |
| AF = Abfallfraktion, ZS = zentrale Senke, DS = dezentrale Senke | | | | | |

Bild 5.18: SimdiAl-Eingabeparameter für die Modellbildung im Planspiel.

Das Modul „Automatische Generierung des Simulationsmodells“

Im Anschluss an die Ausführung der beiden Untermodule *Abfallmanagement* und *Abfalllogistik* liegen alle erforderlichen Eingabeparameter für die Modellierung des Simulationsmodells vor. Die Daten sind nach erfolgreichem Import in entsprechenden Tabellen im Simulationsprogramm SimdiAI hinterlegt.

Das Modul *Automatische Generierung des Simulationsmodells* erzeugt zunächst alle erforderlichen Hallen- und Transportmittel-Bausteine im hierfür vorgesehenen Simulationslayout sowie die entsprechende Anzahl an Abfallquellen für die Abfallgenerierung.

Damit die Parameter in die Modellelemente geschrieben und die einzelnen Modellelemente während der Simulation angesprochen werden können, muss jeweils ein Pfad zu diesen Bausteinen definiert werden. Da sich die Modellelemente der Hallen- und Transportmittel-Bausteine eine Hierarchieebene tiefer als die Modellelemente im Simulationslayout befinden, werden die entsprechenden Pfade zu diesen Modellelementen erzeugt. Die Bausteine im Simulationslayout (Planungsdaten des Planspiels: Halle1, Halle2, Fahrzeug_u, Fahrzeug_u1, Fahrzeug_w, Fahrzeug_pw) werden über den Pfad „.Modelle.SimStart.Simulations_Layout“ angesprochen (vgl. Bild 5.19).

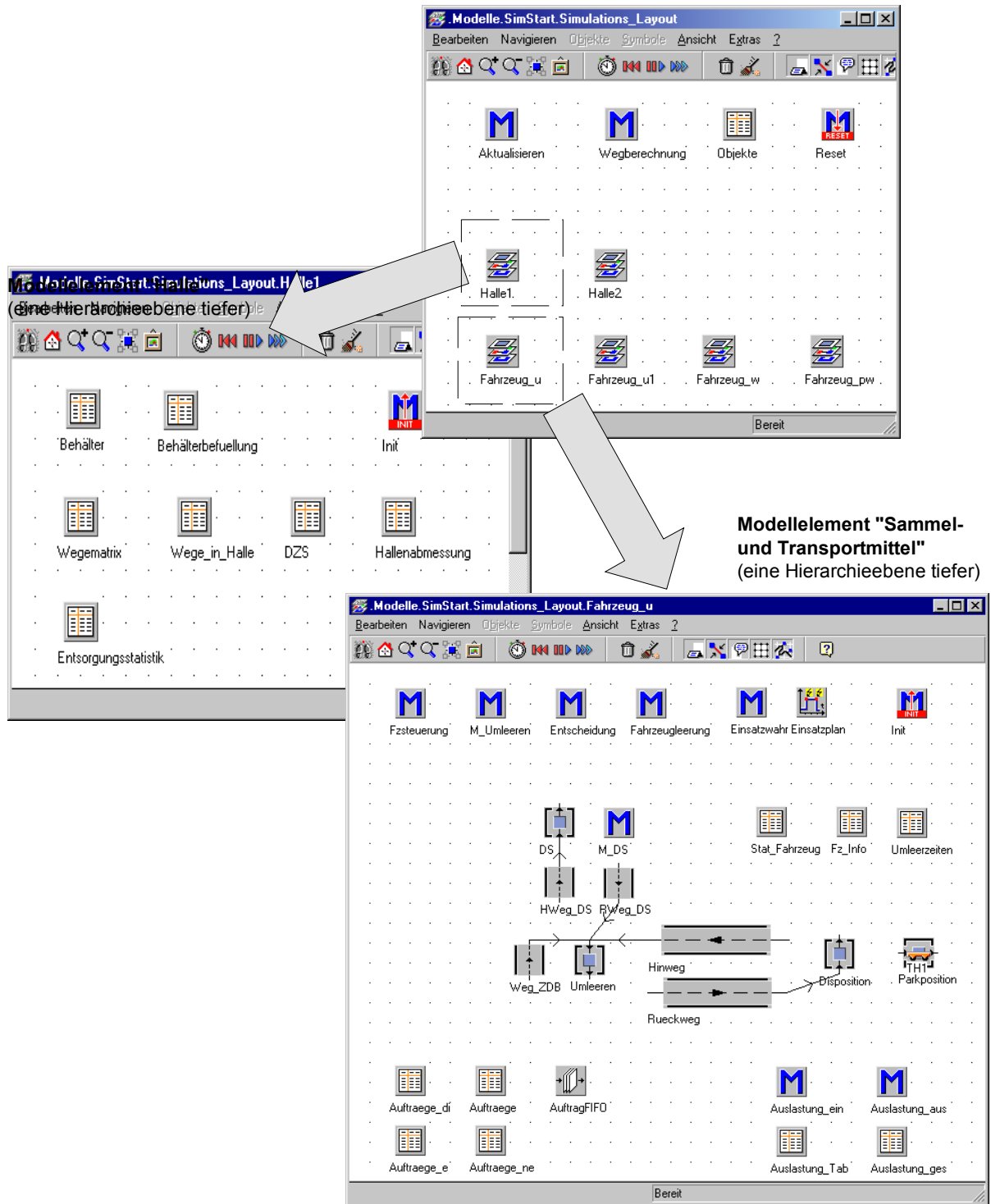
Die Bausteine der Halle1 werden beispielsweise über den Pfad „.Modelle.SimStart.Simulations_Layout.Halle1“ angesprochen, usw..

Anschließend können die Parameter der importierten Datensätze der Modellbildung aus den Tabellen gelesen und in die entsprechenden Modellelemente (Bausteine) des Simulationsmodells geschrieben werden.

Im Planspiel werden also 2 Hallen und 4 Fahrzeuge (2 Sammel- und Transportmittel mit der Sammelstrategie „Umleeren“, 1 Sammel- und Transportmittel mit der Sammelstrategie „Wechseln“ und 1 Poolfahrzeug im Wechselverfahren) im Simulationslayout generiert (vgl. die Eingangsparameter im Planspiel aus Bild 5.18). Für jede der 5 Abfallfraktion wird eine Quelle für die Abfallgenerierung erzeugt.

Danach werden die Eingabeparameter aus Bild 5.18, wie z. B. die Anzahl der Sammelbehälter in den Hallen der jeweiligen Abfallfraktion in die Tabelle „Behälter“, die Anzahl der dezentralen Senken in die Tabelle „DZS“, die Wegstrecken in und außerhalb der Hallen in die Tabellen „Wegematrix“ und „Wege_in_Hallen“ der Hallenbausteine, die jeweiligen Einsatzzeiten des Transportmittels in den Triggerbaustein „Einsatzplan“, die Umleer- bzw. Wechselzeiten der Sammelbehälter einer Abfallfraktion in die Tabelle „Umleerzeiten“ bzw. „Wechselzeiten“ des entsprechenden Transportmittelbausteins geschrieben (vgl. Bild 5.19).

Simulationslayout mit generierten Halle- und Simulationsfahrzeug-Bausteinen



Modellelement "Sammel- und Transportmittel"
(eine Hierarchieebene tiefer)

Bild 5.19: Generierung des Simulationsmodells im Planspiel.

6 Simulation der innerbetrieblichen Abfalllogistik

6.1 Die Abfallgenerierung in der Simulation

Jede Ereignisfolge mit stochastisch veränderlichen Zeitabständen τ oder unkorreliert schwankenden Mengen m ist ein zufallsabhängiger Prozess. Die zeitliche Folge der Ereignisse eines zufallsabhängigen Prozesses ist ein stochastischer Strom.

Wenn τ_P [Zeiteinheit] die mittlere Taktzeit der Ereignisse und m_P [Mengeneinheit] die durchschnittliche Menge pro Ereignis eines allgemeinen Prozesses P ist, dann ist die mittlere Taktrate des Prozesses

$$\lambda_\tau = 1 / \tau_P \text{ [1/Zeiteinheit]} \quad (6.1)$$

und die mittlerer Durchsatzrate

$$\lambda_P = 1 / m_P \cdot \lambda_\tau = m_P / \tau_P \text{ [Mengeneinheit/Zeiteinheit]}. \quad (6.2)$$

Abhängig von der Taktzeitverteilung und von der Menge pro Ereignis lassen sich folgende Stromarten, die in Bild 6.1 dargestellt sind, unterscheiden /Gudehus-1999/:

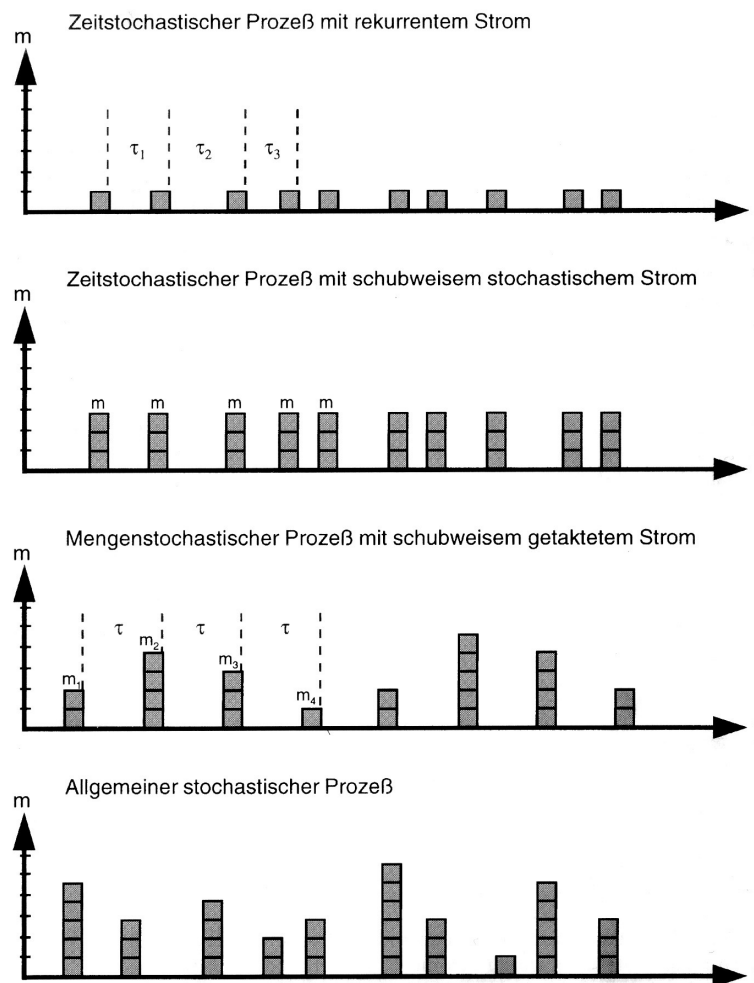


Bild 6.1: Zufallsabhängige Prozesse und stochastische Ströme /Gudehus-1999/.

1. *Rekurrenente Ströme*: Die Ereignisse treffen in zufallsabhängigen Zeitabständen einzeln und unkorreliert ein. Der Prozess ist zeitstochastisch und $m_p = 1$. Die Taktrate ist gleich der Durchsatzrate.
2. *Schubweise rekurrenente Ströme*: Die Ereignisse treffen in zufallsabhängigen Zeitabständen mit Schüben oder Pulks gleicher Größe ein. Der Prozess ist ebenfalls zeitstochastisch, jedoch mit einem konstanten Inhalt $m_p > 1$. Die Durchsatzrate schubweiser Ströme ist größer als die Taktrate.
3. *Schubweise getaktete Ströme*: Die Ereignisse treffen in gleichbleibenden Zeitabständen mit Schüben oder Pulks stochastisch schwankender Größe ein. Der Prozess ist mengenstochastisch.
4. *Schubweise stochastische Ströme*: Die Ereignisse treffen in zufallsabhängigen Zeitabständen mit Schüben oder Pulks stochastisch schwankender Größe ein. Es handelt sich um einen allgemeinen stochastischen Prozess.

Im Modul *Abfallgenerierung* wird die Abfallmengenverteilung wie folgt abgebildet (Untermodul *Abfallverteilung auf Sammelsysteme*, vgl. Bild 5.6):

Die Abfallmenge m_S einer Abfallfraktion, die pro Schicht anfällt, gehorcht dem mengenstochastischen Prozess mit schubweise getaktetem Strom (3) und wird im Modul *Modellbildung* festgelegt. Diese Abfallmenge, die zu gleichbleibenden Zeitabständen - nämlich in diesem Fall zu Schichtbeginn - anfällt (vorausgesetzt, dass in dieser Schicht Abfall anfällt), ist, je nachdem welche Verteilungsart gewählt wurde, entweder nach dem Prinzip des arithmetischen Mittels, einer stochastischen Verteilung oder einer empirischen Verteilung, auf die Anzahl der Schichten verteilt (vgl. Kapitel 5.4.4 Untermodul *Abfallmanagement der Modellbildung*).

Die Abbildung der Abfallmengenverteilung innerhalb der Schicht folgt nach dem allgemeinen stochastischen Prozess mit schubweise stochastischem Strom (4). Zu Beginn einer jeden Schicht wird die o. g. Abfallmenge m_S nach einem Verteilungsschlüssel, der im Modul *Modellbildung* (vgl. Kapitel 5.4.4 *Untermodul Abfalllogistik der Modellbildung*) festgelegt wird, prozentual auf die Hallen verteilt, insofern die Abfallfraktion in dieser Schicht anfällt und über mehrere Hallen verteilt wird. Die pro Halle verbleibende Abfallmenge einer Abfallfraktion AF wird dann durch die Anzahl der für diese Abfallfraktion zur Verfügung gestellten Sammelbehälter dividiert. Es bleibt die Abfallmenge

$$m_{SHB} = \frac{k_H}{100} \cdot \frac{m_S}{Z_{\text{Behälter}}} \quad (6.3)$$

Es sind:

m_{SHB} [t] Abfallmenge pro Schicht, pro Halle und

| | | |
|-----------------------|-----|---|
| | | pro Abfallsammelbehälter, |
| m_s | [t] | Abfallmenge pro Schicht, |
| k_H | [%] | Verteilungsschlüssel der betrachteten Halle zur Verteilung der Abfallfraktion auf mehrere Hallen (Abfallanfallstellen), |
| $Z_{\text{Behälter}}$ | [-] | Anzahl der für die Abfallfraktion zur Verfügung gestellten Abfallsammelbehälter in der betrachteten Halle. |

Anschließend wird die Anzahl der Befüllungen pro Abfallfraktion af und Halle h ermittelt. Ist das Volumen der entsprechenden Abfallmenge m_{SHB} kleiner oder gleich dem Volumen des zu befüllenden Sammelbehälters der Abfallfraktion multipliziert mit dessen Füllgrad, so entspricht die Anzahl der Befüllungen der Anzahl der Abfallsammelbehälter der Abfallfraktion af in der Halle h .

Ein Beispiel soll dies verdeutlichen:

In der Halle 1 stehen für die Sammlung der Abfallfraktion AF1 insgesamt 30 Sammelbehälter mit einem Sammelvolumen von 500 l zur Verfügung. Das Volumen der Abfallfraktion AF1, das pro Schicht, pro Halle und pro Abfallsammelbehälter anfällt, beträgt z. B. 137 l (entsprechendes Volumen der Abfallmenge m_{SHB}). Da dieses Volumen kleiner ist als das Volumen des zu befüllenden Sammelbehälters multipliziert mit dessen Füllgrad (z. B. $500 \text{ l} \times 0,9 = 450 \text{ l}$), werden also insgesamt 30 Befüllungen für diese Schicht erforderlich. Um eine Verteilung der Abfallmenge auf die Sammelbehälter zu realisieren, die der Praxis nahe kommt, wird in der Simulation die Abfallmenge nicht konstant auf die Sammelbehälter verteilt, d. h. es wird nicht jeder der 30 Behälter mit dem Abfallvolumen von 137 l befüllt. Stattdessen werden mit Hilfe des Zufallsgenerators von Simple++ entsprechend der Anzahl an Befüllungen insgesamt also 30 Zufallszahlen zwischen 1 und 30 (30 Sammelbehälter) gebildet. Eine mögliche Verteilung der Zufallszahlen ist in Bild 6.2 dargestellt.

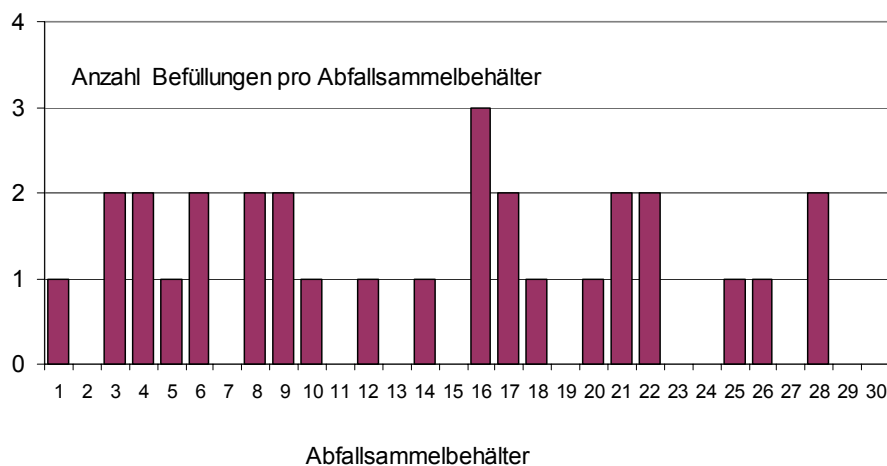


Bild 6.2: Anzahl Befüllungen pro Abfallsammelbehälter im o. g. Beispiel.

Der Abfallsammelbehälter 2 wird während dieser Schicht somit nicht befüllt, wohingegen der Abfallsammelbehälter 16 dreimal befüllt wird.

Ist das Volumen der entsprechenden Abfallmenge m_{SHB} größer als das Volumen des zu befüllenden Sammelbehälters der Abfallfraktion multipliziert mit dessen Füllgrad, so ergibt sich die Anzahl der Befüllungen aus dem Quotienten des gesamten Abfallvolumens einer Abfallfraktion pro Schicht und pro Halle und dem Behältervolumen eines Sammelbehälters multipliziert mit dessen Füllgrad. Ist der Rest der Division ungleich Null, wird eine Behälterbefüllung hinzugezählt, mit der das Restvolumen einem Behälter zugeteilt wird. Die Verteilung der Befüllungen erfolgt analog zum oben aufgeführten Beispiel.

In der Simulation besitzt somit jeder Abfallsammelbehälter ein Abfallmengen-Konto, dem die ihm pro Schicht zugeordnete Abfallmenge

$$m_{\text{Konto},i} = Z_{\text{Befüllungen},i} \cdot m_{\text{SHB}} \quad (6.4)$$

zu Beginn einer jeden Schicht zugeschrieben wird.

Es sind:

| | | |
|-------------------------------------|------|---|
| $m_{\text{Konto},i}$ | [kg] | Abfallmenge im Konto des Abfallsammelbehälters i pro Schicht |
| $Z_{\text{Befüllungen},i}$ | [-] | Anzahl der Befüllungen für Abfallsammelbehälter i pro Schicht |
| $(i = 1 \dots Z_{\text{Behälter}})$ | | |

Da in der Simulation vor allem interessiert, ob und wann ein Abfallsammelbehälter geleert werden muss, wird ebenfalls gleich zu Beginn der Schicht die Anzahl der in der Schicht erforderlichen Umleerungen pro Abfallsammelbehälter berechnet. Die Anzahl der Umleerungen ergibt sich aus

$$Z_{\text{Umleerungen},i} = \frac{m_{\text{Konto},i}}{\rho \cdot \varphi \cdot V_i} \quad (6.5)$$

Es sind:

| | | |
|----------------------------|---------------------|---|
| $Z_{\text{Umleerungen},i}$ | [-] | Anzahl der erforderlichen Umleerungen in der Schicht pro Abfallsammelbehälter i , |
| ρ | [t/m ³] | Dichte der betrachteten Abfallfraktion, |
| φ | [-] | Füllgrad des Abfallsammelbehälters i , |
| V_i | [m ³] | Volumen des Abfallsammelbehälters i . |

Pro Schicht ist eine Umleerung für den Abfallsammelbehälter i erforderlich, wenn

$$1 \leq Z_{\text{Umleerungen, } i} < 2,$$

zwei Umleerungen sind erforderlich, wenn

$$2 \leq Z_{\text{Umleerungen, } i} < 3, \text{ u.s.w..}$$

$$(i = 1 \dots Z_{\text{Behälter}})$$

Somit stehen zu Beginn einer jeden Schicht sämtliche erforderlichen Umleerungen aller Abfallfraktionen fest. In der Simulation erzeugt jede Umleerung, die pro Abfallsammelbehälter in der Schicht erforderlich ist, einen Auftrag im sogenannten Auftrag-Trigger. Ein Auftrag im Trigger-Baustein wird generiert, indem die Auftragsnummer des Auftrags mit dem Ereigniszeitpunkt, wann dieser Auftrag ausgelöst werden soll, in die Zeitleiste des Triggers eingetragen wird. Der Zeitpunkt, wann dieses Ereignis eintritt, wird zufällig durch eine Gleichverteilung über den Zeitraum der Schicht - z. B. 0:00 – 8:00 Stunden - verteilt. Wird im Auftrag-Trigger ein Auftrag eingetragen, werden die Aufträge in der Zeitleiste des Triggers automatisch zeitlich aufsteigend sortiert. Bild 6.3 zeigt die Zeitleiste des Auftrag-Triggers mit dem Zeitpunkt, wann ein Auftrag ausgelöst wird (Spalte 1) und der Auftragsnummer des Auftrags (Spalte 2).

| | 1 | 2 |
|----|--------------|------|
| 0 | Zeitpunkt | Wert |
| 50 | 1:47:00.0000 | 323 |
| 51 | 1:53:00.0000 | 341 |
| 52 | 1:53:00.0000 | 348 |
| 53 | 1:54:00.0000 | 350 |
| 54 | 1:57:00.0000 | 372 |
| 55 | 2:04:00.0000 | 300 |
| 56 | 2:06:00.0000 | 362 |
| 57 | 2:07:00.0000 | 393 |
| 58 | 2:09:00.0000 | 312 |
| 59 | 2:09:00.0000 | 324 |

Bild 6.3: Zeitleiste des Auftrag-Triggers zur Generierung der Aufträge für die Transportmittel.

Hinter jeder Auftragsnummer verbirgt sich ein Auftrag mit der Behälternummer des zu entleerenden Abfallsammelbehälters, der Abfallfraktion und der Nummer der Hal-

le, in der dieser Behälter bereitgestellt ist. Diese Daten des Auftrags werden parallel in einer hierfür vorgesehenen Auftragsliste hinterlegt.

Der Trigger-Baustein löst jeweils zum eingetragenen Zeitpunkt in der Simulation ein Ereignis aus, an das die weitere Organisation der Auftragsverteilung an die Transportmittel gebunden ist. Dies wird im gleichnamigen Untermodul durchgeführt. Nicht jeder Auftrag, der im Auftrag-Trigger generiert wurde, löst einen Auftrag an das entsprechende Transportmittel aus, da dies von der zugeordneten Sammelstrategie des Transportmittels abhängt.

Ein Auftrag, der für das Transportmittel im Umleerverfahren bestimmt ist, wird nur durch jenen Abfallsammelbehälter der Abfallfraktion ausgelöst, der die meisten Umleerungen in der betrachteten Schicht benötigt. Da das Transportmittel im Umleerverfahren eine vollständige Sammeltour über alle bereitgestellten Abfallsammelbehälter einer Abfallfraktion in einer Halle „fährt“, sind die übrigen Behälter in dieser Sammeltour mit berücksichtigt (vgl. folgendes Kapitel).

Beim Transportmittel im Wechselverfahren hängt die Auftragserteilung davon ab, wie viele Wechselbehälter das Transportmittel auf der Sammeltour mitführt. Wird nur ein Wechselbehälter mitgeführt, erfolgt die Auftragserteilung an das Transportmittel direkt. Werden mehr als ein Wechselbehälter mitgeführt, werden die jeweiligen Aufträge zunächst sortiert nach Hallen in einem Auftragspuffer abgelegt. Sobald die Anzahl der Aufträge mit der Anzahl der Kapazität an Wechselbehälter übereinstimmt, wird ein Auftrag an das Transportmittel ausgelöst und die Sammeltour gemäß der Reihenfolge der Aufträge begonnen (vgl. folgendes Kapitel).

6.2 Die Abfalllogistik in der Simulation

Die Abfalllogistik beschreibt die innerbetriebliche Sammlung und den Transport der Abfälle von der Abfallquelle über Sammelstellen zur Abfallsenke. Dazu werden Sammel- und Transportmittel verwendet, die über unterschiedliche Transportketten im gebrochenen Verkehr (Umladen der Abfälle von Sammelbehälter zu Sammelbehälter) oder im kombinierten Verkehr (Umschlagen bzw. Wechseln des Sammel- und Transportbehälters) zum Einsatz kommen /Jünemann-2000/.

Im Rahmen der Abfalllogistik in der Simulation soll auf die folgenden logistischen Schwerpunkte eingegangen werden:

- Transportkettenvarianten in der Simulation,
- Sammelstrategien im Umleer- und Wechselverfahren,
- Wegematrix und Wegeberechnung für die Sammelstrategien in der Halle,
- Systemgrenzen und Restriktionen in der Simulation.

6.2.1 Transportkettenvarianten in der Simulation

Nach DIN 30781 ist die Transportkette die Folge von technisch und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen, bei denen Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden /DIN-30781/.

Die Transportketten, die der Simulation zugrunde gelegt werden, wurden aus den Prozessketten der realen innerbetrieblichen Entsorgungslogistik abgeleitet. Insgesamt können sechs unterschiedliche Transportketten in der Simulation abgebildet werden. Je nach Sammelstrategie können die Transportketten in das Umleer- oder Wechselverfahren aufgeteilt werden (vgl. Kapitel 3.5.2).

In der Simulation durchlaufen Fahrzeuge diese Transportketten. Die Fahrzeuge unterscheiden sich dabei, ob im Umleer- und Wechselverfahren gesammelt wird und ob die Sammlung in der Halle oder erst ab einer dezentralen Senke (Poolplatz) erfolgt. Demnach werden die folgenden Fahrzeugtypen unterschieden, die in Bild 6.4 tabellarisch aufgeführt sind:

| Fahrzeugtypen und ihre Bezeichnung in der Simulation | Umleerverfahren | Wechselverfahren |
|--|---|--|
| Sammlung ab Sammelstellen in der Halle | Sammel- und Transportmittel: „Fahrzeug_U“ (Umleerfahrzeug) | Sammel- und Transportmittel: „Fahrzeug_W“ (Wechselfahrzeug) |
| Sammlung ab dezentraler Senke (Poolplatz) | Poolfahrzeug: „Fahrzeug_PU“ | Poolfahrzeug: „Fahrzeug_PW“ |

Bild 6.4: Fahrzeugtypen in der Simulation.

Welche Transportkette ein Fahrzeug durchläuft, hängt davon ab, für welche Abfallfraktion das jeweilige Fahrzeug zuständig ist und ob es im Umleer- oder Wechselverfahren (vgl. Sammelstrategien weiter unten) eingesetzt wird. Ein Fahrzeug wird auf die entsprechende Transportkette gesetzt, wenn ein Auftrag für dieses Fahrzeug generiert wurde (vgl. Kapitel 6.1 „Die Abfallgenerierung in der Simulation“).

Bild 6.5 zeigt die Transportketten für die Sammlung der Abfälle im Umleerverfahren. Zur Vollständigkeit, sind in Bild 6.6 die Transportketten für die Sammlung im Wechselverfahren dargestellt.

Sammlung in der Halle im Umleerverfahren

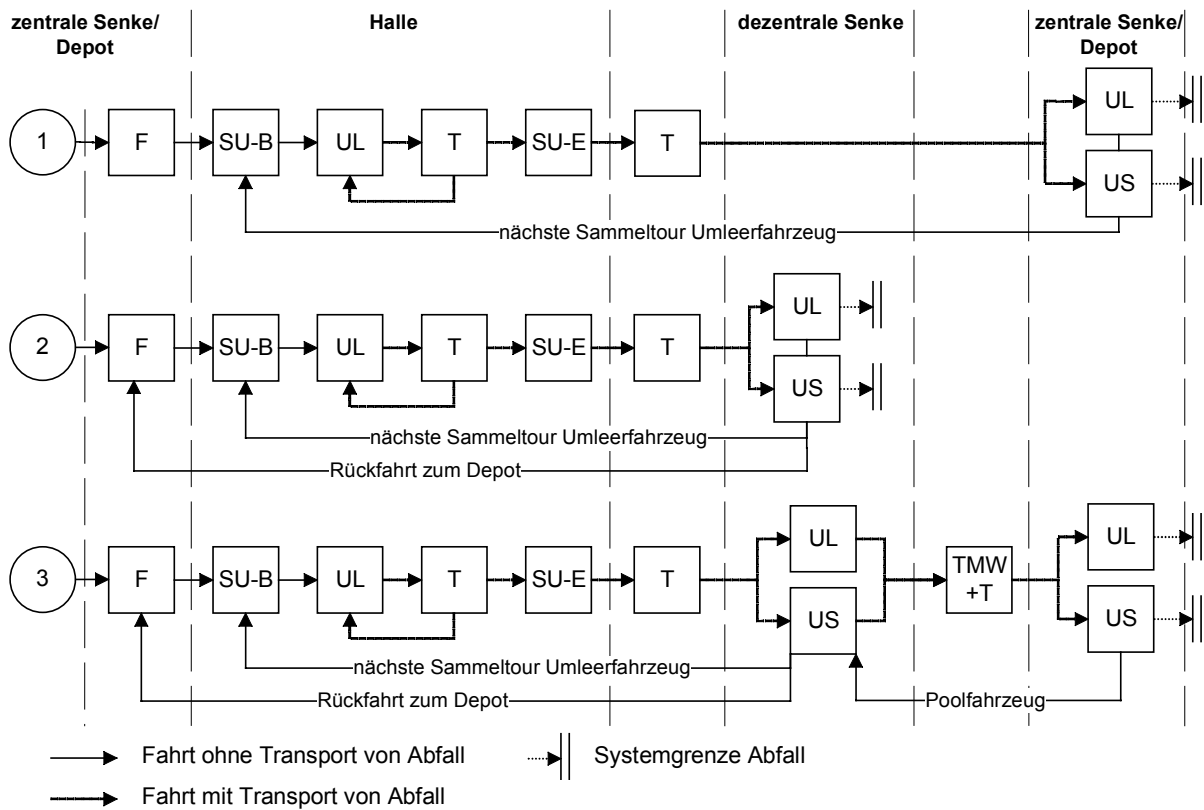


Bild 6.5: Transportketten für die Sammlung im Umleerverfahren.

Sammlung in der Halle im Wechselverfahren

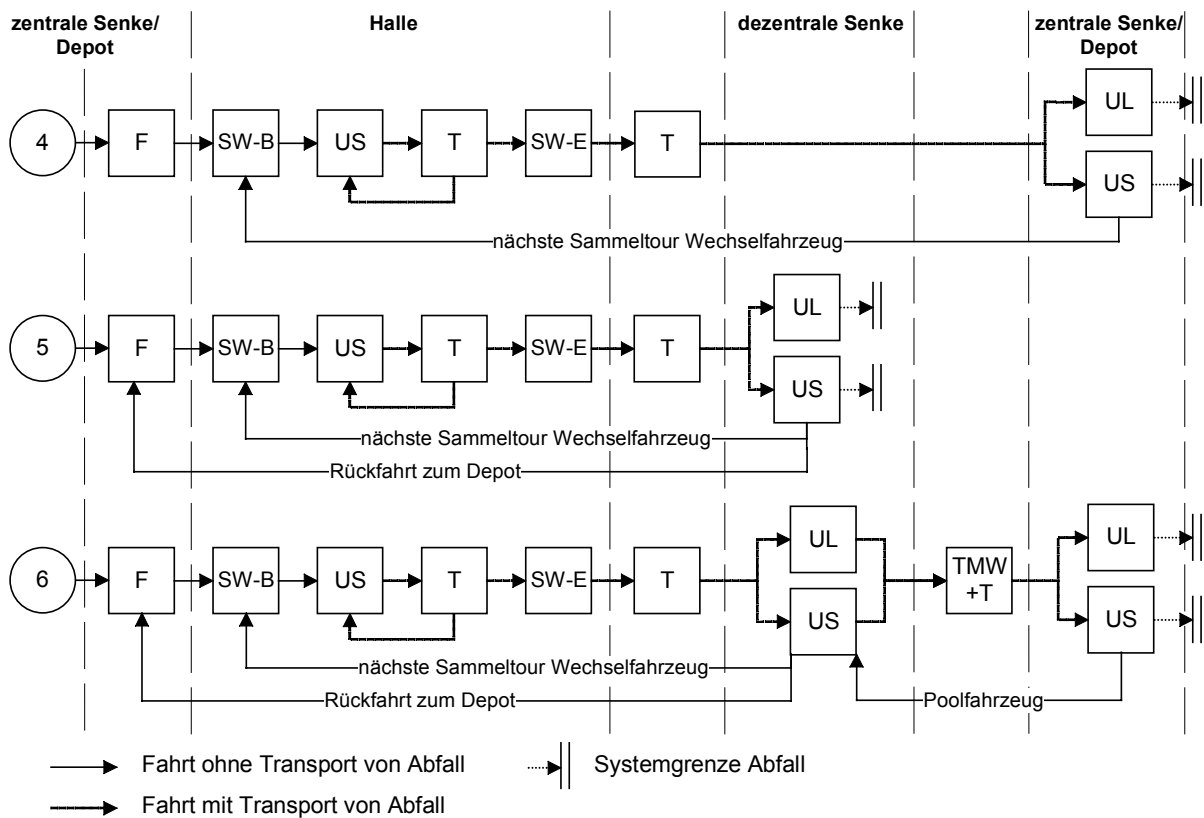


Bild 6.6: Transportketten für die Sammlung im Wechselverfahren.

Die Transportketten sind aus den folgenden Elementen aufgebaut:

- F** Fahrt ohne Transport von Abfall
- T** Transport von Abfall
- SU-B** Beginn der Sammlung im Umleerverfahren
- SU-E** Ende der Sammlung im Umleerverfahren
- SW-B** Beginn der Sammlung im Wechselverfahren
- SW-E** Ende der Sammlung im Wechselverfahren
- TMW** Transportmittelwechsel (Übergang vom Sammel- und Transportmittel zum Poolfahrzeug)
- UL** Umladen: Beim Umladen an der Senke wechselt der Abfall seinen Sammel- bzw. Transportbehälter, d. h. der Abfall wird von einem Behälter in den anderen umgeladen. Die Senke im Simulationsmodell entspricht dabei einem Behälter dessen Behältergröße (Volumen) frei wählbar ist und über die Eingabeparameter festgelegt wird. Es kann angegeben werden, ob der Abfall an der Senke verdichtet wird oder nicht. In der Praxis werden hierfür vor allem Müllgroßbehälter (MGB) ab der Größe 1,1 m³, Mulden und Container mit oder ohne Pressvorrichtung verwendet. Das Umladen entspricht somit dem Umleerverfahren.
- US** Umschlagen: Beim Umschlagen wird unter Beibehaltung des Behälters das Transport- bzw. Fördermittel gewechselt; der Abfall bleibt in seinem Behälter, der Behälter wechselt aber das Transport- bzw. Fördermittel. In der Praxis kommen für das Umschlagen vor allem Gitterboxen, Fässer, ASP- und ASF-Behälter für pastöse und flüssige Sonderabfälle zum Einsatz. Ebenso typisch ist das Abstellen von vollen Müllgroßbehältern (MGB) im Tausch mit leeren Müllgroßbehältern an Poolplätzen bzw. dezentralen Senken. Die Senke im Simulationsmodell entspricht dabei im einfachsten Fall einem Stellplatz zur Bereitstellung der Behälter. Im Falle eines Poolplatzes (Poolplatz = keine Systemgrenze für den Abfall in der Simulation), werden durch das Sammel- und Transportmittel Behälter dem Poolplatz zugeführt und durch das Poolfahrzeug wieder abgeführt. Das Umschlagen entspricht dem Wechselverfahren.

Die Systemgrenze „Abfall“ beschreibt die Grenze zwischen innerbetrieblicher und außerbetrieblicher Entsorgungslogistik. Ab dieser Systemgrenze „verlassen“ die Abfälle das Werk. Die nachgelagerten Umschlag-, Umlade- und Transportprozesse sind

nicht Bestandteil der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik und somit auch nicht Teil des betrachteten Simulationssystems.

Im Folgenden werden die Transportketten aus Bild 6.5 und 6.6 beschrieben und interpretiert. Dabei wird unter Zusammenfassung der Umleer- und Wechselverfahren in die Sammel- und Bereitstellungsverfahren nach Kapitel 3.5.2 unterschieden:

Transportkette 1 bzw. 4 (zentrale Sammlung)

Das Sammel- und Transportmittel startet an der zentralen Senke, die gleichzeitig auch Depot für die Sammel- und Transportmittel ist. Danach erfolgt die Fahrt zur entsprechenden Halle gemäß dem Auftrag. In der Halle werden die bereitgestellten Sammelbehälter, sofern diese geleert werden müssen (die Abfrage erfolgt durch das Sammel- und Transportmittel), im Umleerverfahren bzw. im Wechselverfahren geleert. Ist die Kapazität des Sammel- und Transportmittels überschritten, erfolgt die Rückfahrt zur zentralen Senke, bei der der transportierte Abfall entweder umgeladen oder umgeschlagen und anschließend die Sammeltour fortgesetzt wird. Die zentrale Senke ist Systemgrenze „Abfall“. Ist die Sammeltour beendet, und stehen keine weiteren Aufträge an, wird das Sammel- und Transportmittel im Depot geparkt. Die zentrale Sammlung wird vor allem für Abfallfraktionen mit geringem Abfallmengenanfall eingesetzt. Sämtliche Abfälle einer Abfallfraktion werden dabei an der zentralen Senke zusammengeführt, so dass transportgerechte Losgrößen für den Abtransport der Abfälle gebildet werden können.

Transportkette 2 bzw. 5 (dezentrale Sammlung)

Die Transportketten 2 bzw. 5 unterscheiden sich von den Transportketten 1 bzw. 4 durch die dezentrale Sammlung der Abfälle in dezentralen Senken, die ebenfalls die Systemgrenze „Abfall“ darstellen. Ist die Sammeltour beendet und stehen keine weiteren Aufträge an, erfolgt die Rückfahrt zum Depot, wo das Sammel- und Transportmittel geparkt wird. Die dezentrale Sammlung kommt dann zum Einsatz, wenn für eine Abfallfraktion große Mengen bzw. kurze Entleerungszyklen und große Entfernungen im Werk vorliegen. Durch die dezentrale Sammlung können zeitintensive Transporte zur zentralen Senke vermieden werden, insofern diese weiter entfernt von der Halle liegt, in der eine Sammeltour gefahren wird, als die dezentrale Senke.

Transportkette 3 bzw. 6 (Sammlung mit Poolstellen)

Bei den Transportketten 3 bzw. 6 handelt es sich im Gegensatz zu den eingliedrigen Transportketten 1, 2, 4 und 5 um eine sogenannte mehrgliedrige Transportkette /Pfohl-2000/. Dabei findet ein Wechsel des Transportmittels an der dezentralen Senke statt. Die Sammlung und Abfuhr der an der dezentralen Senke zwischengelagerten Abfälle und den anschließenden Transport zur zentralen Senke übernimmt ein Poolfahrzeug. Die zweistufige Sammlung mit Poolstellen wird vor allem bei Abfallfrak-

tionen durchgeführt, die zentral gesammelt werden sollen oder müssen (z. B. Sonderabfälle, dessen Begleitscheinverfahren über eine zentrale Stelle geregelt wird), für die aber sehr große Mengen bzw. kurze Entleerungszyklen und große Entfernungen im Werk vorliegen.

Ein Auftrag an das Poolfahrzeug wird generiert, sobald einer der vier folgenden Fälle an der dezentralen Senke eintritt:

- Die Abfälle wurden an der dezentralen Senke umgeladen:
 - a) Das Poolfahrzeug sammelt im Umleerverfahren
Bedingung: Der Füllstand der dezentralen Senke übersteigt die maximale Kapazität dieser Senke ($\text{Volumen}_{\text{Füllstand}} > \text{Volumen}_{\text{Kapazität dezentrale Senke}}$) und die maximale Kapazität des Poolfahrzeugs ist größer als die Kapazität der dezentralen Senke ($\text{Volumen}_{\text{Poolfahrzeug}} > \text{Volumen}_{\text{Kapazität dezentrale Senke}}$).
 - b) Das Poolfahrzeug sammelt im Wechselverfahren
Bedingung: Der Füllstand der dezentralen Senke übersteigt die maximale Kapazität dieser Senke ($\text{Volumen}_{\text{Füllstand}} > \text{Volumen}_{\text{Kapazität dezentrale Senke}}$) und das Poolfahrzeug kann genau einen Behälter wechseln, d. h. in diesem Fall wird die dezentrale Senke umgeschlagen.
- Die Abfälle wurden an der dezentralen Senke umgeschlagen:
 - c) Das Poolfahrzeug sammelt im Umleerverfahren
Bedingung: Das Volumen aller Abfallsammelbehälter einer Abfallfraktion an der dezentralen Senke ist in Summe größer als die maximale Kapazität des Poolfahrzeugs ($\text{Volumen}_{\text{aller Sammelbehälter einer Abfallfraktion}} > \text{Volumen}_{\text{Poolfahrzeug}}$).
 - d) Das Poolfahrzeug sammelt im Wechselverfahren
Bedingung: Die Anzahl der sich an der dezentralen Senke befindenden Abfallsammelbehälter ist größer oder gleich der Anzahl Wechselbehälter, die das Poolfahrzeug mitführen kann ($\text{Anzahl}_{\text{Sammelbehälter}} \geq \text{Anzahl}_{\text{Wechselbehälter Poolfahrzeug}}$).

6.2.2 Sammelstrategien im Umleer- und Wechselverfahren

In der Simulation werden zur Sammlung der Abfälle zwei grundsätzliche Sammelstrategien - das Umleerverfahren und das Wechselverfahren - simuliert. Für die Simulation stehen somit jeweils zwei Fahrzeugtypen von Sammel- und Transportmitteln und zwei Fahrzeugtypen von Poolfahrzeugen für beide Sammelstrategien in der Bausteinklasse zur Verfügung. Diese können entsprechend der Vorgaben aus der Modellbildung beliebig oft in das Simulationslayout eingefügt werden (vgl. Bild 6.4).

Die jeweilige Strategie der Fahrzeuge wird im Modul *Modellbildung* bei der Konfiguration der Sammel- und Transportmittel bzw. Poolfahrzeuge (vgl. Kapitel 5.4.4 Transportmittel konfigurieren) festgelegt. Während das Sammel- und Transportmittel die Sammlung der Abfälle in den Hallen und den Transport zur dezentralen bzw. zentralen Senke übernimmt, wird das Poolfahrzeug ausschließlich für den Transport der Abfälle von einer dezentralen Senke zur zentralen Senke eingesetzt.

Im folgenden werden daher die beiden Sammelstrategien des Sammel- und Transportfahrzeuges vorgestellt, die im Gegensatz zum Poolfahrzeug zusätzlich die Sammeltour in der Halle umfassen (vgl. Bild 6.7).

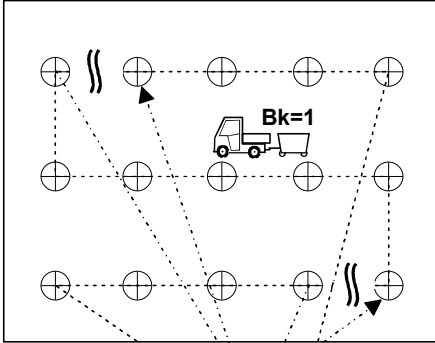
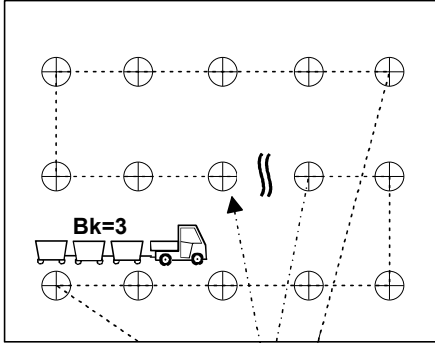
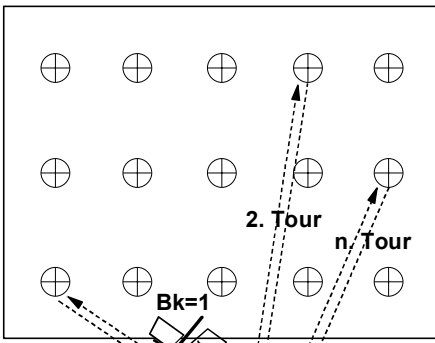
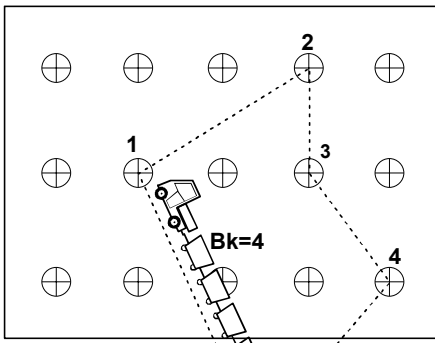
Sammeltour im Umleerverfahren:

Beim Umleerverfahren werden die Abfälle vor Ort in die Sammel- und Transportmittel umgeleert. Das Sammel- und Transportmittel kann jeweils nur eine Abfallfraktion pro Sammeltour sammeln. In der Sammeltour wird der Reihe nach jeder Behälter der zu sammelnden Abfallfraktion in der Halle angefahren und geprüft, ob eine Umleerung erfolgen soll. Ist dies der Fall, wird der Inhalt einer Behälterleerung des Behälters dem Sammel- und Transportmittel zugeschrieben. Ist die maximale Kapazität des Sammel- und Transportmittels erreicht, wird die Sammeltour unterbrochen und die zugeteilte Senke angefahren (vgl. Transportketten).

Sammeltour im Wechselverfahren:

Im Gegensatz zum Umleerverfahren werden die Abfälle zusammen mit den Behältern gewechselt. Das Sammel- und Transportmittel kann daher im Wechselverfahren mehrere Abfallfraktionen pro Sammeltour sammeln. Die zu leerenden Abfallsammelbehälter werden direkt angefahren. Das Sammel- und Transportmittel in der Simulation beginnt erst mit der Sammlung, wenn dessen Auftragsliste gleich viele Aufträge enthält, wie das Sammel- und Transportmittel an Behältern mitführen kann. In der Simulation werden die vollen Abfallsammelbehälter durch leere Behälter ersetzt, so dass eine kontinuierliche Sammlung der Abfälle in der Halle gewährleistet ist.

Bild 6.7 veranschaulicht die Sammelverfahren in der Halle in Abhängigkeit der Behälterkapazität. Ist die Behälterkapazität $B_k=1$, kann im Wechselverfahren nicht mehr von einer vollständigen Sammeltour ausgegangen werden. Das Sammel- und Transportmittel fährt dann in einer „Pendeltour“ zwischen den einzelnen Behälterstandorten und der zentralen bzw. dezentralen Senke.

| Sammelstrategie | Behälterkapazität $B_k = 1$ | Behälterkapazität $B_k > 1$ |
|--|---|--|
| <p>Umleerverfahren</p> <p>schematisches Sammelverfahren:</p> | <p>eine Abfallfraktion pro Sammeltour</p> <p>Halle</p>  <p>Depot bzw. Senke</p> | <p>eine Abfallfraktion pro Sammeltour</p> <p>Halle</p>  <p>Depot bzw. Senke</p> |
| <p>Praxisbeispiel:</p> | <p>z. B. Elektro-Wagen mit einem angehängten Behälter</p> | <p>z. B. Elektro-Wagen mit mehreren angehängten Behältern (Schleppzug)</p> |
| <p>Wechselverfahren</p> <p>schematisches Sammelverfahren:</p> | <p>„Pendeltour“ 1 Wechselbehälter = 1 Abfallfraktion</p> <p>Halle</p>  <p>Depot bzw. Senke</p> | <p>mehrere Abfallfraktionen pro Sammeltour möglich</p> <p>Halle</p>  <p>Depot bzw. Senke</p> |
| <p>Praxisbeispiel:</p> | <p>z. B. Gabelstapler mit einem Behälter</p> | <p>z. B. Elektro-Wagen mit mehreren angehängten Behältern (Schleppzug)</p> |





-  Hallenkontur
-  Behälterstandort in der Halle
-  Reihenfolge, in der die Sammelbehälter angefahren werden
-  Unterbrechung der Sammeltour im Umleerverfahren, zur Leerung der mitgeführten Sammelbehälter

Bild 6.7: Umleer- und Wechselverfahren bei der Sammeltour in der Halle.

In der Simulation wird zur Steuerung der Sammel- und Transportmittel eine Ablaufsteuerung hinterlegt, die im Folgenden am Beispiel des Sammel- und Transport-

mittels im Wechselverfahren veranschaulicht werden soll. Der Simulationsbaustein, der die Ablaufsteuerung des Sammel- und Transportmittels im Wechselverfahren beinhaltet, wird durch insgesamt 7 Simulationsereignisse beeinflusst (im Anhang A2 ist das entsprechende Flussdiagramm zur Ablaufsteuerung des Sammel- und Transportmittels im Wechselverfahren aufgeführt):

1. Der Auftrag-Trigger erzeugt einen Auftrag für das Sammel- und Transportmittel.
2. Das Sammel- und Transportmittel ist am zu entleerenden Behälter angekommen.
3. Das Sammel- und Transportmittel ist an der dezentralen Senke angekommen.
4. Das Sammel- und Transportmittel ist an der zentralen Senke / Depot angekommen.
5. Die Einsatzzeit des Sammel- und Transportmittels hat begonnen bzw. ist zu Ende (z. B. Schichtanfang bzw. Schichtende).
6. Das Sammel- und Transportmittel fährt aus dem Depot heraus.
7. Das Sammel- und Transportmittel fährt ins Depot.

Das Flussdiagramm im Anhang A2 beschreibt im Wesentlichen den Ablauf zur Steuerung des Sammel- und Transportmittels, nachdem das jeweilige Ereignis in der Simulation eintritt.

6.2.3 Behältermatrix und Wegberechnung für die Sammelstrategie in der Halle

In der Simulation werden die Fahrwege und deren Länge für die Transporte von der Halle zur Senke (dezentral bzw. zentral) sowie die Fahrwege von der dezentralen Senke zum Depot im Modul „Modellbildung“ festgelegt (vgl. Kapitel 5.4.4). Damit sind die Fahrwege definiert, die durch ihre großen Entfernungen entsprechende Fahrzeiten bei den Fahrzeugen verursachen. Im Gegensatz hierzu sind die Fahrwege in der Halle differenziert zu betrachten. Zum einen lässt eine detailliertere Festlegung der Behälterstandorte in der Halle und damit der einzelnen Entfernungen zwischen den Behältern keine wesentliche Verbesserung der Planungsergebnisse erwarten. Im Anhang A3 werden die zurückgelegten Wege einer beliebigen Sammeltour in der Halle, die mit Hilfe der hier vorgestellten Behältermatrix in der Simulation berechnet wurden, den Wegstrecken bei realen Behälterstandorten gegenübergestellt. Im Beispiel des Anhang A3 werden insgesamt 20 Sammelbehälter im Wechselverfahren gesammelt. Die Abweichungen sind gering, wenn entsprechende Abmessung für die

Hallenlänge und Hallenbreite in der Simulation gewählt werden (im Beispiel beträgt die mittlere Abweichung 2,51%).

Zum anderen muss mit einem erheblichen planerischen Aufwand gerechnet werden, wenn die einzelnen Behälterstandorte definiert werden müssen. Dieser Aufwand kann minimiert werden, wenn eine CAD-gestützte Layoutplanung, wie sie bei Heimsoth beschrieben wird /Heimsoth-2000/, eingesetzt wird. Dies setzt voraus, dass das Layout des Industrieunternehmens im CAD-Format vorliegt. Prinzipiell ist eine Verknüpfung der berechneten Daten aus der CAD-Layoutplanung über die CAD-Schnittstelle, bzw. über die Dateischnittstelle von Simple++ möglich. Der Aufwand hierfür wurde jedoch in dieser Arbeit aus den oben genannten Gründen nicht betrieben. Ein weiterer Grund ergibt sich aus der Tatsache, dass in der Realität die Sammelbehälter in der Halle - mit Ausnahme der fest installierten Sammelnischen - je nach Bedarf der Mitarbeiter vom ursprünglichen Standort entfernt werden, und somit nicht für längere Zeit an definierten Standorten stehen bleiben. Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Behältermatrix in der Simulation geschildert.

Um in der Simulation eine hinreichend genaue Abbildung der Fahrwege in der Halle erzielen zu können, ohne einen zu hohen Aufwand für die Festlegung der einzelnen Behälterstandorte betreiben zu müssen, werden die Abfallsammelbehälter in der Halle auf ein Raster ausgelegt. Das Raster ist durch die Rastermaße in x- und y-Richtung (Abstand der Behälter in x- und y-Richtung) definiert und so ausgelegt, dass der Betrag der Differenz der einzelnen Behälterabstände in x- und y-Richtung minimal wird. Die Rastermaße lassen sich aus der Anzahl Behälter, die in der Halle zur Sammlung einer Abfallfraktion bereitgestellt sind, und der Hallenlänge und -breite nach dem folgenden iterativen Verfahren in Bild 6.9 berechnen.

| Hallenlänge | | 180 m | | 65 Abfallsammelbehälter | | |
|--------------|--------|-------|------|-------------------------|--------|---------------|
| Hallenbreite | | 125 m | | | | |
| y | x | x ger | Rest | a1 | a2 | Betrag(a1-a2) |
| 1 | 65,000 | 65 | 0 | 125,000 | 2,769 | 122,231 |
| 2 | 32,500 | 32 | 1 | 62,500 | 5,538 | 56,962 |
| 3 | 21,667 | 21 | 2 | 41,667 | 8,308 | 33,359 |
| 4 | 16,250 | 16 | 1 | 31,250 | 11,077 | 20,173 |
| 5 | 13,000 | 13 | 0 | 25,000 | 13,846 | 11,154 |
| 6 | 10,833 | 10 | 5 | 20,833 | 16,615 | 4,218 |
| 7 | 9,286 | 9 | 2 | 17,857 | 19,385 | 1,527 |
| 8 | 8,125 | 8 | 1 | 15,625 | 22,154 | 6,529 |
| 9 | 7,222 | 7 | 2 | 13,889 | 24,923 | 11,034 |
| 10 | 6,500 | 6 | 5 | 12,500 | 27,692 | 15,192 |

Bild 6.9: Berechnungsbeispiel der Iteration zur Berechnung der Behälterabstände in der Halle.

Im Berechnungsbeispiel der Iteration sind:

y = Anzahl Behälterreihen in y -Richtung

x = Anzahl Behälterreihen in x -Richtung = Anzahl Abfallsammelbehälter / y

x_{ger} = gerundeter Wert von x

Rest = ganzzahliger Rest der Division: Anzahl Abfallsammelbehälter / y

a_1 = Rastermaß, Abstand der Behälter in y -Richtung = Hallenbreite / y

a_2 = Rastermaß, Abstand der Behälter in x -Richtung = Hallenlänge / x

Für $y = 7$ wird der Betrag der Differenz aus a_1 und a_2 minimal. Somit steht das Raster mit den abgerundeten Rastermaßen $a_1=17\text{m}$ und $a_2=19\text{m}$ fest. Daraus ergibt sich die folgende Behältermatrix ($7 \times 9 + 2 = 65$) in der Halle (Bild 6.10):

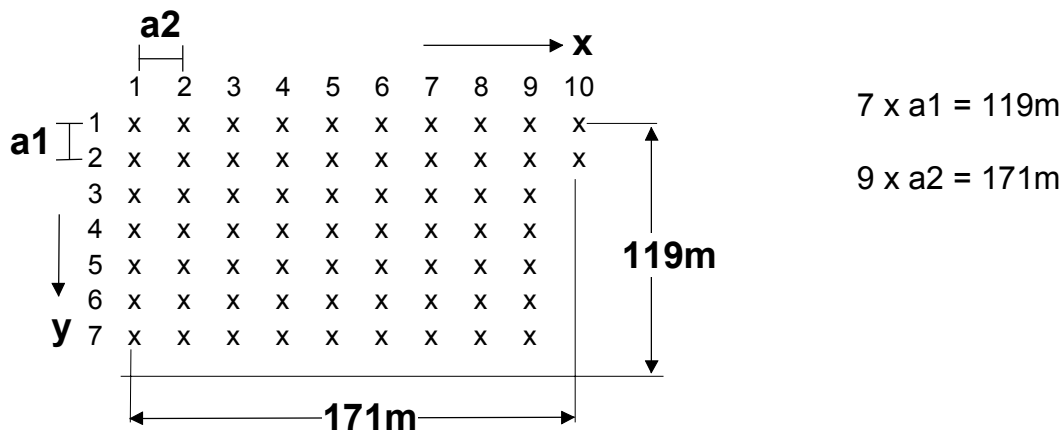


Bild 6.10: Behältermatrix als Ergebnis des Berechnungsbeispiels der Iteration.

Die Fahrwege in der Halle, die das Sammel- und Transportmittel während einer Sammeltour zurücklegt, unterscheiden sich je nachdem, ob im Umleer- oder Wechselverfahren gesammelt wird.

Soll z. B. bei der Sammlung im Wechselverfahren der Behälter 53 nach dem Behälter 22 angefahren werden, so ergibt sich unter der Annahme, dass in den Hallenbereichen in den meisten Unternehmen rechtwinklige Wegenetze vorliegen, der Fahrweg s aus den Behälterkoordinaten:

Behälter 53: Koordinaten ($x_1=8, y_1=4$),

Behälter 22: Koordinaten ($x_2=4, y_2=1$):

$$s = (x_1 - x_2) \cdot a_2 + (y_1 - y_2) \cdot a_1 = 4 \cdot 17\text{m} + 3 \cdot 19\text{m} = 125\text{m}.$$

Beim Wechselverfahren ist zusätzlich zu beachten, dass bei der Berechnung der Fahrwege bei der Sammlung von zwei oder mehreren unterschiedlichen Abfallfraktionen (unterschiedliche Anzahl an Abfallsammelbehältern) die Behälterabstände variieren können.

Abschließend sollen im Folgenden die Restriktionen und Randbedingungen, die der Simulation zugrunde liegen, aufgeführt werden:

- Die zentrale Senke ist gleichzeitig Depot für die Fahrzeuge. Stehen keine Aufträge an oder ist die Einsatzzeit des Fahrzeuges abgelaufen, wird von jedem Fahrzeug das Depot angefahren. Die Fahrzeuge stehen dann in der „Parkposition“.
- Beschleunigungen und Verzögerungen der Fahrzeuge bleiben unberücksichtigt.
- Störeinflüsse, wie z. B. das Ausfallen eines Fahrzeuges durch Installations- oder Wartungsarbeiten bzw. das Aufladen der Batterie bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb bleiben unberücksichtigt. Allerdings bietet Simple++ zahlreiche Funktionen zum Ladebetrieb über Verbrauchsstatistiken sowie Kapazität und Reserven der Batterie, so dass eine Einbindung dieser Störgröße in der Simulation ohne höheren Aufwand möglich ist.
- Sämtliche Abfallsammelbehälter stehen zu jedem Zeitpunkt der Simulation zur Abfallbefüllung zur Verfügung. Dies bedeutet, dass im Umleerverfahren der Abfallsammelbehälter an Ort und Stelle umgeleert und im Wechselverfahren ein vom Sammel- und Transportfahrzeug mitgeführter leerer Behälter gegen den vollen getauscht wird.
- Pro Abfallfraktion, die in einer Halle anfällt, kann nur ein Behälterttyp, d. h. ein Behältervolumen definiert werden. Es ist somit nicht möglich, eine heterogene Behälterstruktur mit unterschiedlichen Behältervolumen für eine Abfallfraktion in einer Halle in der Simulation darzustellen.

6.3 Wartezeiten bei der Auftragsabwicklung

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, generiert das Modul „Abfallgenerierung“ zu stochastisch verteilten Zeitpunkten Aufträge an die jeweiligen Simulationsfahrzeuge. Ein Auftrag entsteht, sobald ein Abfallsammelbehälter seinen maximalen Füllstand erreicht hat, d. h. der Abfallsammelbehälter muss geleert werden. Tritt dieses Ereignis ein, wird für diesen Auftrag die aktuelle Simulationszeit $t_{\text{Auftrag start}}$ registriert. Der Auftrag ist erledigt, wenn der Abfallsammelbehälter geleert wurde. In diesem Fall wird wieder die aktuelle Simulationszeit $t_{\text{Auftrag stopp}}$ registriert. Die Wartezeit des Sammelbehälters i der Abfallfraktion af (Nummer der Abfallfraktion) aus der Halle h (Nummer der Halle), die für die Bearbeitung des Auftrags durch das entsprechende Sammel- und Transportmittel benötigt wird, ergibt sich somit aus der Differenz

$$t_{\text{WZ, } i, af, h} = t_{\text{Auftrag stopp, } i} - t_{\text{Auftrag start, } i} \quad (6.6)$$

Die mittlere Wartezeit für die Leerung der Sammelbehälter der Abfallfraktion af in der Halle h ergibt sich aus:

$$mWZ_{af,h} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{WZ,i,af,h}}{n}. \quad (6.7)$$

Es sind:

| | |
|-----|--|
| mWZ | mittlere Wartezeit, |
| i | Nummer des Sammelbehälters, |
| af | Nummer der Abfallfraktion, |
| h | Nummer der Halle, |
| n | Summe aller Behälterleerungen für die Abfallfraktion af in Halle h im betrachteten Bezugszeitraum. |

Für eine Optimierung der innerbetrieblichen Abfalllogistik ist die Reduzierung der Durchlaufzeit kein primäres Ziel, da die Durchlaufzeit des Abfalls gemessen an der Durchlaufzeit eines Versorgungsobjekts eine geringere Relevanz besitzt.

Andererseits ist die Wartezeit bei der „Entsorgung“ der Abfallsammelbehälter sehr wohl entsprechend der Versorgungslogistik eine zu beachtende Kennzahl für die Güte der zur Bearbeitung des Auftrags zur Verfügung stehenden Logistik (vgl. Kapitel 4.4.3). Sie gibt an, wie schnell der Auftrag zur Leerung des jeweiligen Behälters durch die bereitgestellte Logistik erledigt werden kann.

6.4 Zeitliche Auslastung von Kapazitäten der Simulationsfahrzeuge

Die zeitliche Auslastung der Fahrzeuge in der Simulation (Sammel- und Transportmittel, Poolfahrzeug) ist eine logistische Kenngröße, die angibt, wie hoch der Anteil des tatsächlichen Zeitaufwands für die Sammel- und Transportleistungen eines Fahrzeugs im Vergleich zur maximal möglichen Sammel- und Transportleistungen des Fahrzeugs ist.

Die Auslastung des Simulationsfahrzeugs im Bezugszeitraum P ergibt sich aus dem Verhältnis der Summe der tatsächlich während des Bezugszeitraumes entstehenden Sammel- und Transportleistungen zur maximal möglichen Sammel- und Transportleistung des Fahrzeuges.

$$Ausl_i = \frac{\sum_{j=1}^n t_j}{P_i} \cdot 100 \quad \text{in [\%]}. \quad (6.8)$$

Es sind:

- Ausl_i Auslastung des Simulationsfahrzeugs nach dem Einsatz i,
- i Nummer des Einsatzes des Simulationsfahrzeugs,
- t_j Auftragszeit des Sammel- und Transportvorgangs j,
- n Anzahl der Sammel- und Transportvorgänge während des Einsatzes i,
- P_i Länge des Bezugszeitraums des Einsatzes i
(= maximale Einsatzzeit des Simulationsfahrzeugs).

Die Berechnung dieser Kenngröße in der Simulation ist aus Bild 6.11 ersichtlich.

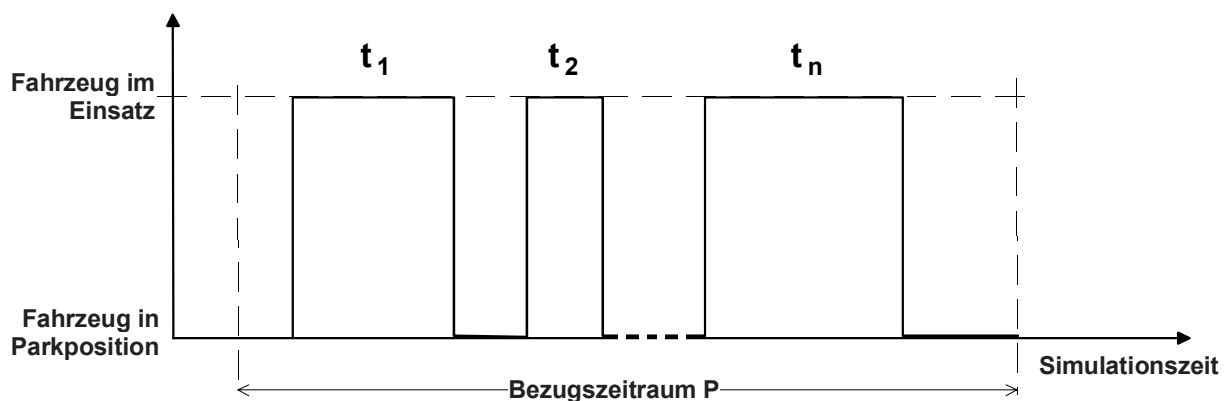


Bild 6.11: Berechnung der Auslastung der Fahrzeuge in der Simulation in Anlehnung an /Nyhuis-1999/.

Die mittlere Auslastung eines Simulationsfahrzeugs ist der Quotient aus der Summe aller während eines Simulationsexperiments ermittelten Auslastungen und der Anzahl der Einsätze des jeweiligen Simulationsfahrzeugs.

$$m\text{Ausl} = \frac{\sum_{i=1}^{ae} \text{Ausl}_i}{ae} \quad \text{in [\%]}. \quad (6.9)$$

Es sind:

- mAusl mittlere Auslastung des Simulationsfahrzeugs
- ae Anzahl der Einsätze des Simulationsfahrzeugs

6.5 Mittlerer Füllstand der Abfallsammelbehälter

Der Füllstand der Abfallsammelbehälter wird nach jeder Schicht in der Simulation kontrolliert. Der Füllstand ergibt sich aus dem Quotienten des tatsächlichen restlichen Abfallvolumens nach einer Schicht und des maximalen Volumens aller Sammelbehälter der jeweiligen Abfallfraktion und Halle:

$$FS_s = \frac{\sum_{i=1}^n AV_{i,af,h}}{\sum_{i=1}^n BV_{i,af,h} \cdot \varphi} \cdot 100 \quad \text{in [\%]}. \quad (6.10)$$

Es sind:

- FS_s Füllstand der Abfallfraktion af aus Halle h in der Schicht s
 af Nummer der Abfallfraktion,
 h Nummer der Halle,
 s Nummer der Schicht
 n Anzahl der Abfallsammelbehälter der Abfallfraktion af in der Halle h,
 AV Abfallvolumen im Sammelbehälter i der Abfallfraktion af in der Halle h,
 BV Behältervolumen des Sammelbehälters i der Abfallfraktion af in der Halle h,
 φ Füllgrad der Sammelbehälter.

Der mittlere Füllstand ist der Quotient aus der Summe aller ermittelten Füllstände und der Anzahl der Schichten:

$$mFS = \frac{\sum_{s=1}^{as} FS_s}{as} \quad \text{in [\%]}. \quad (6.11)$$

Es ist:

- mFS mittlerer Füllstand der Abfallfraktion af aus Halle h
 as Anzahl der Schichten mit Abfallanfall im Bezugszeitraum
 (z.B. gesamtes Betriebsjahr).

6.6 Registrierung der Bearbeitung von Aufträgen in der Simulation

In der Simulation entspricht jede Behälterleerung eines Sammelbehälters einem Auftrag mit Auftragsnummer, welche dem entsprechenden Sammel- und Transportmittel zugeordnet wird (vgl. Kapitel 6.1). Diese Aufträge werden in eine Auftragsliste der Simulationsbausteine der Sammel- und Transportmittel geschrieben, in der sämtliche Aufträge für das Sammel- und Transportmittel eingetragen werden, so dass zu jedem Zeitpunkt der Simulation auf die Auftragslage zurückgegriffen werden kann. Die Aufträge werden zusätzlich unterschieden in Aufträge, die erledigt werden konnten, d. h. der entsprechende Sammelbehälter wurde durch das Sammel- und Transportmittel geleert, und in Aufträge, die nicht erledigt werden konnten, d. h. der Sammelbehälter konnte nicht mehr durch das Sammel- und Transportmittel geleert werden, da des-

sen Einsatzzeit abgelaufen ist. Alle Aufträge die jetzt noch als unbearbeitete Aufträge in der Auftragsliste verblieben sind, werden als „nicht erledigte Aufträge“ registriert.

Der Anteil an nicht erledigten Aufträgen ergibt sich demnach aus dem Quotienten der Anzahl nicht erledigter Aufträge und der gesamten Anzahl aller Aufträge an das Sammel- und Transportmittel jeweils nach Beendigung des Einsatzes i des Sammel- und Transportmittels:

$$Ane_i = \frac{ZneA}{Z_{A \text{ gesamt}}} \cdot 100 = \frac{ZneA}{ZeA + ZneA} \cdot 100 \text{ in } [\%]. \quad (6.12)$$

Es sind:

| | |
|------------------------|--|
| Ane | Anteil nicht erledigter Aufträge, |
| i | Nummer des Einsatzes des Simulationsfahrzeugs, |
| $ZneA$ | Anzahl nicht erledigter Aufträge pro Einsatz des Simulationsfahrzeugs, |
| ZeA | Anzahl erledigter Aufträge pro Einsatz des Simulationsfahrzeugs, |
| $Z_{A \text{ gesamt}}$ | gesamte Anzahl der Aufträge pro Einsatz des Simulationsfahrzeugs. |

Der mittlere Anteil nicht erledigter Aufträge ist:

$$mAne = \frac{\sum_{i=1}^{ae} Ane_i}{ae} \text{ in } [\%]. \quad (6.13)$$

Es sind:

| | |
|--------|---|
| $mAne$ | mittlere Anteil nicht erledigter Aufträge, |
| ae | Anzahl der Einsätze des Simulationsfahrzeugs. |

6.7 Statistik und Verteilungen

In Kapitel 5.4.4 wurden drei Möglichkeiten vorgestellt, die Abfallmengenverteilung in der Simulation zu gestalten. Die Verteilung durch Vorgabe von „Mengentendenzen“ wurde dabei bereits diskutiert. Im Folgenden soll auf die Vorgehensweise bei der Umsetzung der empirischen und stochastischen Verteilung von Abfallmengen in der Simulation eingegangen werden.

Empirische Verteilung:

Die Verteilung der Abfallmengen in der Simulation mittels einer empirischen Verteilung ist in jedem Fall den beiden anderen o. g. Verteilungen vorzuziehen, da diese Verteilung dem realen Abfallanfall eines Unternehmens im Simulationsmodell am Nächsten kommt. Allerdings setzt dies voraus, dass möglichst genaue Abfallmen-

gendaten, z. B. die täglichen angefallenen Abfallmengen des zu betrachtenden Unternehmens vorliegen und davon ausgegangen werden kann, dass der empirisch ermittelte Abfallanfall eines Betriebsjahres für das zu simulierende Betriebsjahr zugrunde gelegt werden kann. In den meisten Fällen sind jedoch nur die Gesamtjahresmengen bekannt, die sich aus den Transporten der abgefahrenen Abfallmengen der außerbetrieblichen Entsorgungslogistik ergeben. Bild 6.12 zeigt die Abfallmengenverteilung von hausmüllähnlichem Gewerbeabfall eines untersuchten Unternehmens. Insgesamt wurden die Tagesabfallmengen von 254 Betriebstagen ermittelt.

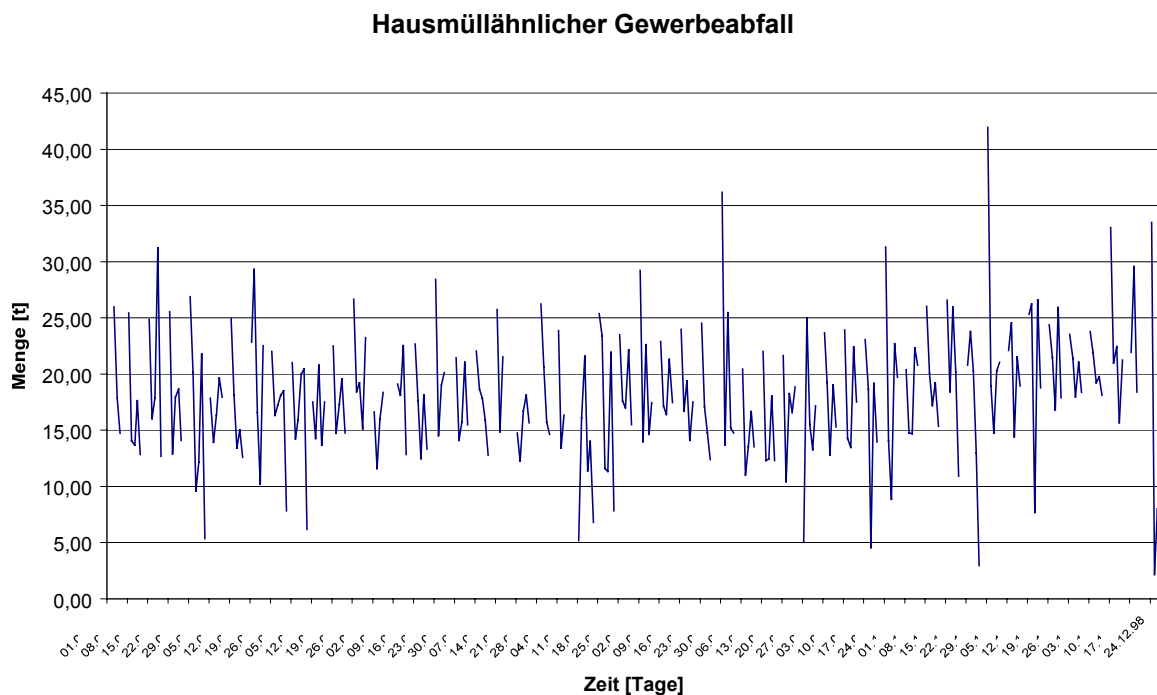


Bild 6.12: Abfallmengenverteilung über das gesamte Betriebsjahr am Beispiel “hausmüllähnlicher Gewerbeabfall” im betrachteten Unternehmen.

Da die ermittelten Tagesmengen sehr viele zahlenmäßig verschiedene Werte aufweisen, empfiehlt sich die sogenannte Klassenbildung. Dazu wird ein Intervall festgelegt, in dem alle Tagesmengen liegen. In diesem Fall wurde von einem Intervall von 0 – 45 t ausgegangen.

Das Intervall wurde anschließend in Teilintervalle, die als Klassenintervalle bezeichnet werden, unterteilt. Bild 6.13 zeigt die Klassenbildung mit Klassenintervallen der Größe einer Tonne.

| Klassen-Nr. | Klassenmitte | Klassenintervall | Absolute Häufigkeit | Relative Häufigkeit | kumuliert |
|-------------|--------------|------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| 1 | 0,5 | 0-1 | 1 | 0,0039 | 0,0039 |
| 2 | 1,5 | 1-2 | 0 | 0,0000 | 0,0039 |
| 3 | 2,5 | 2-3 | 2 | 0,0079 | 0,0118 |
| 4 | 3,5 | 3-4 | 0 | 0,0000 | 0,0118 |
| 5 | 4,5 | 4-5 | 1 | 0,0039 | 0,0157 |
| 6 | 5,5 | 5-6 | 3 | 0,0118 | 0,0275 |
| 7 | 6,5 | 6-7 | 2 | 0,0079 | 0,0354 |
| 8 | 7,5 | 7-8 | 4 | 0,0157 | 0,0511 |
| 9 | 8,5 | 8-9 | 2 | 0,0079 | 0,0590 |
| 10 | 9,5 | 9-10 | 1 | 0,0039 | 0,0630 |
| 11 | 10,5 | 10-11 | 3 | 0,0118 | 0,0748 |
| 12 | 11,5 | 11-12 | 5 | 0,0197 | 0,0945 |
| 13 | 12,5 | 12-13 | 14 | 0,0551 | 0,1496 |
| 14 | 13,5 | 13-14 | 14 | 0,0551 | 0,2047 |
| 15 | 14,5 | 14-15 | 23 | 0,0906 | 0,2952 |
| 16 | 15,5 | 15-16 | 14 | 0,0551 | 0,3504 |
| 17 | 16,5 | 16-17 | 15 | 0,0591 | 0,4094 |
| 18 | 17,5 | 17-18 | 24 | 0,0945 | 0,5039 |
| 19 | 18,5 | 18-19 | 21 | 0,0827 | 0,5866 |
| 20 | 19,5 | 19-20 | 14 | 0,0551 | 0,6417 |
| 21 | 20,5 | 20-21 | 14 | 0,0551 | 0,6968 |
| 22 | 21,5 | 21-22 | 17 | 0,0669 | 0,7637 |
| 23 | 22,5 | 22-23 | 16 | 0,0630 | 0,8267 |
| 24 | 23,5 | 23-24 | 11 | 0,0433 | 0,8700 |
| 25 | 24,5 | 24-25 | 5 | 0,0197 | 0,8897 |
| 26 | 25,5 | 25-26 | 10 | 0,0394 | 0,9291 |
| 27 | 26,5 | 26-27 | 7 | 0,0276 | 0,9567 |
| 28 | 27,5 | 27-28 | 0 | 0,0000 | 0,9567 |
| 29 | 28,5 | 28-29 | 2 | 0,0079 | 0,9645 |
| 30 | 29,5 | 29-30 | 3 | 0,0118 | 0,9763 |
| 31 | 30,5 | 30-31 | 0 | 0,0000 | 0,9763 |
| 32 | 31,5 | 31-32 | 2 | 0,0079 | 0,9842 |
| 33 | 32,5 | 32-33 | 0 | 0,0000 | 0,9842 |
| 34 | 33,5 | 33-34 | 2 | 0,0079 | 0,9921 |
| 35 | 34,5 | 34-35 | 0 | 0,0000 | 0,9921 |
| 36 | 35,5 | 35-36 | 0 | 0,0000 | 0,9921 |
| 37 | 36,5 | 36-37 | 1 | 0,0039 | 0,9960 |
| 38 | 37,5 | 37-38 | 0 | 0,0000 | 0,9960 |
| 39 | 38,5 | 38-39 | 0 | 0,0000 | 0,9960 |
| 40 | 39,5 | 39-40 | 0 | 0,0000 | 0,9960 |
| 41 | 40,5 | 40-41 | 0 | 0,0000 | 0,9960 |
| 42 | 41,5 | 41-42 | 1 | 0,0039 | 1,0000 |
| 43 | 42,5 | 42-43 | 0 | 0,0000 | 1,0000 |
| 44 | 43,5 | 43-44 | 0 | 0,0000 | 1,0000 |
| 45 | 44,5 | 44-45 | 0 | 0,0000 | 1,0000 |
| Summe | | | 254 | 1,0000 | |

Bild 6.13: Absolute und relative Häufigkeiten der Abfallmengenverteilung von hausmüllähnlichem Gewerbeabfall im betrachteten Unternehmen nach der Klassenbildung in 1-Tonnen-Teilintervallen.

Die Mitten dieser Intervalle heißen Klassenmitten. Alle Tagesmengen, die in ein solches Intervall fallen, bilden jeweils eine Klasse von Werten. Die Anzahl der Werte entspricht der absoluten Häufigkeit. Die Division der absoluten Häufigkeit durch die Anzahl der Betriebstage (254 Tage) ergibt die relative Häufigkeit, deren Verteilung in Bild 6.14 dargestellt ist /Kreyszig-1982, Schlittgen-1995/.

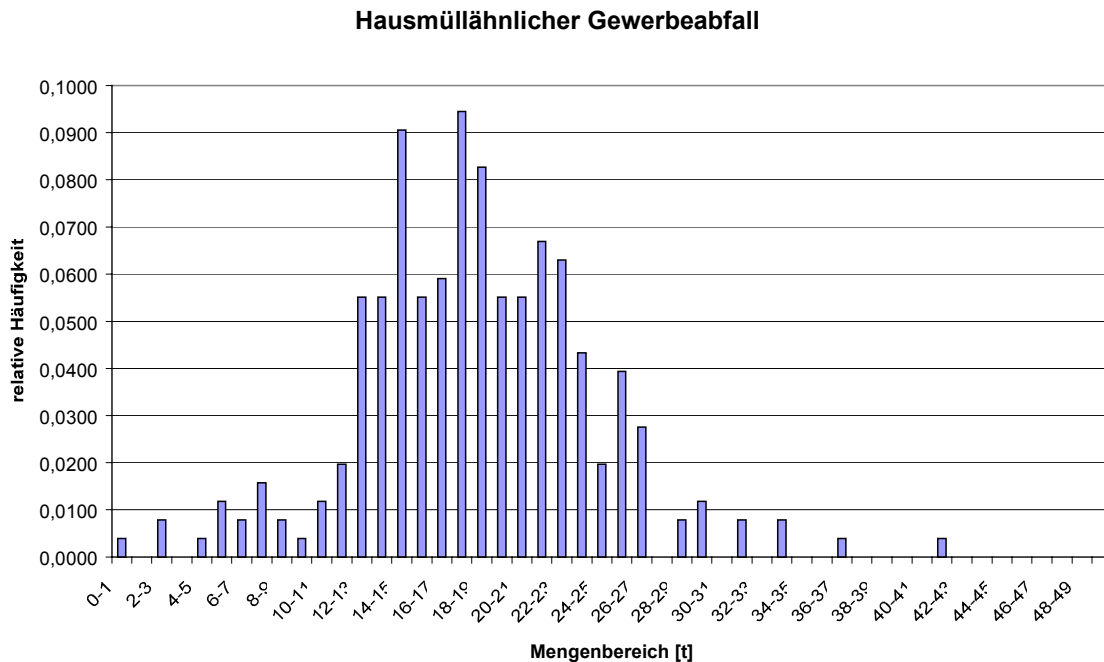


Bild 6.14: Häufigkeitsverteilung am Beispiel “hausmüllähnlicher Gewerbeabfall” im betrachteten Unternehmen mit einer zugrunde gelegten Klassierung, d. h. Einteilung der Realisierungsmöglichkeiten in Klassen.

In der Simulation wird die Abfallverteilung vor Beginn des Simulationsdurchlaufs durchgeführt. Dafür werden die kumulierten Werte der relativen Häufigkeit sowie die dazugehörigen Klassenmitten benötigt, die in die entsprechende Tabelle der Simulation eingegeben werden. Klassen mit einer absoluten Häufigkeit von Null bleiben unberücksichtigt. Anschließend muss noch die Anzahl der Betriebstage (254 Tage), deren Tagesabfallmengen ermittelt wurden, eingegeben werden.

Bei der Ausführung der Verteilung der Abfallmengen auf die Betriebstage werden mit Hilfe des Zufallsgenerators von Simple++ entsprechend der Anzahl Betriebstage 254 gleichverteilte Zufallszahlen im Intervall (0,1) gebildet. Fällt eine Zufallszahl in ein Intervall der kumulierten relativen Häufigkeiten (vgl. Bild 6.15), so erhält man die simulierte Abfallmenge (Klassenmitte).

Die Simulationstage müssen abschließend im Ereignisverwalter von Simple++ an die zu simulierenden Betriebstage angepasst werden, d. h. die Anzahl der zu simulierenden Tage (= Anzahl der Betriebstage) muss im Ereignisverwalter festgelegt werden.

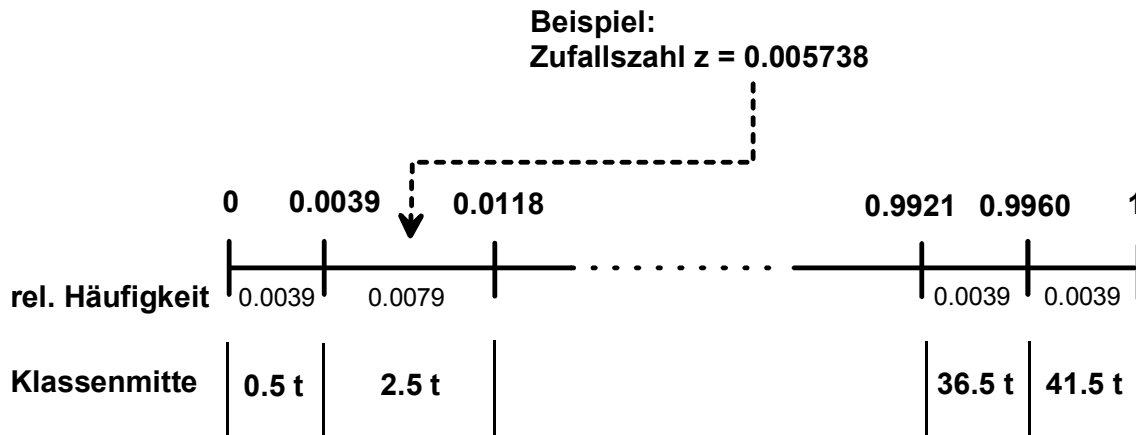


Bild 6.15: Einteilung des Intervalls (0,1) entsprechend den relativen Häufigkeiten in disjunkte Abschnitte (0,0.0039), [0.0039,0.0118), ... , [0.9960,1) in Anlehnung an /Domschke-1995/.

Stochastische Verteilung:

Ein gutes Modell für Häufigkeitsverteilungen die symmetrisch um den Mittelwert sind, und bei denen die Werte im mittleren Bereich konzentriert sind, ist die Normalverteilung.

Die Normalverteilung bietet sich somit für Abfallfraktionen an, die regelmäßig anfallen, und deren Abfallmengen um einen definierten Mittelwert schwanken. Hierzu können vor allem die Volumenabfälle (vgl. Kapitel 3.3.3) gezählt werden. Bild 6.14 zeigt die Häufigkeitsverteilung am Beispiel "hausmüllähnlicher Gewerbeabfall" (Restabfall). Die Häufigkeitsverteilung der täglichen Abfallmenge konzentriert sich um den Bereich von ca. 20 t und ist ungefähr zu diesem Mittelwert symmetrisch.

In SimdiAI wird mit Hilfe der Verteilungsfunktion in Simple++ die Normalverteilung des Abfallanfalls abgebildet. Hierzu wird die Anzahl der Schichten mit Abfallanfall benötigt. Der Erwartungswert bzw. Mittelwert μ der Normalverteilung ergibt sich dann aus dem Quotienten der Gesamtjahresabfallmenge und der Anzahl der Schichten mit Abfallanfall. Die Varianz σ^2 gibt an wie groß die Streuung um den Mittelwert ist. Je größer die Varianz desto größer ist die Streuung. In der Summe ergeben die entsprechend der Anzahl der Schichten generierten Abfallmengen wieder annähernd die Gesamtjahresabfallmenge.

7 Beurteilung der logistischen Qualität von innerbetrieblichen Entsorgungsstrukturen anhand von Simulationsergebnissen

Neben der Festlegung der Kennzahlen, die zur Beschreibung der logistischen Qualität herangezogen werden, ist die systematische Aufbereitung dieser Daten im Rahmen einer strukturierten Vorgehensweise notwendig, um eine aussagekräftige Beurteilung der Simulationsergebnisse zu gewährleisten.

Die systematisch aufbereiteten Daten müssen anschließend vom Anwender analysiert und interpretiert werden, um die Qualität der durchgeführten Planung in Abhängigkeit von der Zielsetzung beurteilen zu können, d. h. logistische Stärken und Schwächen sowie Potentiale aufzudecken /Kuprat-91/.

7.1 Darstellung und Diskussion der Simulationsergebnisse

7.1.1 Messgrößen während des Simulationsdurchlaufs

Nachdem alle erforderlichen Eingabeparameter des Simulationsmodells festgelegt und eingegeben wurden (vgl. Kapitel 5.4.4), kann die Simulation gestartet werden. Dazu wird der sogenannte Ereignisverwalter von Simple++ aufgerufen. Durch einen Reset werden alle Reset-Methoden, die in der Hierarchie unter dem Ereignisverwalter liegen, aufgerufen und z. B. die Daten in Tabellen von vorausgegangenen Simulationsdurchläufen gelöscht, die Eingabeparameter in die entsprechenden Bausteine geschrieben (z. B. die Fahrgeschwindigkeit der Transportmittel, die Anzahl der Abfallsammelbehälter in den Hallen, die Weglängen der festen Wegstrecken, etc.) und die Wegematrix in den Hallen berechnet. Anschließend kann die Simulation gestartet werden.

Simuliert wird ein gesamtes Betriebsjahr = Simulationsjahr:

$$12 \text{ Monate} \times 4 \text{ Wochen} \times 7 \text{ Tage} = 336 \text{ Simulationstage.}$$

Ein Simulationstag besteht aus 3 Schichten (Früh-, Spät- und Nachtschicht), so dass maximal insgesamt 1008 Schichten simuliert werden können. An welchen Tagen und zu welchen Schichten der Abfall einer Abfallfraktion anfällt, wird bei der Parameter-eingabe der Abfallarten und -mengen festgelegt (vgl. Kapitel 5.4.4 Die Modellbildung, *Unterm modul Abfallmanagement*). Im Planspiel wurde von der Standardeinstellung ausgegangen. Der Abfallanfall aller Abfallfraktionen ist konstant verteilt und fällt an den Wochentagen Montag - Freitag zur Frühschicht an. Dies bedeutet, dass insge-

samt 240 Simulationstage mit Abfallanfall (12 Monate x 4 Wochen x 5 Tage = 240 Simulationstage) simuliert werden¹³.

Die Dauer eines Simulationsexperiments variiert stark und ist von der Komplexität des Simulationsmodells abhängig. Entscheidenden Einfluss haben die Anzahl der Abfallfraktionen und deren Größenordnung, sowie die Anzahl der für die Sammlung der Abfälle bereitgestellten Sammel- und Transportmittel in der Simulation. Im Planspiel benötigt ein Simulationsexperiment, d. h. die Simulation von einem gesamten Simulationsjahr mit den Eingabeparametern aus Bild 5.18 ca. 8-10 min (Standard-PC: 800 MHz-Prozessor, 128 MB Arbeitsspeicher).

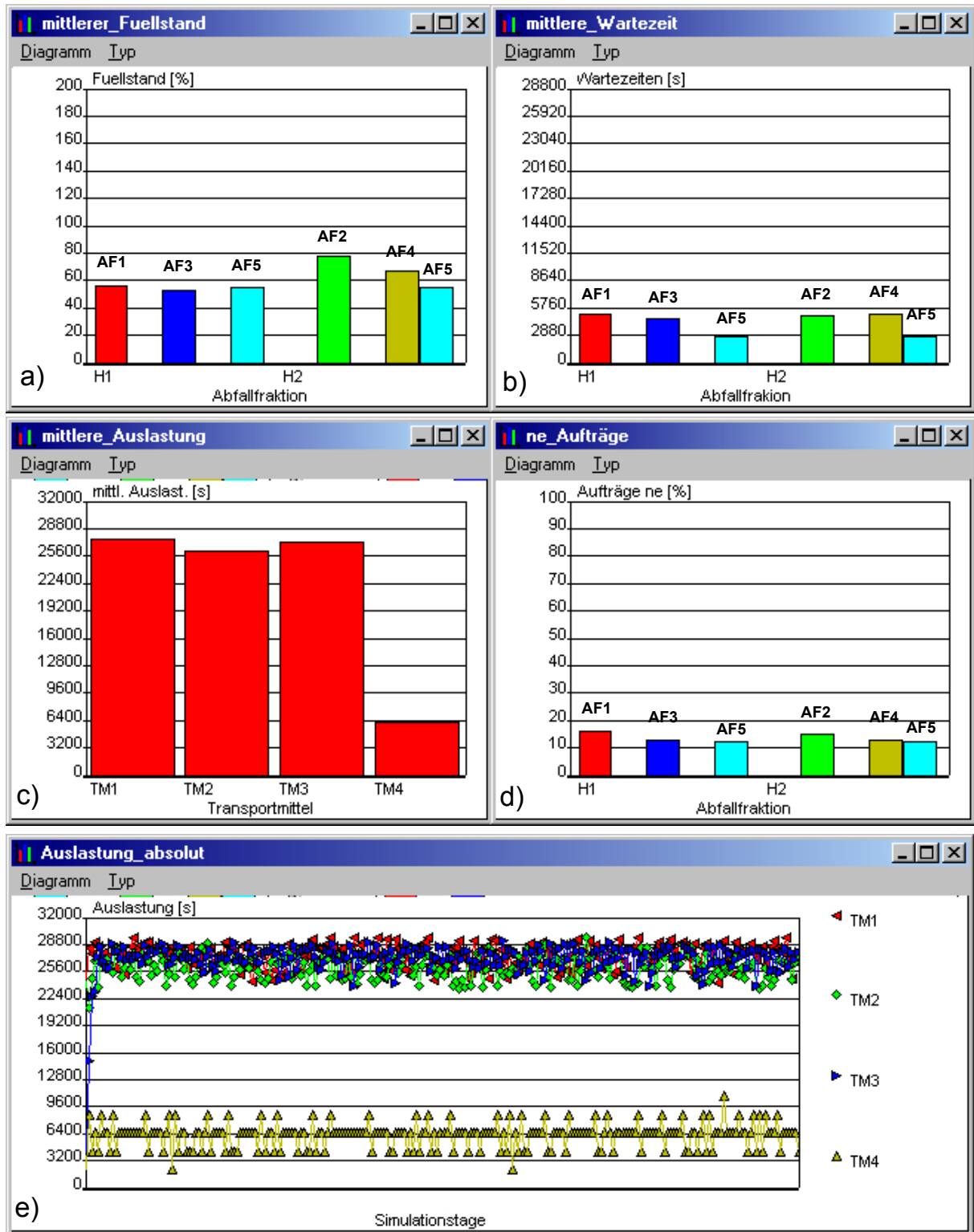
Nachdem die Simulation gestartet wurde, können bereits während des Simulationsablaufs die folgenden Messgrößen der Simulation entnommen werden, vgl. auch hierzu die Kapitel 6.3 - 6.6 (Simple++ bietet dabei die Möglichkeit die Messgrößen in Diagrammform zu visualisieren):

- mittlerer Füllstand der Abfallsammelbehälter in der Halle (mFS), Bild 7.1 a)
- mittlere Wartezeit der Sammelbehälter bis zur Leerung (mWZ), Bild 7.1 b)
- mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel (mAusl), Bild 7.1 c)
- mittlerer Anteil nicht erledigter Aufträge (mAne) , Bild 7.1 d)
- absolute Auslastung pro Einsatz der Simulationsfahrzeuge (Ausl), Bild 7.1. e)

Diese Kennzahlen geben bereits während des Simulationsexperiments Aufschluss über die Qualität der im Simulationsmodell abgebildeten Abfalllogistik. Anhand der Füllstandanzeige der Sammelbehälter und der Auslastung der Simulationsfahrzeuge pro Simulationstag ist z. B. sehr schnell erkennbar, welcher Aufwand für die Sammlung und den Transport der Abfälle entsteht und ob die bereitgestellten Sammelbehälterkapazitäten ausreichen.

Bei mittleren Füllständen von über 100%, die im Allgemeinen mit einer 100%-Auslastung der Simulationsfahrzeuge einhergehen, sind natürlich die entsprechenden Sammel- und Transportmittel der Simulation nicht mehr in der Lage, das zugeleitete Abfallaufkommen zu bewältigen. Die Simulation wird in diesem Fall abgebrochen und die Eingabeparameter der Abfalllogistik entsprechend geändert. Welche Möglichkeiten zur Optimierung hierfür in Frage kommen, soll im Kapitel 7.1.3 „Optimierungsansätze im Planspiel“ beispielhaft vorgestellt werden.

¹³ Die effektiven Simulationstage und -schichten richten sich außerdem noch nach den Einsatzzeiten der Sammel- und Transportmittel in der Simulation. So besteht z. B. die Möglichkeit, dass der Abfallanfall in der Frühschicht erfolgt, die Sammlung der Abfälle durch die Sammel- und Transportmittel aber erst in der Spätschicht. In diesem Fall werden insgesamt 2 Schichten pro Simulationstag simuliert.



- H1, H2 Halle 1, Halle 2
 AF1...AF5 Abfallfraktion 1 - 5 (PPK, Folie, Restabfall, Holz, Fe-Schrott)
 TM1, TM2 Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren
 TM3 Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren
 TM4 Poolfahrzeug im Wechselverfahren

Bild 7.1: Visualisierte Kennzahlen während des Simulationsablaufs.

7.1.2 Ergebniskennzahlen nach Ablauf der Simulation

Nach Beendigung eines Simulationsexperiments (vollständiger Simulationsdurchlauf) stehen sämtliche während der Simulation berechneten Kennzahlen im Netzwerk „statistic“ zur Verfügung. Dieser Baustein enthält wiederum 6 Bausteine (Netzwerke), in denen die Kennzahlen in tabellarischer Form abgelegt sind (vgl. Bild 7.2).

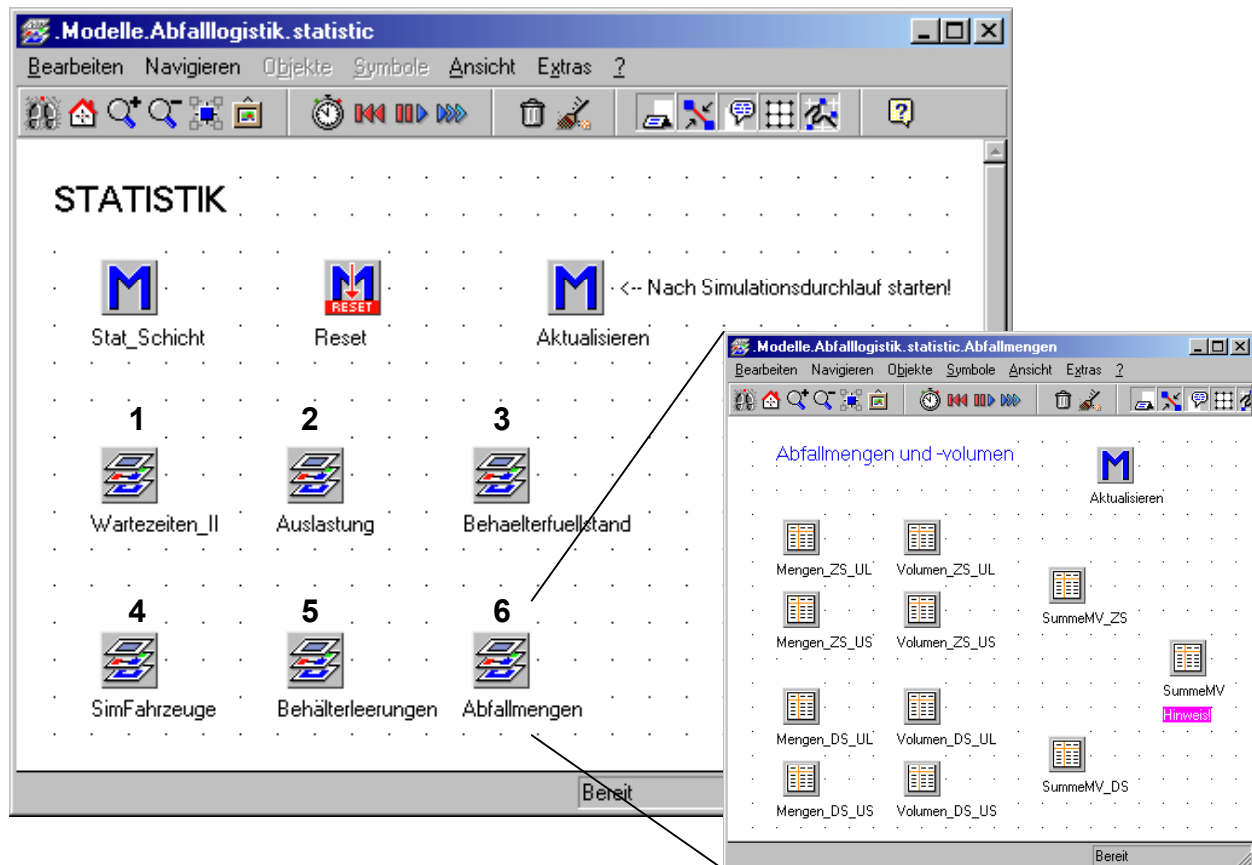


Bild 7.2: Statistik-Baustein zur Berechnung und Ablage der Ergebniskennzahlen in SimdiAI.

Öffnet man z. B. das Netzwerk “Abfallmengen” wie in Bild 7.2 dargestellt, erhält man die Tabellenbausteine, in denen die Abfallmengen und -volumen der zentralen und dezentralen Senken aufgelistet sind.

Die Ergebniskennzahlen werden dabei thematisch in die Kategorien

1. Wartezeiten der Sammelbehälter,
2. Auslastung der Sammel- und Transportmittel/ Poolfahrzeuge,
3. Behälterfüllstand,
4. Simulationsfahrzeuge,
5. Behälterleerungen und
6. Abfallmengen und –volumen

eingeteilt.

Die Tabelle in Bild 7.3 zeigt die Ergebniskennzahlen von SimdiAI in der Übersicht aufgeteilt nach den o. g. Kategorien (die im nachfolgenden Text verwendeten Abkürzungen der Ergebniskennzahlen gehen aus der Spalte "Codierung" hervor):

| Ergebniskennzahlen nach Ablauf eines Simulationsexperiments | | | |
|---|------------------------|------------------|--------------------------|
| Kategorie | Einheit | Codierung | Bemerkung |
| 1 Wartezeiten der Sammelbehälter | | | |
| 1.1 Anzahl erledigter Aufträge pro Einsatz der Simulationsfahrzeuge | [-] | ZeA | vgl. Kap. 6.6 |
| 1.2 Anzahl nicht erledigter Aufträge pro Einsatz der Simulationsfahrz. | [-] | ZneA | vgl. Kap. 6.6 |
| 1.3 Anteil nicht erledigter Aufträge pro Einsatz der Simulationsfahrz. | [%] | Ane | vgl. Kap. 6.6 |
| 1.4 mittlerer Anteil nicht erledigter Aufträge | [%] | mAne | vgl. Kap. 6.6 |
| 1.5 absolute Wartezeit für jeden Sammelbehälter | [s] | t _{wz} | vgl. Kap. 6.3 |
| 1.6 mittlere Wartezeit | [s] | mWZ | vgl. Kap. 6.3 |
| 2 Auslastung der Sammel- und Transportmittel/ Poolfahrzeuge | | | |
| 2.1 absolute Auslastung pro Einsatz der Simulationsfahrzeuge | [%], [s] | Ausl | vgl. Kap. 6.4 |
| 2.2 mittlere Auslastung | [%], [s] | mAusl | vgl. Kap. 6.4 |
| 3 Behälterfüllstand | | | |
| 3.1 Füllstand nach einer Schicht mit Abfallanfall | [%] | FS | vgl. Kap. 6.5 |
| 3.2 mittlerer Füllstand | [%] | mFS | vgl. Kap. 6.5 |
| 4 Simulationsfahrzeuge | | | |
| 4.1 Anzahl der Fahrten zur Halle | [-] | ZF_H | |
| 4.2 Anzahl der Fahrten zur dezentralen Senke/ Poolstelle | [-] | ZF_DS | |
| 4.3 gesamte transportierte Abfallmenge pro Abfallfraktion | [t] | m_Fz | |
| 4.4 gesamtes transportiertes Abfallvolumen pro Abfallfraktion | [m ³] | V_Fz | |
| 5 Behälterleerungen | | | |
| 5.1 Behälterleerungen in der Halle | | | |
| 5.1.1 Anzahl Leerungen pro Fraktion und Halle | [-] | ZL_H | |
| 5.2 Behälterleerungen an der Senke | | | |
| 5.2.1 Anzahl Leerungen der zentralen Senke (UL/US) | [-] | ZL_ZS | |
| 5.2.2 Anzahl Leerungen der dezentralen Senke (UL/US) | [-] | ZL_DS | |
| 5.2.3 Anzahl Leerungen an der Poolstelle (UL/US) | [-] | ZL_P | |
| 6 Abfallmengen und -volumen | | | |
| 6.1 an der zentralen Senke (UL/US) | [t], [m ³] | mzS, VzS | |
| 6.2 an der dezentralen Senke (UL/US) | [t], [m ³] | mdS, VdS | |
| 6.3 an der Poolstelle (UL/US) | [t], [m ³] | mP, VP | |
| UL = Umladen, US = Umschlagen | | | |
| Wichtige abgeleitete Verhältniskennzahlen | | | Bemerkung |
| A) mittlere Anzahl Behälterleerungen pro Fahrt zur Halle | | | 5.1.1 / 4.1 |
| B) mittlere Anzahl der Fahrten zur Halle pro Einsatz der Simulationsfahrz. | | | 4.1 / Anzahl Einsätze *) |
| C) mittlere Anzahl der Behälterleerungen pro Schicht | | | 5.1.1 / Anzahl Schichten |
| D) mittlere Zeit pro Sammeltour | | | 2.2 / B) |
| E) Anzahl Fahrten zur Halle pro Schicht | | | 4.1 / Anzahl Schichten |
| F) Verhältniszahl aus Anzahl Fahrten zur dezentralen Senke/ Poolstelle und Anzahl Fahrten zur Halle | | | 4.2 / 4.1 |

*) Im Planspiel entspricht die Anzahl der Einsätze der Sammel- und Transportmittel der Anzahl Schichten mit Abfallanfall.

Bild 7.3: Ergebniskennzahlen nach einem Simulationsexperiment in SimdiAI.

Im Folgenden wird mit (mittlerer) Auslastung zum einen die tatsächlich entstandene Sammel- und Transportleistung des jeweiligen Sammel- und Transportmittels in der

Simulation als Sammel- und Transportzeit bezeichnet. Zum anderen wird wie in Kapitel 6.4 beschrieben mit Auslastung das Verhältnis aus der Summe der tatsächlich während eines Bezugszeitraums entstehenden Sammel- und Transportleistungen zur maximal möglichen Sammel- und Transportleistung des Fahrzeugs bezeichnet und in Prozent angegeben. Die Angabe der Auslastung als Sammel- und Transportzeit in Sekunden wurde wegen der übersichtlicheren Darstellung der Ergebniskennzahl im Diagramm gewählt.

7.1.3 Optimierungsansätze im Planspiel

Im Folgenden wird beispielhaft gezeigt, durch welche Maßnahmen (insgesamt vier Optimierungsansätze) die Abfalllogistik im Planspiel optimiert werden kann. Die Vorgehensweise besteht darin, zunächst den tatsächlichen Zeitaufwand des jeweiligen Sammel- und Transportmittels unter Beibehaltung der Sammel- und Transportleistung zu reduzieren. Die Auslastung der Simulationsfahrzeuge wird dabei nur soweit verringert, dass die Sammlung und Abfuhr der anfallenden Abfälle jederzeit noch gewährleistet ist und die o. g. Ergebniskennzahlen im zulässigen Bereich liegen, d. h. die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel, der mittlere Füllstand, die mittlere Wartezeit der Sammelbehälter und der Anteil nicht erledigter Aufträge überschreiten nicht die kritische Grenze (Bedingung: <100%).

Die Ausgangssituation im Planspiel ist durch die Eingabeparameter aus Bild 5.18 beschrieben. Als Ergebniskennzahlen zur Beurteilung der Optimierung werden die Messgrößen aus Kapitel 7.1.1 zu Grunde gelegt. Die Ergebniskennzahlen des Planspiels in der Ausgangssituation gehen aus Bild 7.1 hervor, in dem die Messgrößen in Diagrammform dargestellt sind (vgl. auch Anhang A5a) und A5b)).

Ein Optimierungsansatz besteht darin, dass jeweils ein bzw. maximal zwei Parameter gegenüber dem vorhergehenden Simulationsexperiment verändert wird bzw. werden und das Resultat in Form der Ergebniskennzahlen im Diagramm dargestellt wird.

Sämtliche Eingabeparameter und Ergebniskennzahlen der folgenden Optimierungsansätze sind im Anhang A5 aufgeführt.

Optimierungsansatz 1, vgl. auch Anhang A5c) und A5d):

Das Sammel- und Transportmittel TM3 sammelt die Abfallfraktion AF5 (Fe-Schrott) im Wechselverfahren. Der Anteil der Abfallmenge von AF5 der in Halle 2 anfällt, wird im Planspiel der Ausgangssituation zentral gesammelt, d. h. die innerbetriebliche Senke liegt zentral. Da das Sammel- und Transportmittel TM3 in einer sogenannten Pendeltour (Behälterkapazität $B_k=1$) sammelt, entsteht eine hohe Anzahl an Fahrten vom Depot zur Halle und wieder zurück zur zentralen Senke (Ergebniskennzahl 4.1,

vgl. Bild 7.3). Durch die Einführung einer dezentralen Sammlung der Abfallfraktion AF5 aus Halle 2 kann der Zeitaufwand des Sammel- und Transportmittels TM3 um ca. 18% reduziert werden (28800 Sekunden = 8 Stunden). Die geänderten Eingabeparameter gegenüber den Eingabeparametern der Ausgangssituation im Planspiel sind im Anhang A5c) gekennzeichnet (gestrichelt umrandet). Die Ergebniskennzahlen des Optimierungsansatzes 1 gehen aus Anhang A5d) hervor. Beispielsweise konnte durch die dezentrale Sammlung der Abfallfraktion AF5 aus Halle 2 die mittlere Wartezeit der Sammelbehälter aus Halle 1 und 2 für die Abfallfraktion AF5 um ca. 65% reduziert werden. Durch die dezentrale Sammlung verringert sich der mittlere Anteil nicht erledigter Aufträge um nahezu 90%.

Optimierungsansatz 2, vgl. auch Anhang A5e) und A5f):

Der Zeitaufwand des Sammel- und Transportmittels TM3 kann durch die Erhöhung der Behälterkapazität weiter reduziert werden. Im Optimierungsansatz 2 wurde für das Sammel- und Transportmittel TM3 die Behälterkapazität von 1 auf 3 erhöht, d. h. das TM3 kann nun 3 Behälter pro Sammeltour wechseln; die Pendeltour entfällt somit. Durch diesen zusätzlichen Optimierungsansatz kann der Zeitaufwand des Sammel- und Transportmittels TM3 bei konstanter Sammel- und Transportleistung insgesamt im Vergleich zur Ausgangssituation um mehr als die Hälfte reduziert werden. Die Messgrößen und Kennzahlen mittlerer Füllstand, mittlerer Wartezeit der Sammelbehälter und Anteil nicht erledigter Aufträge liegen weiterhin im optimalen Bereich, vgl. Anhang A5f).

Optimierungsansatz 3, vgl. auch Anhang A5g) und A5h):

Im Optimierungsansatz 3 wird bei der Abfallfraktion AF2 von zentraler Sammlung auf dezentrale Sammlung umgestellt, d. h. es entfällt die zentrale Senke ZS3 und es kommt die dezentrale Senke DS5 hinzu. Zusätzlich werden die Behältervolumen der Sammelbehälter für die Abfallfraktionen AF1 – AF4 verdreifacht (von 120l auf 360l) und die Anzahl der Sammelbehälter für diese Fraktionen halbiert. Der Zeitaufwand der Sammel- und Transportmittel TM1 und TM2 konnte durch diese Maßnahmen jeweils um ca. 35% reduziert werden. Durch die dezentrale Sammlung der Abfallfraktion AF2 reduziert sich der mittlere Füllstand von 75% auf 62%, die mittlere Wartezeit und der Anteil nicht erledigter Aufträge verringern sich nur geringfügig. Bei den Abfallfraktionen AF1, AF3 und AF4 sind geringe Zunahmen durch die modifizierten Sammelsysteme beim mittleren Füllstand, bei der mittleren Wartezeit und beim Anteil nicht erledigter Aufträge zu verzeichnen. Alle Ergebniskennzahlen liegen weiterhin im optimalen Bereich.

Optimierungsansatz 4, vgl. auch Anhang A5i) und A5j):

Beim letzten Optimierungsansatz wird versucht die Einsatzzeiten der Sammel- und Transportmittel bzw. des Poolfahrzeugs auf bestimmte Einsatztage zu beschränken, so dass der Personaleinsatz reduziert werden kann. Von den insgesamt 5 Tagen Abfallanfall (Montag - Freitag) ist das Sammel- und Transportmittel TM1 nun nur noch am Dienstag und Donnerstag im Einsatz. Das Sammel- und Transportmittel TM2 wird nur noch am Montag, Mittwoch und Freitag eingesetzt. Die Einsatzzeiten von TM1 und TM2 überschneiden sich somit nicht. Gegenüber der Ausgangssituation könnte somit ein Fahrer für die innerbetriebliche Sammlung und den Transport der Abfälle eingespart werden. Entsprechendes gilt für das Sammel- und Transportmittel TM3 und das Poolfahrzeug TM4, das jedoch nur an einem Tag (Donnerstag) in der Woche zum Einsatz kommt. Betrachtet man die absolute Auslastung über die Simulationstage im Anhang A5j) Bild e), so liegen beim TM2 und TM3 die Werte relativ weit auseinander. Dies liegt daran, dass jeweils am Montag die Auslastung geringer ist, da am Freitag das Sammel- und Transportmittel im Einsatz war und am Samstag und Sonntag kein Abfall anfällt. Es liegt also zwischen Freitag und Montag kein Tag, an dem Abfall anfällt und das Sammel- und Transportmittel nicht im Einsatz ist. Die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel ist wieder im optimalen Bereich, d. h. es werden mittlere Auslastungen zwischen 75-89% erreicht. Der mittlere Füllstand, die mittlere Wartezeit sowie der Anteil nicht erledigter Aufträge sind generell für alle Abfallfraktionen angestiegen. Die Abfallfraktionen AF1 und AF2 erreichen beim mittleren Füllstand kritische Werte, d. h. sie stoßen an die 100%-Marke bzw. überschreiten diese, was bedeutet, dass nicht zu jedem Zeitpunkt in der Simulation gewährleistet ist, dass die entsprechenden Sammelbehälter befüllt werden können. Aus diesem Grund wird empfohlen einen weiteren Einsatztag des TM1 pro Woche einzuplanen.

7.2 Validierung der Simulationsergebnisse

Unter der Validierung von Simulationsexperimenten versteht man die Überprüfung der Analogie zwischen Simulationsmodell und Realität. Diese Validierung kann prinzipiell in zwei Verfahren unterschieden werden. Bei bestehenden Materialflusssystemen kann ein Vergleich der Daten des realen Prozesses mit den Ergebnissen der Simulation durchgeführt werden. Eine mathematisch exakte Übereinstimmung kann dabei aber nicht erwartet werden. In Kapitel 7.2.2 werden die Simulationsergebnisse einem realen Beispiel gegenübergestellt und die Abweichung des Simulationsexperiments diskutiert.

Wenn keine Vergleichsdaten zur Verfügung stehen, wie z. B. bei der Neuplanung eines innerbetrieblichen Entsorgungskonzepts, gestaltet sich die Validierung wesent-

lich schwieriger. Nach Kuhn können dabei die folgenden Möglichkeiten zur Modellvalidierung eingesetzt werden /Kuhn-1993/:

- Ablaufkontrolle mit Hilfe der Animation:
Die Ablaufkontrolle bietet sich an, wenn nur ein bestimmter Teil oder Abschnitt eines Prozesses geprüft werden soll. Für die Überprüfung des gesamten Prozesses ist diese Methode allerdings zu umständlich.
- Deterministischer Test:
Hier werden möglichst alle stochastischen Prozesse abgeschaltet. In Kombination mit dem Parameterstest (s. weiter unten) können die Simulationsergebnisse leichter interpretiert werden.
- Mittelwertbetrachtung
- Grenzleistungsbetrachtung:
Die Eingangsdaten werden in diesem Fall so gewählt, dass die Ausgabeparameter ihre Maximalwerte erreichen, z. B. eine mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel von 100%.
- Parameterstest:
Es wird z. B. jeweils nur eine Abfallfraktion aus einer Halle gesammelt und von einem Sammel- und Transportmittel bedient.

7.2.1 Allgemeine Validierung

Mit Hilfe der Kombination des deterministischen Tests und des Parameterstests sollen die Simulationsergebnisse in diesem Kapitel allgemein interpretiert werden.

Es werden hierfür zwei Simulationsmodelle (Variante 1 und 2) aufgestellt, deren Sammel- und Transportlogistik einfach gestaltet sind und somit entsprechend den Voraussetzungen für einen Parameterstest eine Interpretation der Ergebnisse ermöglichen. Der Abfallanfall der Jahresmengen wird konstant verteilt (Deterministischer Test) und fällt einmal pro Simulationstag in der Frühschicht an. Insgesamt werden 240 Tage simuliert. Eine Zusammenfassende Beurteilung der Validierung nach Variante 1 und 2 erfolgt am Ende des Kapitels 7.2.2.

Simulationsmodell Variante 1:

Die Validierung der Simulationsergebnisse nach Variante 1 hat das Ziel, die in Kapitel 7.1.2 dargestellten Ergebniskennzahlen eines Simulationsexperiments in Abhängigkeit der Abfallmenge zu interpretieren. Dazu wird vor allem das Verhalten der Sammel- und Transportmittel in Bezug auf deren Auslastung und deren Sammelstrategie in Abhängigkeit der Abfallmenge beurteilt. Ferner werden die mittleren Füll-

stände der Sammelbehälter sowie deren Wartezeiten bis zur Leerung in Abhängigkeit der Abfallmenge und des Sammel- und Transportmittels untersucht.

Insgesamt werden fünf unterschiedliche Sammel- und Transportmittel im Simulationsmodell der Variante 1 abgebildet. Es handelt sich dabei um vier Sammel- und Transportmittel mit der Sammelstrategie im Wechselverfahren und ein Sammel- und Transportmittel mit der Sammelstrategie im Umleerverfahren. Die Behälterkapazität der Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren variiert. Die Kapazität (Ladevolumen) des Sammel- und Transportmittels im Umleerverfahren entspricht dabei dem Ladevolumen des Sammel- und Transportmittels im Wechselverfahren mit der höchsten Behälterkapazität. Jedes Sammel- und Transportmittel sammelt jeweils nur eine Abfallfraktion in der Halle 1. Die Umleer- bzw. Wechselzeiten in der Halle bzw. an der Senke wurden für alle Sammel- und Transportmittel gleich groß gewählt. Alle Abfallfraktionen werden zentral gesammelt. Somit sind auch die Entfernungen vom Depot bzw. von der zentralen Senke zur Halle und zurück für alle Sammel- und Transportmittel gleich groß. Sämtliche Eingabeparameter für das Simulationsmodell der Variante 1 können aus Bild 7.4 entnommen werden.

| Parameterbezeichnung | Eingabewerte | | | | |
|---|--|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 |
| Abfallart - Kürzel | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 |
| Abfallmenge | variabel | variabel | variabel | variabel | variabel |
| Dichte (un-/verdichtet) [t/m ³] | 0,2 / 0,4 | 0,2 / 0,4 | 0,2 / 0,4 | 0,2 / 0,4 | 0,2 / 0,4 |
| Abfallanfall in | Halle 1 | Halle 1 | Halle 1 | Halle 1 | Halle 1 |
| Behälteranzahl | 25 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Behältervolumen [l] | 240 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Gesamtvolumen [l] | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 |
| Sammelverfahren | zentral | zentral | zentral | zentral | zentral |
| Entfernung von Depot/ zentr. Senke zur Halle1 [m] | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| AF wird gesammelt von | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
| Sammelstrategie | Umleeren | Wechseln | Wechseln | Wechseln | Wechseln |
| Behälterkapazität/ Ladevolumen [l] | 1600 l | 1 (x 400 l) = 400 l | 2 (x 400 l) = 800 l | 3 (x 400 l) = 1200 l | 4 (x 400 l) = 1600 l |
| Geschwindigkeit [m/s] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Umleer-/Wechselzeiten [s] in der Halle an der zentralen Senke | 20 60 | 20 60 | 20 60 | 20 60 | 20 60 |
| Einsatzzeiten der TM | Mo, Di, Mi, Do, Fr / Frühschicht / 8:00 h = 28.800 s | | | | |

AF1-AF5 Abfallfraktion 1- 5

TM1-TM5 Sammel- und Transportmittel 1 - 5

Bild 7.4: Eingabeparameter im Simulationsmodell der Variante 1.

Um die Abhängigkeit der Ergebniskennzahlen von der Abfallmenge bewerten zu können, wurden mehrere Simulationsexperimente (Simulationsreihen) durchgeführt und jeweils die Abfallmenge um einen bestimmten Betrag erhöht. Bild 7.5 zeigt die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel und die mittlere Wartezeit der Sammelbehälter in Abhängigkeit der Abfallmenge.

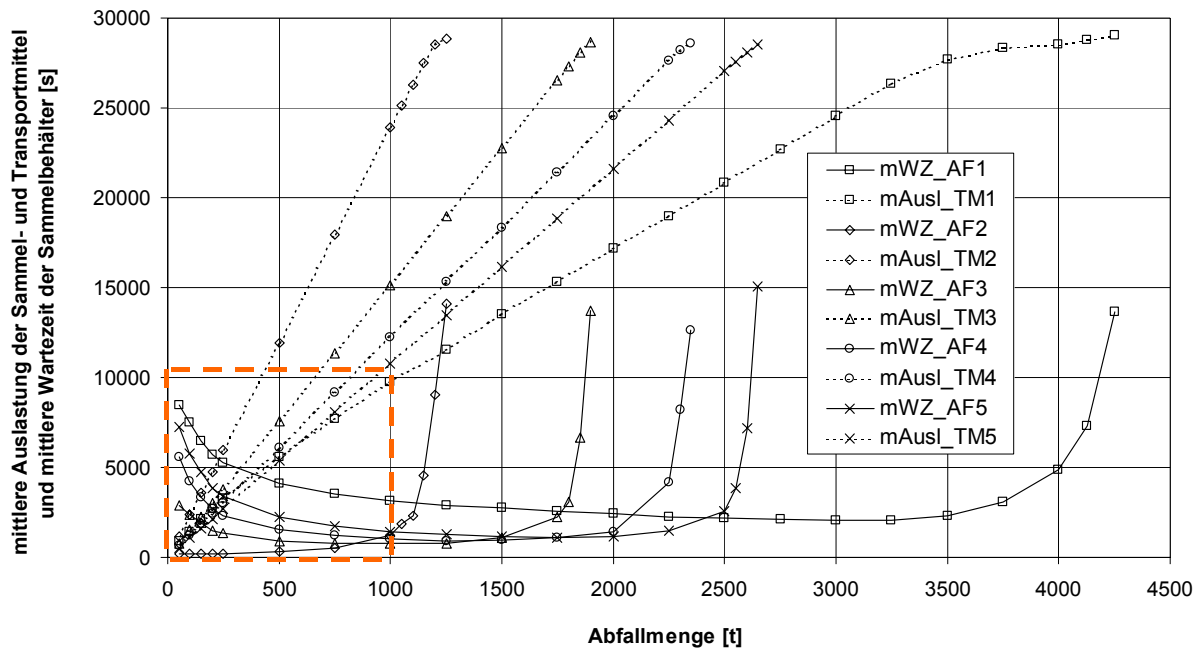


Bild 7.5: Mittlere Auslastung (mAusl) der Sammel- und Transportmittel (TM) und mittlere Wartezeit der Sammelbehälter (mWZ) im Simulationsmodell der Variante 1.

Die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel steigt mit zunehmender Abfallmenge nahezu linear an und erreicht bei 28800s ihren höchsten Wert. Die Sammel- und Transportmittel haben dann eine 100%-Auslastung erreicht (vgl. Kapitel 6.4). Wie zu erwarten, ist der Anstieg der Auslastung bei Sammel- und Transportmitteln mit geringer Behälterkapazität (Wechselverfahren: TM2-TM5) größer. Das Sammel- und Transportmittel TM2, das in einer sogenannten Pendeltour sammelt (vgl. hierzu Bild 6.7), benötigt zur Sammlung der angefallenen Abfallmenge entsprechend mehr zeitintensive Fahrten von der Halle zur zentralen Senke und wieder zurück, als die Sammel- und Transportmittel mit höherer Behälterkapazität. Dadurch erreicht das Sammel- und Transportmittel TM2 bereits bei einer jährlichen Abfallmenge von ca. 1200t seine maximale Auslastung von 100%.

Das Sammel- und Transportmittel TM1, das im Umleerverfahren sammelt, und das Sammel- und Transportmittel TM5, das im Wechselverfahren sammelt, haben jeweils das gleiche Ladevolumen (vgl. Bild 7.4). Sie unterscheiden sich daher nur im Sammelverfahren. Trotzdem weist das Sammel- und Transportmittel TM1 einen geringeren Anstieg der Auslastung bei größeren Abfallmengen auf als das TM5. Die maxi-

male Auslastung des TM1 wird erst bei einer jährlichen Abfallmenge von ca. 4000t erreicht, wohingegen die maximale Auslastung des TM5 bereits bei ca. 2600t erreicht wird. Theoretisch benötigen beide Sammel- und Transportmittel gemäß ihrer Eigenschaften gleich viele Fahrten zur Halle und zurück zur zentralen Senke, um das Abfallaufkommen in der Halle pro Schicht zu bewältigen.

Dies bestätigt das Diagramm in Bild 7.6, in dem die mittlere Anzahl an Fahrten zur Halle und zurück pro Einsatzschicht des Sammel- und Transportmittels über der Abfallmenge aufgetragen ist. Die Kennlinie des TM1 ist nahezu deckungsgleich mit der Kennlinie des TM5.

Trägt man die mittlere Zeit pro Sammeltour über die Abfallmenge auf, so wird deutlich, weshalb beim TM1 (Umleerverfahren) der Anstieg der Auslastung bei größeren Abfallmengen geringer ist als beim TM5. Mit zunehmender Abfallmenge sinkt nämlich die mittlere Zeit pro Sammeltour beim Sammel- und Transportmittel TM1, während beim Wechselverfahren der Mittelwert der Zeit pro Sammeltour über einen Bezugszeitraum eines Betriebsjahres (Simulationsjahr) betrachtet unabhängig von der Abfallmenge bleibt (vgl. Bild 7.7). Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Umleerverfahren, die zurückgelegten Wegstrecken zur Sammlung der Abfälle in der Halle mit zunehmender Abfallmenge kürzer werden, was wiederum bedeutet, dass die Zeit pro Sammeltour abnimmt.

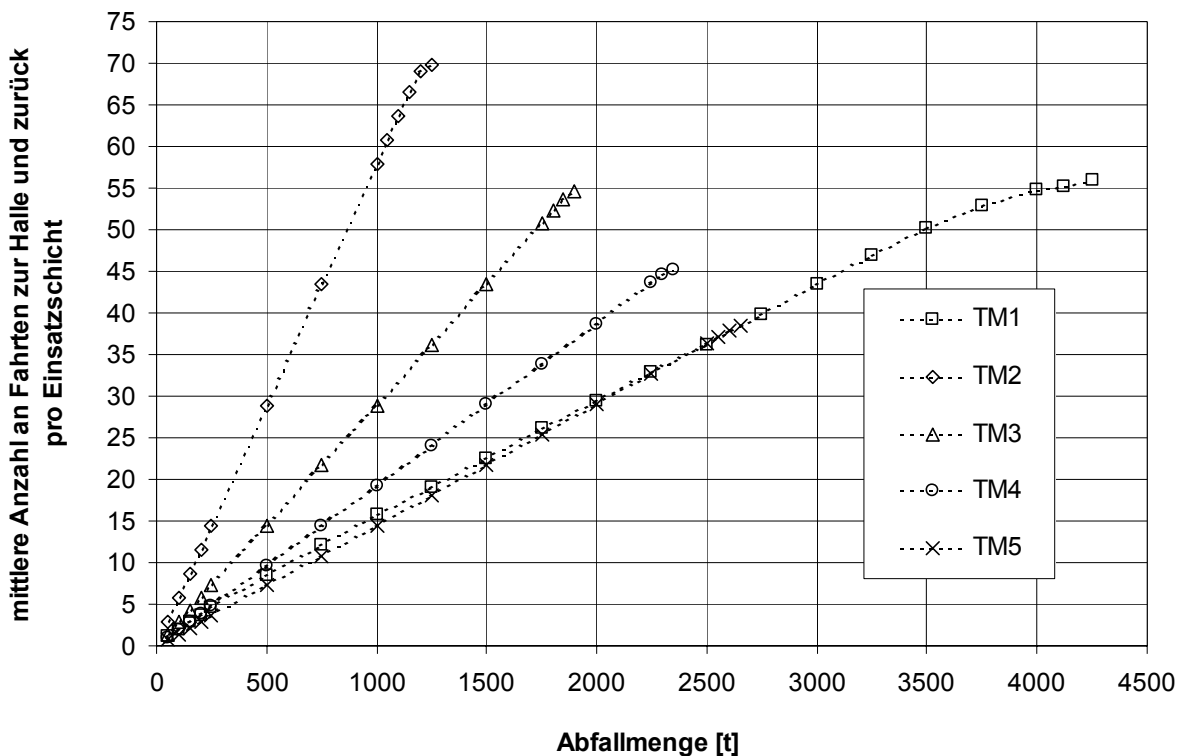


Bild 7.6: Mittlere Anzahl an Fahrten zur Halle und zurück pro Einsatzschicht des Sammel- und Transportmittels (TM) im Simulationsmodell der Variante 1.

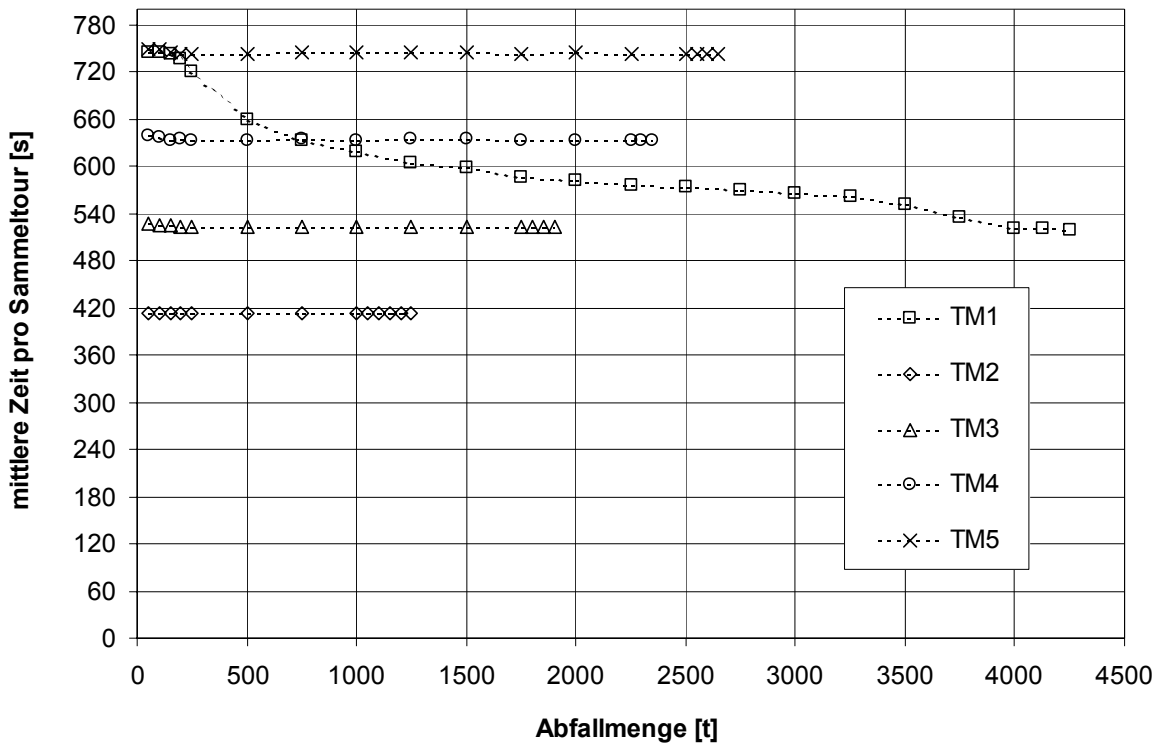


Bild 7.7: Mittlere Zeit pro Sammeltour des Sammel- und Transportmittels (TM) im Simulationsmodell der Variante 1.

Beim Umleerverfahren werden die Sammelbehälter der Reihe nach durch das Sammel- und Transportmittel angefahren, bis das Ende der Behälterreihe erreicht wurde. Bei geringen Abfallmengen kann davon ausgegangen werden, dass die Sammeltour erst beendet ist, wenn alle Behälter in der Halle vom Sammel- und Transportmittel angefahren wurden, da das maximale Ladevolumen des Sammel- und Transportmittels noch nicht überschritten wurde. Mit zunehmender Abfallmenge wird es aber erforderlich, dass das Sammel- und Transportmittel die angefangene Sammeltour abbricht und zurück zur zentralen Senke fährt, da das maximale Ladevolumen des Sammel- und Transportmittels überschritten wurde (vgl. auch Kapitel 6.2.2). Die Sammeltour wird daher früher abgebrochen. Außerdem steigt mit zunehmender Abfallmenge die Wahrscheinlichkeit, dass der als nächstes angefahrte Behälter (entspricht dem Behälter, der am kürzesten vom gerade angefahrenen Behälter entfernt ist) geleert werden muss, da dieser überfüllt ist. Dadurch reduzieren sich mit zunehmender Abfallmenge die Sammelwege in der Halle für das Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren erheblich.

Die mittleren Wartezeiten der Sammelbehälter (vgl. Kapitel 6.3) nehmen mit Ausnahme der mittleren Wartezeiten der Abfallfraktion AF2 mit zunehmender Abfallmenge zunächst ab, bis sie nahezu konstant sind und dann schlagartig mit Erreichen der maximalen Auslastung des entsprechenden Sammel- und Transportmittels stark an-

steigen (vgl. Bild 7.5). Der gestrichelte Bereich in Bild 7.5 ist im Anhang A4 nochmals vergrößert dargestellt.

Die Abnahme der Wartezeiten bei geringen Abfallmengen ist auf die Sammelverfahren der entsprechenden Sammel- und Transportmittel zurückzuführen. Die Ausnahme bildet, wie bereits erwähnt, die Abfallfraktion AF2, die durch das Sammel- und Transportmittel TM2 (Wechselverfahren) gesammelt wird. Das TM2 sammelt in der sogenannten Pendeltour (Behälterkapazität $B_k=1$, vgl. Bild 6.7). Sobald ein Auftrag zur Leerung eines Behälters für das Sammel- und Transportmittel entsteht, fährt dieses Sammel- und Transportmittel aus dem Depot und beginnt mit der Sammeltour. Der Auftrag wird sofort erledigt. Bei Sammel- und Transportmitteln mit einer Behälterkapazität $B_k > 1$ (TM3 - TM5) wird der Auftrag erst begonnen, wenn die Anzahl Aufträge mit der Anzahl mitgeführter Wechselbehälter übereinstimmt, d. h. dass z. B. das TM5 (Behälterkapazität $B_k=4$) erst mit der Sammeltour beginnt, wenn 4 Aufträge von 4 Sammelbehältern eingegangen sind. Für die Behälter der Aufträge 1, 2 und 3 entstehen aber bereits Wartezeiten. Mit zunehmender Abfallmenge werden diese Wartezeiten jedoch kürzer, da auch mehr Aufträge entstehen, die sich in immer kürzeren Zeitabständen über der Schicht mit Abfallanfall verteilen.

Bei der Sammlung im Umleerverfahren (TM1, AF1) wird anhand der maximal erforderlichen Leerungen eines Abfallbehälters in einer Schicht entschieden, wie viele Sammeltouren durch das Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren ausgelöst werden (der Sammelbehälter, der die meisten Leerungen benötigt, z. B. 3 Leerungen, löst somit insgesamt 3 Sammeltouren aus, vgl. Kapitel 6.1). Bei geringen Abfallmengen wird pro Schicht mit Abfallanfall entweder kein Auftrag ausgelöst, weil die Behälter noch nicht überfüllt sind, oder ein Auftrag, da nur eine Sammeltour benötigt wird, um die Sammelbehälter in einer Schicht zu leeren. Um möglichst viele Sammelbehälter einer Sammeltour leeren zu können, sollte die Sammeltour möglichst am Ende der Schicht begonnen werden, da bis dahin die meisten Behälter gefüllt worden sind. Dadurch entstehen aber wiederum Wartezeiten durch Sammelbehälter, die bereits zu Anfang der Schicht überfüllt waren und zu leeren gewesen wären.

Mit zunehmender Abfallmenge entstehen zunehmend mehr Aufträge an das entsprechende Sammel- und Transportmittel und somit mehr Sammeltouren, die über die Schicht mit Abfallanfall verteilt werden. Die mittlere Wartezeit der Sammelbehälter nimmt deshalb weiter ab, bis sie mit Erreichen der maximalen Auslastung des entsprechenden Sammel- und Transportmittels schlagartig ansteigt.

In Bild 7.8 sind die mittleren Füllstände (vgl. Kapitel 6.5) der Sammelbehälter über der Abfallmenge aufgetragen. Bei geringen Abfallmengen liegen die mittleren Füllstände zwischen 50% und 70%. Mit ansteigender Abfallmenge schwanken die Füll-

stände um die 50%-Marke. Die Ausnahme bilden die mittleren Füllstände der Abfallfraktion AF1, die durch das Sammel- und Transportmittel TM1 im Umleerverfahren gesammelt wird. Diese Werte liegen generell über den mittleren Füllständen der übrigen Abfallfraktionen.

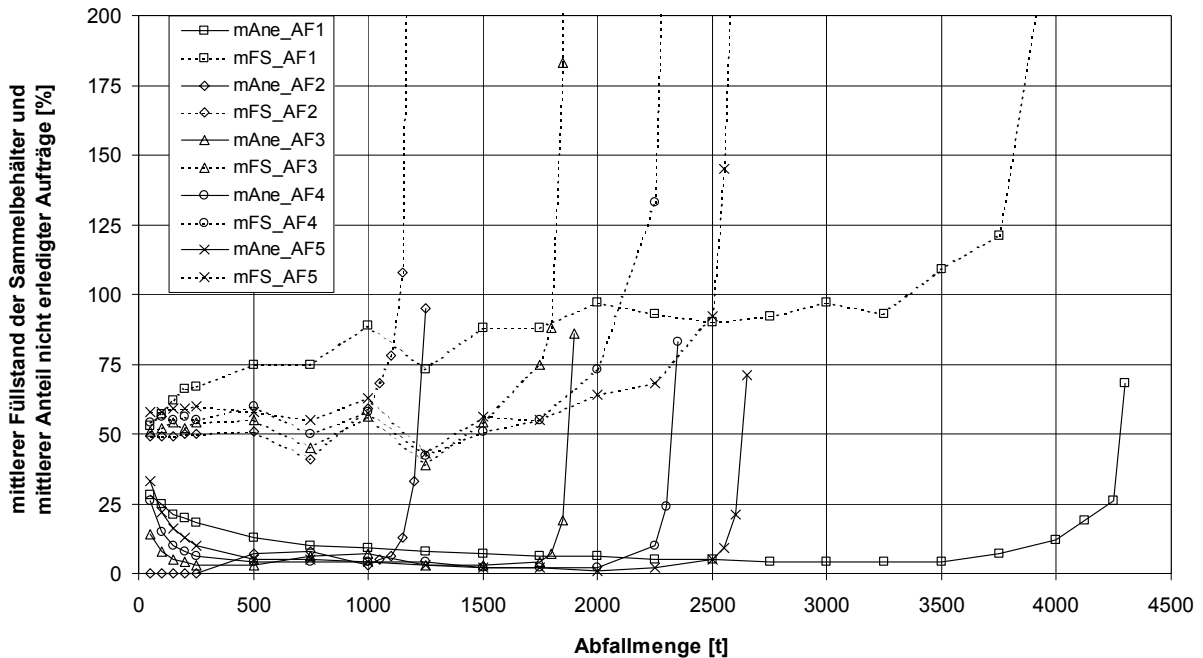


Bild 7.8: Mittlerer Füllstand der Sammelbehälter (mFS) und mittlerer Anteil nicht erledigter Aufträge (mAne) im Simulationsmodell der Variante 1.

Überschreiten die mittleren Füllstände der Sammelbehälter die 100%-Marke, haben die entsprechenden Sammel- und Transportmittel eine nahezu 100%ige Auslastung erreicht, vgl. Bild 7.5. Der schlagartige Anstieg der mittleren Füllstände ab der 100%-Marke ist darauf zurückzuführen, dass die anfallenden Abfallmengen nicht mehr vollständig durch die Sammel- und Transportmittel abgefahren werden können und die verbleibende Abfallmenge sich somit über den betrachteten Bezugszeitraum (Simulationsjahr) kumuliert.

Der mittlere Anteil nicht erledigter Aufträge (vgl. Kapitel 6.6) verhält sich in Abhängigkeit der Abfallmenge analog zum Verlauf der Wartezeiten der Sammelbehälter, vgl. Bild 7.5. Der höhere Anteil an nicht erledigten Aufträgen bei geringeren Abfallmengen entsteht bei den Abfallfraktionen, die durch die Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren (Behälterkapazität $B_k > 1$) gesammelt werden, dadurch, dass am Ende einer Einsatzschicht noch Aufträge für das Sammel- und Transportmittel ausstehen, jedoch die Anzahl der Aufträge kleiner ist als die Anzahl der Wechselbehälter, die das Sammel- und Transportmittel auf der Sammeltour mitführen kann. Diese Aufträge können durch das Sammel- und Transportmittel nicht mehr erledigt werden, da es erst mit der Sammeltour beginnt, wenn die Auftragsanzahl gleich der Wechsel-

behälteranzahl ist. Mit zunehmender Abfallmenge entstehen ebenso mehr Aufträge an das Sammel- und Transportmittel, so dass der Anteil der nicht erledigten Aufträge, die am Ende einer Einsatzschicht entstehen, immer geringer wird. Erst wenn die maximale Auslastung des entsprechenden Sammel- und Transportmittels erreicht ist, steigt der mittlere Anteil nicht erledigter Aufträge schlagartig an.

Bei der Abfallfraktion AF1, die durch das Sammel- und Transportmittel TM1 im Umleerverfahren gesammelt wird, verbleiben nicht erledigte Aufträge am Ende einer Schicht, wenn z. B. auf Grund geringer Abfallmengen nur eine Sammeltour „gefahren“ wurde. Aufträge von Sammelbehältern, die nach der Sammeltour bzw. während der Sammeltour (das Sammel- und Transportmittel ist aber bereits in der Sammeltour am entsprechenden Sammelbehälter vorbeigekommen) an das Sammel- und Transportmittel vergeben werden, können nicht mehr bearbeitet werden. Der Anteil sinkt ebenfalls mit zunehmender Abfallmenge, da die Anzahl der Aufträge und somit der Sammeltouren zunimmt. Erst wenn die maximale Auslastung des TM1 erreicht ist, steigt der mittlere Anteil nicht erledigter Aufträge der AF1 schlagartig an.

Simulationsmodell Variante 2:

Die Validierung der Simulationsergebnisse nach Variante 2 hat das Ziel, die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel in Abhängigkeit der Größe und Anzahl der Sammelbehälter zu interpretieren.

Im Simulationsmodell der Variante 2 werden ein Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren (TM1), das in der Halle 1 sammelt und ein Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren (TM2), das in der Halle 2 sammelt, abgebildet. Das TM2 führt 5 Wechselbehälter auf der Sammeltour mit. Damit die Ausgangssituation für beide Sammel- und Transportmittel gleich ist, wird das Ladevolumen des TM1 für jedes Simulationsexperiment dem Ladevolumen des TM2 angepasst. Werden z. B. Sammelbehälter mit der Größe 360 l gesammelt, so ergibt sich das Ladevolumen des TM1 aus: $\text{Ladevolumen TM2} = 5 \times 360 \text{ l} = 1800 \text{ l} = \text{Ladevolumen TM1}$, u. s. w.. Die Behälterzahl in der Halle ist variabel (10–200 Stück); es werden Sammelbehälter mit der Größe 240 l, 360 l, 660 l und 1100 l im Modell abgebildet. Die Gesamtabfallmenge bleibt bei jedem Simulationsexperiment konstant.

Sämtliche Eingabeparameter für das Simulationsmodell der Variante 2 können aus Bild 7.9 entnommen werden.

Die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel nimmt wie erwartet mit zunehmenden Behältervolumen der Sammelbehälter ab, da im Simulationsmodell der Variante 2 die Behälterkapazität bzw. das Ladevolumen der Sammel- und Transportmittel proportional zum Behältervolumen der Sammelbehälter ist. Das heißt, dass

die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel abnimmt, wenn deren Behälterkapazität bzw. Ladevolumen vergrößert wird (vgl. Bild 7.10).

| Parameterbezeichnung | Eingabewerte | |
|---|---|-----------------------|
| | AF1 | AF2 |
| Abfallart - Kürzel | AF1 | AF2 |
| Abfallmenge [t] | 1000 | 1000 |
| Dichte (un-/verdichtet) [t/m ³] | 0,2 / 0,4 | 0,2 / 0,4 |
| Abfallanfall in | Halle 1 | Halle 2 |
| Hallenlänge/ -breite [m] | 100 / 100 | 100 / 100 |
| Behälteranzahl | variabel | variabel |
| Behältervolumen [l] | 240 - 1100 | 240 – 1100 |
| Sammelverfahren | zentral | zentral |
| Entfernung von Depot/ zentr. Senke zur Halle1 [m] | 500 | 500 |
| AF wird gesammelt von | TM1 | TM2 |
| Sammelstrategie | Umleeren | Wechseln |
| Behälterkapazität/ Ladevolumen [l] | 1200 l | 5 (x 240 l = 1200 l) |
| | 1800 l | 5 (x 360 l = 1800 l) |
| | 3300 l | 5 (x 660 l = 3300 l) |
| | 5500 l | 5 (x 1100 l = 5500 l) |
| Geschwindigkeit [m/s] | 3 | 3 |
| Umleer-/Wechselzeiten [s] in der Halle an der zentralen Senke | 30 | 30 |
| | 60 | 60 |
| Einsatzzeiten der TM | Mo, Di, Mi, Do, Fr / Frühschicht / 8:00 h = 28.800 s | |

AF1, AF2 Abfallfraktion 1 und 2

TM1, TM2 Sammel- und Transportmittel 1 und 2

Bild 7.9: Eingabeparameter im Simulationsmodell der Variante 2.

Die mittlere Auslastung des Sammel- und Transportmittels im Umleerverfahren (TM1) ist außerdem von der Anzahl der bereitgestellten Sammelbehälter abhängig. Die mittlere Auslastung steigt mit der Anzahl der Sammelbehälter. Dies ist darin begründet, dass die mittlere Wegstrecke der Sammeltour des Sammel- und Transportmittels im Umleerverfahren mit der Anzahl der für die Sammlung bereitgestellten Sammelbehälter ansteigt, was wiederum bedeutet, dass die mittlere Zeit pro Sammeltour mit der Anzahl der Sammelbehälter zunimmt (vgl. Bild 7.11).

Im Gegensatz zum TM1 ist die mittlere Auslastung des Sammel- und Transportmittels im Wechselverfahren (TM2) unabhängig von der Behälteranzahl, da dessen mittlere Wegstrecke und somit auch die mittlere Zeit pro Sammeltour unabhängig von der Behälteranzahl ist (vgl. Bild 7.11).

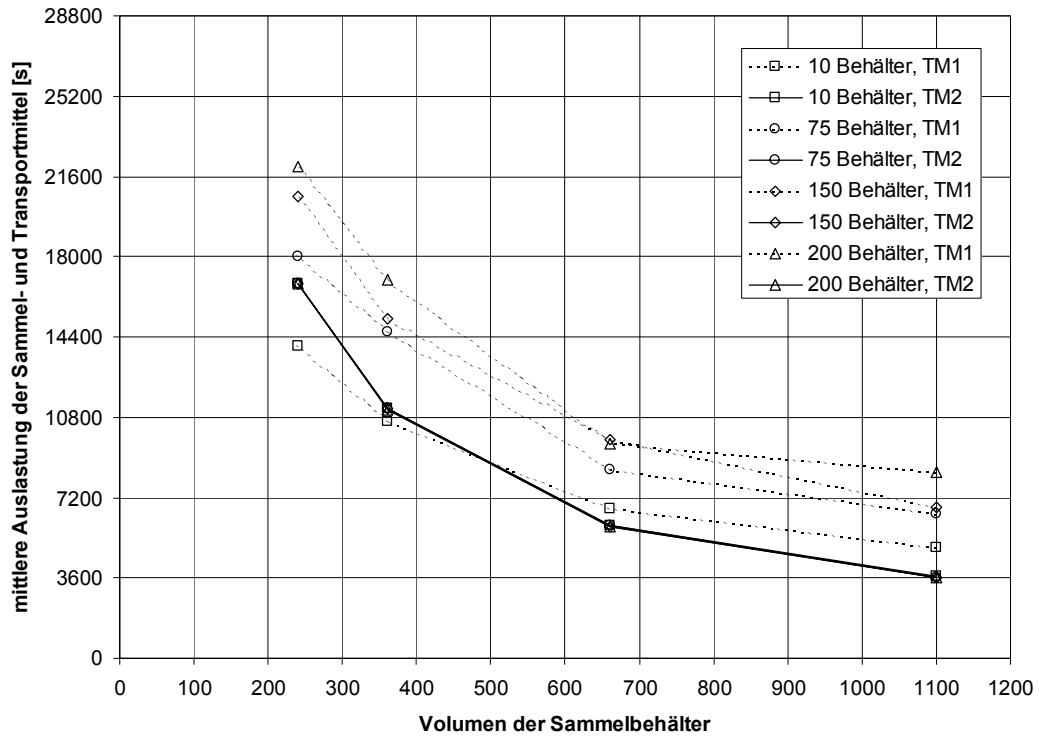


Bild 7.10: Mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel (TM) in Abhängigkeit vom Volumen der Sammelbehälter im Simulationsmodell der Variante 2.

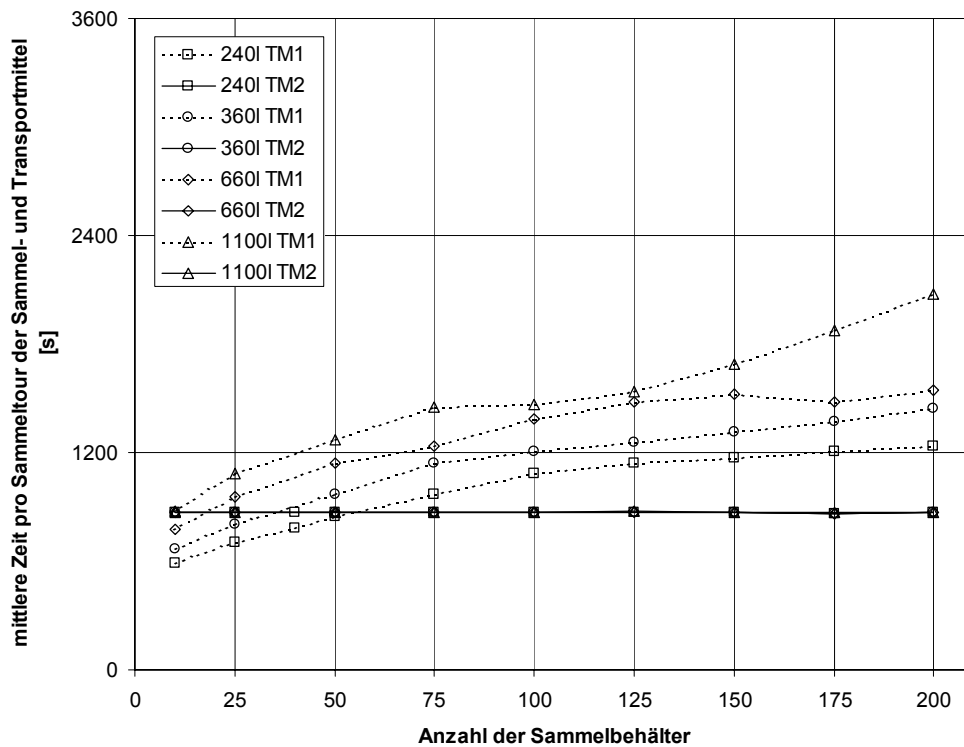


Bild 7.11: Mittlere Zeit pro Sammeltour der Sammel- und Transportmittel (TM) in Abhängigkeit von der Anzahl der bereitgestellten Sammelbehälter im Simulationsmodell der Variante 2.

Die Sammeltour des Sammel- und Transportmittels im Umleerverfahren ist umso kürzer, je kleiner das Behältervolumen der zur Sammlung bereitgestellten Sammelbehälter ist. Dies liegt daran, dass bei konstanter Abfallmenge bzw. -volumen und gleicher Behälteranzahl, Sammelbehälter mit kleinem Behältervolumen öfter geleert werden müssen als Sammelbehälter mit großem Behältervolumen, was wiederum bedeutet, dass mehr Aufträge an das Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren vergeben werden. Mehr Aufträge bedeuten, dass die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der als nächstes angefahrene Behälter (entspricht dem Behälter, der am kürzesten vom gerade angefahrenen Behälter entfernt ist) geleert werden muss, da dieser überfüllt ist. Dadurch reduzieren sich die Sammelwege in der Halle für das Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren und somit die Zeiten pro Sammeltour. Kurze Sammeltouren bedeuten in diesem Fall aber nicht, dass die Auslastung des Sammel- und Transportmittels abnimmt. Zur Bewältigung der gleichen Abfallmenge (bzw. des Abfallvolumens) werden bei kleinem Ladevolumen des Sammel- und Transportmittels entsprechend mehr Sammeltouren benötigt als bei großem Ladevolumen (vgl. Bild 7.10).

Im folgenden Kapitel werden die Kennwerte eines realen Unternehmens mit den Ergebniskennzahlen aus der Simulation verglichen. Eine zusammenfassende Beurteilung der allgemeinen Validierung erfolgt am Ende des folgenden Kapitels.

7.2.2 Validierung am Beispiel realer Unternehmensdaten

Die in Kapitel 3 erwähnte Untersuchung der Entsorgung in 36 Industrieunternehmen hatte das Ziel, die Ist-Situation der innerbetrieblichen Entsorgungslogistik in den Betrieben darzustellen. Im Vordergrund stand die Erhebung der anfallenden Abfallarten und Abfallmengen, der innerbetrieblichen Sammel- und Transportlogistik, der Sammel-systeme und -verfahren, etc. (vgl. Kapitel 3.4 und 3.5), die für die Modellbildung in der Simulation unverzichtbar sind. Anhand dieser Eingangsgrößen können nun durch Simulation Ergebniskennzahlen (Ausgangsgrößen) gewonnen werden, die bei der Befragung der 36 Industrieunternehmen nicht bekannt waren, bzw. einen zu hohen Aufwand für deren Ermittlung erfordert hätten. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Ausgangsgrößen ist daher nur für Teilbereiche möglich, z. B. die Betrachtung der Abfalllogistik einer bestimmten Abfallfraktion aus einer Halle. Dies bedeutet wiederum, dass eine theoretische Validierung der Simulationsergebnisse, wie sie in Kapitel 7.2.1 durchgeführt wurde, weiterhin erforderlich bleibt.

Bei einigen wenigen Unternehmen sind allerdings die Ausgangsgrößen, wie z. B. die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel bekannt, bzw. konnten mit einem vertretbaren Aufwand erhoben werden. Eines dieser Unternehmen, soll hier vorgestellt und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen werden.

Das betrachtete reale Unternehmen ist Zulieferer für die Automobilindustrie und hat insgesamt ca. 2000 Mitarbeiter, von denen 1300 in der Produktion tätig sind. Es wird in drei Schichten gefertigt, wobei die Entsorgung nur in zwei Schichten durchgeführt wird.

Betrachtet werden die folgenden Abfallfraktionen, die über die innerbetriebliche Logistik des Unternehmens gesammelt und zur zentralen Sammelstelle transportiert werden (vgl. Bild 7.12). Die aufgeführten Abfallfraktionen verursachen auf Grund ihres Abfallanfalls (Menge) bzw. ihrer geringen Dichte den höchsten logistischen Aufwand bei der innerbetrieblichen Sammlung. Die Dichte der jeweiligen Abfallfraktion wurde vor Ort in einer Stichprobe ermittelt.

| Fraktion | Kürzel | Menge [t] | Dichte [t/m ³] (unverdichtet) | Volumen [l] |
|-------------------------------|--------|-----------|--|-------------|
| Ölverschmutzte Betriebsmittel | AF1 | 46,76 | 0,0600 | 779.333 |
| Papier und Pappe | AF2 | 154,00 | 0,1875 | 821.333 |
| Folie / Kunststoff | AF3 | 21,29 | 0,0625 | 340.640 |
| Restmüll | AF4 | 84,85 | 0,2940 | 288.605 |
| Schrott | AF5 | 964,00 | 0,7520 | 1.281.915 |
| Press- und Stanzabfälle | AF6 | 4.228,00 | 1,0350 | 4.085.024 |

Bild 7.12: Abfallmenge und -dichte der Abfallfraktionen im betrachteten Unternehmen.

Die Montage- und Fertigungshalle des betrachteten Unternehmens kann in 9 Hallenbereiche aufgeteilt werden. Diese Aufteilung ist sinnvoll, da der Abfallanfall, und damit auch die zur Sammlung der Abfälle bereitgestellten Sammelsysteme sich je nach Hallenbereich unterscheiden. In Bild 7.13 ist das Layout des Unternehmens mit seinen Fertigungs- und Montagebereichen (A-I) dargestellt.

Für jeden Hallenbereich wurden die Sammelbehälter der jeweiligen Abfallfraktion erfasst. Insgesamt werden für die Sammlung der Abfallfraktionen ölverschmutzte Betriebsmittel, Papier und Pappe, Folie/ Kunststoff und Restmüll (AF1-AF4, vgl. Bild 7.12) 216 Sammelbehälter des Typs 80 l MGB (Müllgroßbehälter) und für die Sammlung der Schrotte (AF5) und der Press- und Stanzabfälle (AF6) 75 Kippmulden mit einem Fassungsvermögen von 1000 l und 27 Kippmulden mit einem Fassungsvermögen von 500 l eingesetzt.

Bei der innerbetrieblichen Sammlung der Abfälle werden die Abfälle AF1-AF4 zunächst in 80 l MGB gesammelt, die in der Nähe der Arbeitsplätze stehen. Die 80 l MGB werden dann in einer Sammeltour mittels eines Gabelstaplers, der eine Kippmulde (1000 l) mitführt, in diese Kippmulde umgeleert. Ist die Kippmulde gefüllt, wird diese zur zentralen Senke transportiert und in den entsprechenden Container umge-

leert. Im Gegensatz hierzu, werden die Schrotte und die Press- und Stanzabfälle direkt in Kippmulden gesammelt, die sich ebenfalls in der Nähe der Arbeitsplätze befinden. Sind die Kippmulden gefüllt, werden sie jeweils direkt zur zentralen Senke transportiert und in den entsprechenden Container umgeleert.

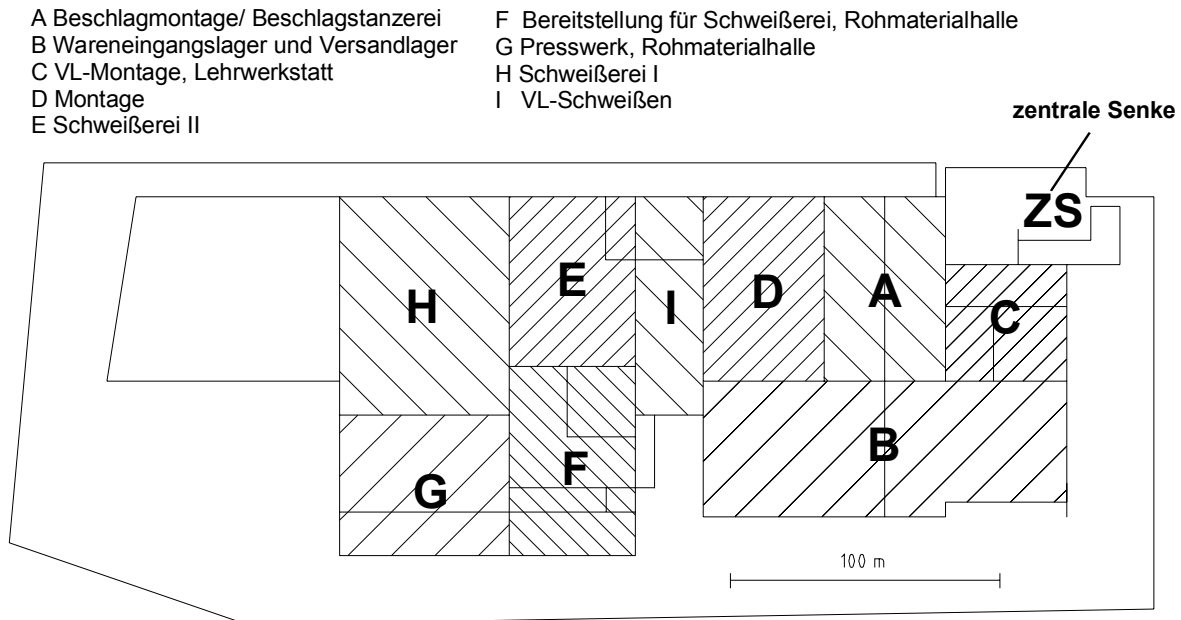


Bild 7.13: Layout des Unternehmens und dessen Aufteilung in die Fertigungs- und Montagebereiche A-I.

Für die Umleerung der Kippmulden in die Container an der zentralen Senke wird ein Zeitbedarf von 2 min angenommen, der in einer Stichprobe im Unternehmen vor Ort gemessen wurde. Die Umleerzeit eines 80 l MGB in die Kippmulde des Gabelstaplers wird ebenfalls mit 2 min veranschlagt, da teilweise noch Wegstrecken vom Standort der Behälter zu den Fahrwegen der Gabelstapler berücksichtigt werden müssen (die Umleerzeiten wurden vor Ort in einer Stichprobe ermittelt).

Für die Modellbildung in SimdiAI sind somit folgende Voraussetzungen für die Eingabeparameter gegeben:

- Für jeden Hallenbereich (A-I) wird eine Halle definiert, d. h. es werden insgesamt 9 Hallen konfiguriert.
- Die Sammlung aller Abfallfraktionen erfolgt zentral (zentrale Senke).
- Für die Sammlung der Abfälle AF1-AF4 wird ein Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren mit einer Behälterkapazität $B_k=1$ und einem Ladevolumen von 1000 l benötigt (vgl. Bild 6.7).
- Für die Sammlung der Abfälle AF5 und AF6 wird ein Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren mit einer Behälterkapazität $B_k=1$ („Pendeltour“) benötigt (vgl. Bild 6.7).

- Annahme einer konstanten Abfallmengenverteilung.

In Bild 7.14 sind den gemessenen und analytisch berechneten Kennwerten des betrachteten Unternehmens die entsprechenden Ergebniskennwerte aus der Simulation gegenübergestellt. Die prozentuale Abweichung der Kennwerte untereinander kann hieraus ebenfalls entnommen werden.

Die Anzahl der Umleerungen wurden analytisch unter der Annahme konstanter Mengenströme aus der Gesamtabfallmenge und der stichprobenartig ermittelten Dichte der Abfallfraktionen sowie der Behältervolumen berechnet (Kennwerte des Unternehmens, analytische Berechnung).

Der Zeitaufwand pro Sammeltour ergibt sich zum einen aus den mittleren Wegstrecken, der Geschwindigkeit der Gabelstapler sowie der Anzahl Umleerungen pro Sammeltour im Umleerverfahren (Kennwerte des Unternehmens, analytische Berechnung). Zum anderen wurden im betrachteten Unternehmen vor Ort die Zeiten für einzelne Sammeltouren im Umleerverfahren und im Wechselverfahren in Stichproben gemessen (Kennwerte des Unternehmens, Messung).

Der Zeitaufwand pro Sammeltour in der Simulation berechnet sich aus dem Quotienten des Zeitaufwands pro Schicht für die Sammlung und den Transport der Abfälle (mittlere Auslastung m_{Ausl} , vgl. Bild 7.3) und der Anzahl Fahrten zur Halle pro Schicht (Anzahl der Fahrten zur Halle ZF_H , vgl. Bild 7.3).

| | | Kennwerte des Unternehmens | | Kennwerte aus der Simulation | mittlere Abweichung [%] |
|---|-------|----------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Umleerungen in der Halle gesamt pro Jahr | | Einheit | analytische Berechnung | | |
| Överschmutze Betriebsmittel | [-] | 9.742 | 10.193 | | 4,42 |
| Papier und Pappe | [-] | 10.267 | 10.523 | | 2,43 |
| Folie und Kunststoffe | [-] | 4.258 | 4.305 | | 1,09 |
| Restmüll | [-] | 3.535 | 3.772 | | 6,28 |
| Schrott | [-] | 1.624 | 1.564 | | -3,84 |
| Press- und Stanzabfälle | [-] | 6.264 | 6.427 | | 2,54 |
| Zeitaufwand pro Sammeltour | | | analytische Berechnung | Messung | |
| Umleerverfahren | [min] | 27,54 | 25 | 23,91 | 8,78 |
| Wechselverfahren | [min] | 6,93 | 8 | 7,42 | 6,92 |
| Zeitaufwand gesamt pro Tag | | [h] | 9,54 | 10,21 | 6,56 |

Bild 7.14: Gegenüberstellung der gemessenen Kennwerte des realen Unternehmens und den Kennwerten aus der Simulation.

Andere Kennzahlen, wie z. B. die Wartezeit der Sammelbehälter bis zu deren Leerung oder der mittlere Füllstand der Sammelbehälter entziehen sich einer genaueren Untersuchung und damit Gegenüberstellung, da diese nur mit erheblichen Aufwand im realen Unternehmen ermittelt werden können. Diese Kennzahlen lassen sich somit nur aus Simulationsexperimenten ohne weiteren Aufwand ableiten.

Zusammenfassende Beurteilung der allgemeinen Validierung und der Validierung am Beispiel realer Unternehmensdaten:

Die Validierung der Simulationsergebnisse mittels einer Kombination des deterministischen Tests und des Parametertests hat ergeben, dass die Ergebniskennzahlen der Simulation sich in guter Näherung so verhalten, wie es im Allgemeinen erwartet wurde. Zum Beispiel zeigt das Simulationsergebnis der Abhängigkeit der mittleren Auslastung der Sammel- und Transportmittel von der Abfallmenge bzw. vom Volumen der Sammelbehälter das erwartete Verhalten dieser Kennzahl. Entsprechendes gilt für die übrigen untersuchten Ergebniskennzahlen. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Sammel- und Transportmittel im Umleer- und Wechselverfahren konnten anhand der Simulationsergebnisse begründet und interpretiert werden. Die Plausibilität der Ergebniskennzahlen ist somit theoretisch gegeben.

Die Validierung am Beispiel realer Unternehmensdaten hat gezeigt, dass die simulierten Kennwerte sehr gut mit den analytisch berechneten Kennwerten übereinstimmen. Auch die Übereinstimmung der Ergebniskennwerte aus der Simulation mit den gemessenen, realen Kennwerten ist sehr hoch (Abweichung < 10%). Dies liegt vor allem daran, dass die Voraussetzung einer konstanten Abfallmengenverteilung für einen Vergleich zwischen der analytischen Berechnung, der Simulation und der Messung für alle drei Systeme gegeben sind. Im o. g. Beispiel werden Abfallfraktionen betrachtet, die in regelmäßigen Zeitabständen und nahezu konstanten Abfallmengen anfallen, so dass die Annahme einer konstanten Abfallmengenverteilung über den Bezugszeitraum eines gesamten Betriebsjahres im realen System gerechtfertigt ist.

In der oben durchgeführten analytischen Berechnung kann das zeitdynamische Verhalten des realen Systems nicht ermittelt werden, d. h. die Ergebniskennwerte sind über den gesamten Bezugszeitraum gemittelt und daher konstant (statische Berechnung). Zeitliche Unterschiede z. B. bei der Auslastung der Sammel- und Transportmittel können somit nicht dargestellt werden. Die analytische Betrachtung zeitabhängiger Systeme mit dynamischen Berechnungsmethoden ist prinzipiell möglich, allerdings nimmt der Aufwand mit der Komplexität des zu berechnenden Systems erheblich zu. Geht man nun von einer empirisch ermittelten Abfallmengenverteilung des realen Systems aus, ist ein Vergleich zwischen analytisch berechneten (statische Berechnung) und simulierten Kennwerten nicht mehr sinnvoll, da in diesem Fall die dynamisch ermittelten Ergebniskennzahlen der Simulation den Mittelwerten der statischen Berechnung gegenüber gestellt werden.

Bei der Bewertung der Simulationsergebnisse sollte man sich außerdem bewusst sein, dass die Ergebnisse nicht zwangsläufig vollkommen identisch mit dem realen System sind, da die bei der Abstraktion vorgenommenen Vereinfachungen berücksichtigt werden müssen.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Verfahren zur Beurteilung der logistischen Qualität innerbetrieblicher Abfalllogistik von Industrieunternehmen. Es wurde das Simulationsprogramm **SimdiAI (Simulation der innerbetrieblichen Abfalllogistik)** konzipiert und entwickelt, mit dem die Abfalllogistik von unterschiedlichen Industrieunternehmen im Simulationsmodell abgebildet und dadurch das dynamische Verhalten des Simulationsmodells untersucht werden kann.

Das Simulationsprogramm SimdiAI besteht aus den Modulen Modellbildung, Abfallgenerierung und Abfalllogistik. Die Modellerstellung, die mit Hilfe des Moduls Modellbildung erfolgt, orientiert sich dabei an vorgegebene Modellelemente, die aus den realen Prozessketten der innerbetrieblichen Abfalllogistik, die sich in der Praxis durchgesetzt haben, abgeleitet und durch Abstraktion in das Simulationsmodell überführt wurden. Die Prozessketten der innerbetrieblichen Abfalllogistik wurden aus einer umfangreichen Datenaufnahme in insgesamt 36 Industrieunternehmen erarbeitet, wobei zuvor eine Strukturierung der Systemelemente der innerbetrieblichen Entsorgung (Sammelsysteme, Förder- Transport- und Umschlagsysteme, Sammel- und Bereitstellungsverfahren, etc.) durchgeführt wurde. Die Modellerstellung ist so gestaltet, dass keine speziellen Simulationskenntnisse bei der Anwendung vorausgesetzt werden.

Zur Beurteilung der logistischen Qualität innerbetrieblicher Entsorgung werden in dieser Arbeit Kennzahlen und Kennlinien herangezogen, die aus den logistischen Zielgrößen der Ver- und Entsorgung ermittelt wurden. Mit Hilfe der Kennzahlen, die aus einem Simulationsexperiment gewonnen werden, kann die Zielerreichung der logistischen Zielgrößen quantifiziert und damit messbar gemacht werden.

Am Beispiel eines Musterunternehmens (Planspiel) wird die Vorgehensweise bei der Modellerstellung in der Simulation beschrieben. Die Verteilung der Jahresabfallmengen über den entsprechenden Bezugszeitraum in der Simulation (Betriebsjahr = Simulationsjahr) kann durch drei unterschiedliche Verteilungsmethoden (Vorgabe von „Mengentendenzen“/ Prinzip des arithmetischen Mittels, stochastische Verteilung und empirische Verteilung) beschrieben werden. Das Sammelverfahren richtet sich nach dem Sammel- und Transportmittel und wird nach dem Umleer- und Wechselverfahren unterschieden. Die zweistufige Sammlung wird mit Poolstelle und Poolfahrzeug im Simulationsmodell abgebildet.

Abschließend wird mit Hilfe von verschiedenen Optimierungsansätzen gezeigt, wie durch gezieltes Ändern der Eingabeparameter das im Simulationsmodell abgebildete

Entsorgungskonzept des Planspiels optimiert werden kann. Als Beurteilungskriterium für die logistische Qualität der betrachteten Abfalllogistik im Simulationsmodell werden dabei die mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel, die mittlere Wartezeit der Abfallsammelbehälter bis zur Leerung, der mittlere Füllstand der Abfallsammelbehälter und der Anteil nicht erledigter Aufträge herangezogen.

Es werden zwei unterschiedliche Verfahren zur Validierung des Simulationsprogramms durchgeführt (Allgemeine Validierung und Validierung am Beispiel realer Unternehmensdaten), die die Plausibilität und Gültigkeit der durch SimdiAI ermittelten Ergebniskennzahlen nachweisen. Bei der allgemeinen Validierung wird der Parameter test mit dem deterministischen Test (möglichst alle stochastischen Prozesse in der Simulation werden ausgeschaltet) kombiniert. In Abhängigkeit der Variation eines Parameters (z. B. die Abfallmenge, das Behältervolumen, die Behälteranzahl, etc.) können die übrigen Ergebniskennzahlen im Diagramm dargestellt und interpretiert werden.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die realen Prozesse der innerbetrieblichen Abfalllogistik eines Industrieunternehmens durch Abstraktion in ein Simulationsmodell zu überführen. Es wurde gezeigt, dass durch geeignete Konzeption von spezifischen Modellbausteinen, die aus der realen innerbetrieblichen Entsorgung abgeleitet wurden, die in der Praxis relevanten Prozessketten in einem Simulationsmodell abgebildet werden können. Da der Schwerpunkt der Arbeit sich auf die Umsetzung der realen Prozesse in ein Simulationsmodell und die Ermittlung von entsorgungsspezifischen Kennzahlen durch Simulationsexperimente konzentriert, verbleiben Teilbereiche, die in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet wurden (vgl. Kapitel 8.2 „Ausblick“).

Der Nutzen, der durch den Einsatz von Simulation in der innerbetrieblichen Abfalllogistik entsteht, liegt zum einen in der Erhöhung der Planungsgenauigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung des gesamten Planungsaufwandes bei der Gestaltung von innerbetrieblichen Entsorgungskonzepten. Zum anderen werden durch das strukturierte Vorgehen bei der Ermittlung der Eingangsdaten und der Durchführung von Simulationsexperimenten die logistischen Entsorgungsprozesse transparent und damit für den Planer begreifbar. Veränderte Rahmenbedingungen der innerbetrieblichen Abfalllogistik können durch Variation der Parameter wie beispielsweise die Anzahl der Abfallsammelbehälter, die Kapazität der Sammel- und Transportmittel, die Sammelstrategie und das Abfallaufkommen während des Betriebes durch die Simulation geprüft oder bei der Planung neuer Entsorgungskonzepte im Vorfeld simuliert werden.

8.2 Ausblick

An dieser Stelle sollen weiterführende Anregungen gegeben werden, wie durch Optimierung des Simulationsprogramms, der Planungsaufwand mit dem Simulationsprogramm zusätzlich verringert und die Planungsgenauigkeit erhöht werden können:

Die Berechnung und Eingabe der Fahrwege auf Bereichs- und Arbeitsplatzebene könnte durch die Kopplung mit einem CAD-System automatisiert werden. Heimsoth stellt in seiner Arbeit ein Verfahren vor, das die CAD-gestützte Planung der Behälterstandorte und der Quelle-Senke-Beziehung erlaubt /Heimsoth-2000/. Es wird dabei vorausgesetzt, dass ein Layout des zu betrachtenden Industrieunternehmens im entsprechenden CAD-Format vorliegt. Die strategisch wichtigen Koordinaten des CAD-Layouts (z. B. Behälterstandort, Standort der dezentralen und zentralen Senken, Halleneingang und -ausgang) werden in eine Datenbank exportiert, die vom Simulationsprogramm gelesen und entsprechend ausgewertet werden kann. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, über die CAD-Schnittstelle von Simple++ einen direkten Datenaustausch herzustellen. Durch die Kopplung mit einem CAD-System könnte sowohl der Planungsaufwand verringert als auch die Planungsgenauigkeit verbessert werden. Der Aufwand beschränkt sich auf die Auslegung der Schnittstelle und die Ausführung des Datenaustauschs zwischen CAD-System und Simple++.

Um zusätzlich auch die Berechnung der Kennzahlen der monetären Zielgrößen (Kosten) in der Simulation zu berücksichtigen, könnte jedem Modellelement die entsprechenden Kostenattribute (z. B. Mietkosten der Abfallsammelbehälter, Betriebskosten der Sammel- und Transportmittel, etc.) zugeteilt werden. Nach Ablauf der Simulation könnten dann die entstandenen Entsorgungskosten des betrachteten Bezugszeitraums automatisch berechnet werden. Hierfür ist ein Kostenmodell zu entwickeln, das an die Modellelemente angepasst werden muss. Aufgrund des neu zu konzipierenden Kostenmodells wird mit einem erheblichen Mehraufwand für dessen Entwicklung und Integration in das Simulationsprogramm gerechnet.

Der Aufwand bei der Ergebnisaufbereitung könnte minimiert werden, indem mehrere Simulationsexperimente automatisch nacheinander mit variierenden Parameter durchgeführt und die gesamten Ergebniskennzahlen nach Ablauf eines Simulationsexperiments in eine geeignete Datenbank geschrieben werden. Die Datenbank kann anschließend ausgewertet und die erforderlichen Diagramme erzeugt werden. Denkbar ist auch der Einsatz von genetischen Algorithmen, die eine automatische Optimierung der Simulationsergebnisse ermöglichen. Dabei wird durch ein iteratives Verfahren die optimale Lösung ermittelt, vorgeschlagen und per Simulation bewertet. Je nach Umfang der Ergebnisaufbereitung, steckt hier vor allem der Aufwand in der Ausbildung der genetischen Algorithmen, der mit der Komplexität der Sammelstrategien beachtlich zunimmt.

9 Literatur

- Arnold-1998** Arnold, D.: Materialflusslehre. Braunschweig/ Wiesbaden: Vieweg, 1998.
- BDE-1998** BDE, Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V.: Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – insbes. Abfallrechtliche Überwachung/ Bestimmung nach EAK. Bonn: Friedhelm Merz, 1998.
- Bilitewski-2000** Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K.: Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre. Berlin: Springer, 2000.
- Bölzing-1999** Bölzing, D.; Mayer, S.: Neue Kennzahlen erforderlich. In: Logistik Spektrum. 11 (1999) 3, S. LS4-LS5.
- Bruns-1997** Bruns, K.: Analyse und Beurteilung von Entsorgungslogistiksystemen, Wiesbaden: Gabler, 1997.
- DIN-15001** DIN 15001: Krane – Benennung nach Bauarten. Berlin: Beuth Verlag, 1973.
- DIN-15136** DIN 15136: Anbaugeräte für Stapler und Lader - Benennungen. Berlin: Beuth Verlag, 1957.
- DIN-30722** DIN 30722 Teil 1: Abrollkipperfahrzeuge, Wechsellader-Einrichtung, Abrollbehälter - Abrollkipperfahrzeuge bis 26 t, Abrollbehälter System 1570 aus Stahl. Berlin: Beuth Verlag, 1993.
- DIN-30723** DIN 30723: Absetzkipperfahrzeuge, Absetzkippeinrichtung – Größen, Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- DIN-30781** DIN 30781 Teil 1: Transportkette - Grundbegriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1989.
- DIN-55350** DIN 55350 Teil 11, 12, und 13: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Berlin: Beuth Verlag, 1987.
- DIN EN-840** DIN EN-840-1 03.97: Fahrbare Abfallsammelbehälter – Teil 1: Behälter mit 2 Rädern und einem Volumen von 80 l bis 390 l für Kammschüttungen; Maße und Formgebung.
- DIN EN-1501** DIN EN-1501-1 06.98: Abfallsammelfahrzeuge und die dazugehörigen Schüttungen – Allgemeine Anforderungen und Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Hecklader.
- Domschke-1995** Domschke, W.: Einführung in die Operations-Research. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995.

- Ewers-1996** Ewers, H.-J.: Entsorgungslogistik, Auswirkungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes auf logistische Entscheidungen, Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht, 1996.
- Fichter-1995** Fichter, K.: Die EG-Öko-Audit-Verordnung, Mit Öko-Controlling zum zertifizierten Umweltmanagementsystem. München, Wien: Hanser, 1995.
- Gabler-1998** Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. Klaus, P.; Krieger, W. (Hrsg.). Wiesbaden: Gabler, 1998.
- Gudehus-1999** Gudehus, T.: Logistik, Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer, 1999.
- Heimsoth-2000** Heimsoth, J.: Die Optimierung der Entsorgungslogistik von Industrieunternehmen. Dissertation Universität Stuttgart: 2000.
- Heinzl-1999** Heinzl, A.; Brandt, A.: Simulationsmodelle. In: Weber, J.; Baumgarten, H.: Handbuch Logistik - Management von Material- und Warenflussprozessen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1999, S. 392-411.
- Ihde-1991** Ihde, G. B.: Transport, Verkehr, Logistik. München: Vahlen, 1991.
- Jansen-1998** Jansen, R.: Handbuch Entsorgungslogistik, Möglichkeiten und Grenzen der Abfallvermeidung, -verwertung und -beseitigung. Frankfurt am Main: Dt. Fachverlag, 1998.
- Jünemann-1989** Jünemann R.: Materialfluss und Logistik. Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Berlin: Springer, 1989.
- Jünemann-2000** Jünemann, R.; Schmidt, T.: Materialflußsysteme: Systemtechnische Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000.
- Kilimann-1997** Kilimann, S.: Möglichkeiten der Übertragung und Anwendung versorgungslogistischer Methoden auf die Entsorgungslogistik. Dissertation Technische Universität Dresden: 1997.
- Kreyszig-1982** Kreyszig, E.: Statistische Methoden und Ihre Anwendungen. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1982.
- Kuhn-1993** Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P.: Handbuch Simulationsanwendung in Produktion und Logistik. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1993.
- Kuhn-1998** Kuhn, A.; Rabe, M.: Simulation in Produktion und Logistik: Fallbeispielsammlung. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
- Kupart-1991** Kupart, T.: Simulationsgestützte Beurteilung der logistischen Qualität von Produktionsstrukturen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- Matschke-1996** Matschke M.: Betriebliche Umweltwirtschaft. Eine Einführung in die betriebliche Umweltökonomie und in Probleme ihrer Handhabung in der Praxis. Herne: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, 1996.

- Noche-1992** Noche, B.: Simulation ist Qualitätssicherung. In: Logistik Heute. 12 (1992), S. 44 – 45.
- Nyhuis-1999** Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin: Springer, 1999.
- Pfohl-2000** Pfohl, H. C.: Logistiksysteme, 5. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2000.
- Schimmelpfeng-1995** Schimmelpfeng, L.; Machmer, D.: Öko-Audit, Umweltmanagement und Umweltbetriebsführung. Taunusstein: Blottner, 1995.
- Schlittgen-1995** Schlittgen, R.: Einführung in die Statistik – Analyse und Modellierung von Daten. München, Wien: Oldenbourg, 1995.
- Schneider-1994**: Schneider, M.: Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Optimierung des Produktionsablaufes am Beispiel eines mittelständischen Unternehmens der Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation TU Dresden, 1994
- Schnellbögl-1993** Schnellbögl, J.: Analyse, Planung und Optimierung innerbetrieblicher Entsorgungsstrukturen. Dissertation Universität Dortmund 1993.
- Simple-1999** Simple++ 7.0: Reference Manual – Plant and line planning tools to design, simulate, visualize and optimize production systems and processes. Tecnomatix AESOP GmbH & Co. KG, Stuttgart: Fraunhofer IPA, 1999.
- Stölzle-1993** Stölzle, W.: Umweltschutz und Entsorgungslogistik. Theoretische Grundlagen mit ersten empirischen Ergebnissen zur innerbetrieblichen Entsorgungslogistik. Berlin: E. Schmidt, 1993.
- Tabasaran-1994** Tabasaran, O.: Abfallwirtschaft, Abfalltechnik: Siedlungsabfälle. Berlin: Ernst, 1994.
- Umweltbundesamt-1997** Umweltbundesamt (Hrsg.): Daten zur Umwelt. Ausgabe 1997. Berlin: Erich Schmidt, 1997.
- Umweltbundesamt-1998a** Zwei Studien zeigen: So bekommen Kommunen ihre Abfallgebühren in den Griff. In: Entsorgung Magazin, 7-8/1998, S. 16-27.
- Umweltbundesamt-1998b** Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltdaten Deutschland 1998. Umweltbundesamt, 1998.
- VDI-2198** VDI 2510 Ausgabe 05.94.: Typenblätter für Flurförderzeuge, 1994.
- VDI-2510** VDI 2510 Entwurf, Ausgabe 06.97.: Fahrerlose Transportsysteme (FTS), 1997.
- VDI-3586** VDI 3586 Ausgabe 03.96.: Flurförderzeuge – Begriffe, Kurzzeichen, 1996.
- VDI-3633** VDI 3633, Ausgabe 12.97 Blatt 3: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Experimentplanung und -auswertung, 1997.

- VDI-3973** VDI 3973, Ausgabe 03.90: Kraftbetriebene Flurförderzeuge; Schleppzüge mit ungebremsten Anhängern, 1990.
- VDI-4400** VDI 4400 Entwurf 10.2000: Logistikkennzahlen für die Produktion, 2000.
- VDI-4413** VDI 4413 04.96: Entsorgungslogistik in produzierenden Unternehmen, 1996.
- VDI-4431** VDI 4431 Entwurf 07.98: Kreislaufwirtschaft für produzierende Unternehmen, 1998.
- VDI-4432** VDI 4432 Entwurf 03.01: Entsorgung von Gewerbeabfällen, 2001.
- Weber-1999** Weber, J.; Baumgarten, H.: Handbuch Logistik - Management von Material- und Warenflussprozessen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1999.
- Wehking-1988** Wehking, K.-H.: Entsorgungslogistik - Forschen für die Entsorgung der Zukunft. In: Entsorga Magazin, 6/1988, S. 18-23.
- Wehking-1991** Wehking, K.-H., Rinschede, A.: Entsorgungslogistik I - Grundlagen, Stand und Technik. Jünemann, R. (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt, 1991.
- Wehking-1995** Wehking, K.-H., Rinschede, A.: Entsorgungslogistik III - Kreislaufwirtschaft. Jünemann, R. (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt, 1995.
- Wehking-1996** Wehking, K.-H.: Entsorgungslogistik als wesentlicher Bestandteil der zukünftigen Kreislaufwirtschaft. In: UmweltWirtschaftsForum, 4/1996, S. 20-27.
- Wehking-1997** Wehking, K.-H.; Heimsoth, J.; Schulz, R.: Kreislaufwirtschaft in der Praxis, Industrieentsorgung auf dem Prüfstand. In: Hebezeuge und Fördermittel. Berlin 37 (1997) 10, S. 432-435.
- Wehking-2000** Wehking, K.-H.; Schulz, R.; Heimsoth, J.: Industrieentsorgung im Blickpunkt – Analyse von 20 Unternehmen. In: Hebezeuge und Fördermittel, Berlin: 40 (2000) 4, S. 211-214.
- Westkämper-1999** Westkämper, E.; Zahn, E.; Aupperle, G.; Gagsch, B.; Herbst, C.: Simulation als Instrument zur ganzheitlichen Marktausrichtung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 94 (1999), Nr.1-2, S.29-32.
- Ziems-1996** Ziems, D., Koschay, V.: Innerbetriebliche Entsorgungslogistik. In: UmweltWirtschaftsForum, 3/1996, S. 37-42.

10 Anhang

- A1 a) Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgung Teil I.
- A1 b) Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgung Teil II.
- A2 a) Flussdiagramm Teil I: Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren.
- A2 b) Flussdiagramm Teil II: Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren.
- A2 c) Flussdiagramm Teil III: Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren.
- A3 Gegenüberstellung der zurückgelegten Wege bei Sammeltouren in der Halle im Wechselverfahren, die mit Hilfe der Behältermatrix in der Simulation berechnet wurden und den Wegstrecken bei realen Behälterstandorten.
- A4 Mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel und mittlere Wartezeit der Sammelbehälter im Simulationsmodell der Variante 1 (vgl. Kapitel 7.2.1).
- A5 a) Eingabeparameter: Ausgangssituation im Planspiel.
- A5 b): Ausgangssituation im Planspiel: Ergebniskennzahlen nach Simulationsdurchlauf.
- A5 c): Eingabeparameter: Optimierung 1 im Planspiel.
- A5 d): Optimierung 1 im Planspiel (Dezentrale Sammlung der Abfallfraktion AF5 aus Halle 2): Ergebniskennzahlen nach Simulationsdurchlauf.
- A5 e): Eingabeparameter: Optimierung 2 im Planspiel.
- A5 f): Optimierung 2 im Planspiel (Erhöhung der Behälterkapazität des Sammel- und Transportmittels TM3 von 1 auf 3): Ergebniskennzahlen nach Simulationsdurchlauf.
- A5 g): Eingabeparameter: Optimierung 3 im Planspiel.
- A5 h): Optimierung 3 im Planspiel (Erhöhung des Volumens der Sammelbehälter für die Abfallfraktionen AF1-AF4): Ergebniskennzahlen nach Simulationsdurchlauf.
- A5 i): Eingabeparameter: Optimierung 4 im Planspiel.
- A5 j): Optimierung 4 im Planspiel (Reduzierung der Einsatzzeiten der Sammel- und Transportmittel): Ergebniskennzahlen nach Simulationsdurchlauf.

Sammlung in der Halle im Umleerverfahren
1. Zentrale Sammlung: Ax L1.1 L2.1 ZWS1 iS1

Die Abfallfraktion Ax (vgl. Legende unten) wird in der Halle im Umleerverfahren (**L1.1=Umleerverfahren**) gesammelt; das Sammel- und Transportmittel ist ein Umleerfahrzeug. Ist das Sammelvolumen des Sammel- und Transportmittels erschöpft, fährt dieses zur zentralen Senke. Die Sammellogistik auf Werksebene erfolgt somit zentral (**L2.1=zentrale Sammlung**). Der Transport der Abfälle erfolgt ohne Zwischensammelstelle (**ZWS1=keine Zwischensammelstelle**) direkt zur zentralen Senke. Die innerbetriebliche Senke ist die zentrale Senke **iS1**.

2. Dezentrale Sammlung: Ax L1.1 L2.2 ZWS1 iS2

Die Abfallfraktion Ax (vgl. Legende unten) wird in der Halle im Umleerverfahren (**L1.1=Umleerverfahren**) gesammelt; das Sammel- und Transportmittel ist ein Umleerfahrzeug. Ist das Sammelvolumen des Sammel- und Transportmittels erschöpft, fährt dieses zur dezentralen Senke. Die Sammellogistik auf Werksebene erfolgt somit dezentral (**L2.2=dezentrale Sammlung**). Der Transport der Abfälle erfolgt ohne Zwischensammelstelle (**ZWS1=keine Zwischensammelstelle**) direkt zur dezentralen Senke. Die innerbetriebliche Senke ist die dezentrale Senke **iS2**.

3. Sammlung mit Poolstellen: Ax L1.1 L2.3 ZWS2 iS1

Die Abfallfraktion Ax (vgl. Legende unten) wird in der Halle im Umleerverfahren (**L1.1=Umleerverfahren**) gesammelt; das Sammel- und Transportmittel ist ein Umleerfahrzeug. Ist das Sammelvolumen des Sammel- und Transportmittels erschöpft, fährt dieses zur Poolstelle. Die Sammellogistik auf Werksebene erfolgt im Poolsystem (**L2.3=Poolsystem**). Der Transport der Abfälle erfolgt zunächst zur Zwischensammelstelle (**ZWS2=Poolstelle**). Ab der Poolstelle übernimmt das „Poolfahrzeug“, das ausschließlich für die Transporte zwischen Poolstelle und zentraler Senke zuständig ist, den Transport der Abfälle zur zentralen Senke **iS1**. Die Transporte sind somit von einander entkoppelt; es bildet sich eine zweistufige Transportkette.

| | |
|-----|---|
| Ax | Abfallart: x=1, nicht überwachungsbedürftiger Abfall x=2, (bes.) überwachungsbedürftiger Abfall x=3, Volumenfraktion x=4, produktionsspezifischer Abfall |
| L1 | Sammellogistik in der Halle (L1.1=Umleerverfahren, L1.2=Wechselverfahren) |
| L2 | Sammellogistik auf Werksebene (L2.1=zentrale Sammlung, L2.2=dezentrale Sammlung, L2.3=Poolsystem) |
| ZWS | Zwischensammelstelle (1=keine, 2=Poolstelle) |
| iS1 | zentrale innerbetriebliche Senke |
| iS2 | dezentrale innerbetriebliche Senke |

A1 a): Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgung Teil I.

Sammlung in der Halle im Wechselverfahren
4. Zentrale Sammlung: Ax L1.2 L2.1 ZWS1 iS1

Die Abfallfraktion Ax (vgl. Legende unten) wird in der Halle im Wechselverfahren (**L1.2=Wechselverfahren**) gesammelt; das Sammel- und Transportmittel ist ein Wechselfahrzeug. Ist die Behälterkapazität des Sammel- und Transportmittels erschöpft, fährt dieses zur zentralen Senke. Die Sammellogistik auf Werksebene erfolgt somit zentral (**L2.1=zentrale Sammlung**). Der Transport der Abfälle erfolgt ohne Zwischensammelstelle (**ZWS1=keine Zwischensammelstelle**) direkt zur zentralen Senke. Die innerbetriebliche Senke ist die zentrale Senke **iS1**.

5. Dezentrale Sammlung: Ax L1.2 L2.2 ZWS1 iS2

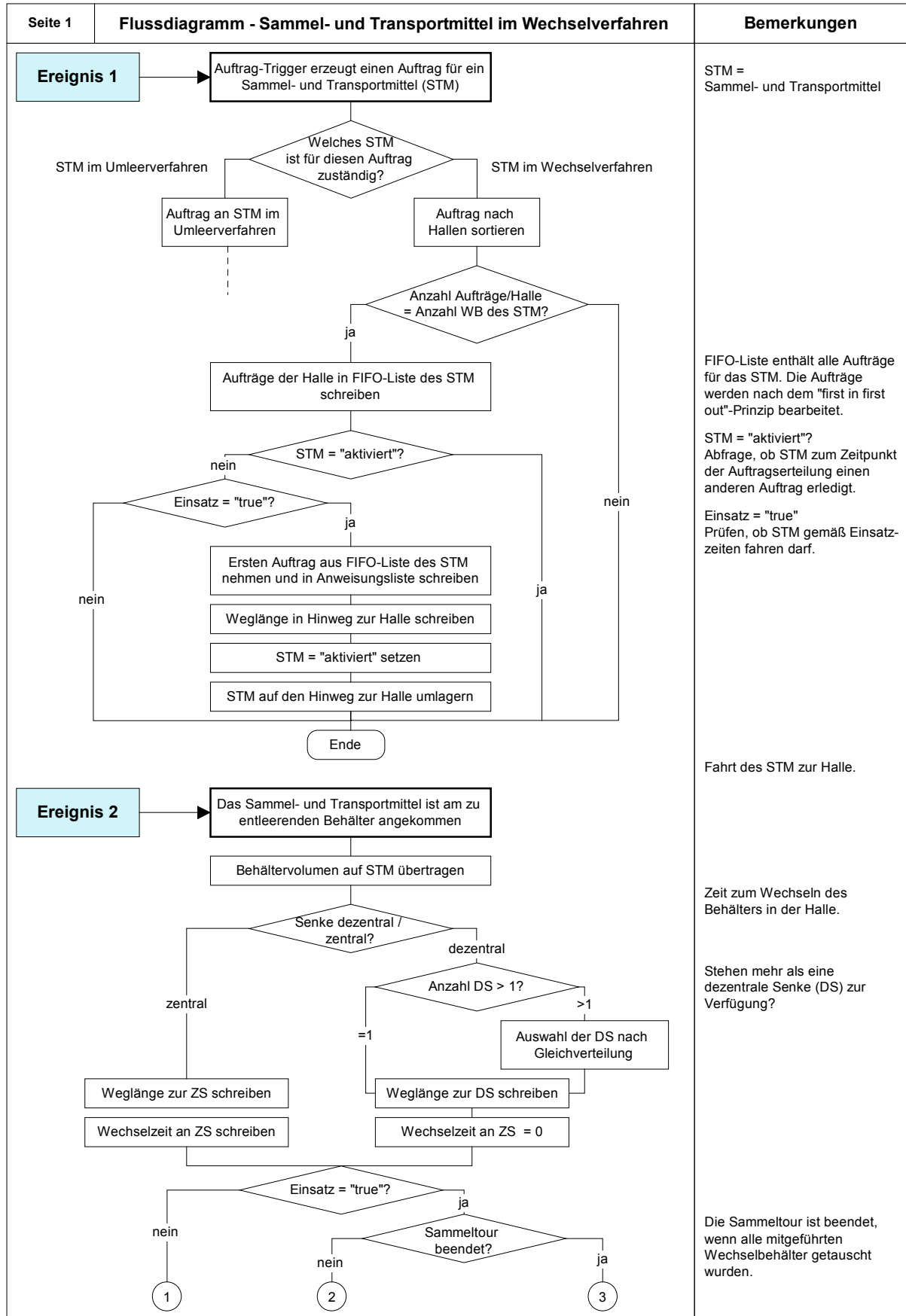
Die Abfallfraktion Ax (vgl. Legende unten) wird in der Halle im Wechselverfahren (**L1.2=Wechselverfahren**) gesammelt; das Sammel- und Transportmittel ist ein Wechselfahrzeug. Ist die Behälterkapazität des Sammel- und Transportmittels erschöpft, fährt dieses zur dezentralen Senke. Die Sammellogistik auf Werksebene erfolgt somit dezentral (**L2.2=dezentrale Sammlung**). Der Transport der Abfälle erfolgt ohne Zwischensammelstelle (**ZWS1=keine Zwischensammelstelle**) direkt zur dezentralen Senke. Die innerbetriebliche Senke ist die dezentrale Senke **iS2**.

6. Sammlung mit Poolstellen: Ax L1.2 L2.3 ZWS2 iS1

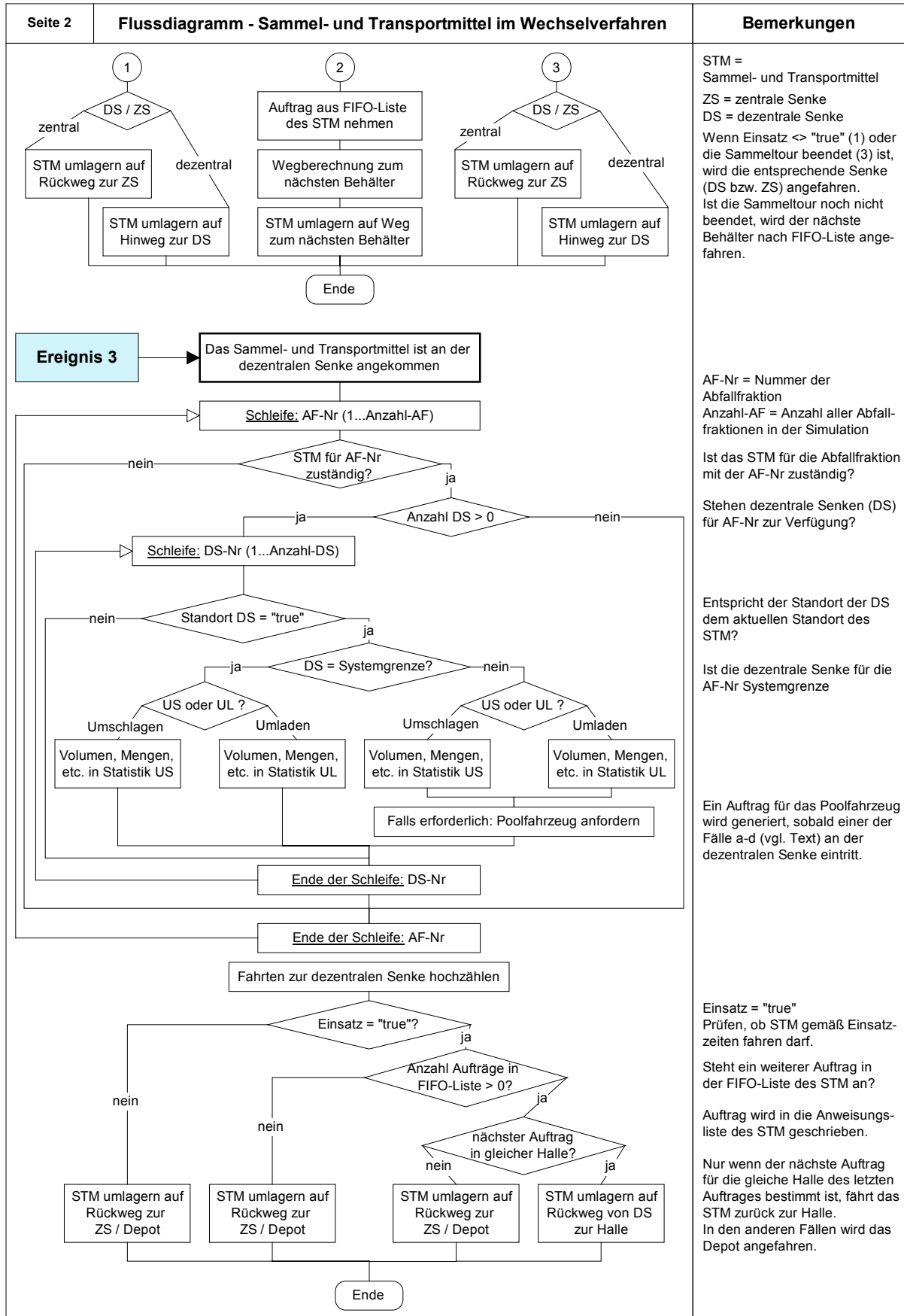
Die Abfallfraktion Ax (vgl. Legende unten) wird in der Halle im Wechselverfahren (**L1.2=Wechselverfahren**) gesammelt; das Sammel- und Transportmittel ist ein Wechselfahrzeug. Ist das Sammelvolumen des Sammel- und Transportmittels erschöpft, fährt dieses zur Poolstelle. Die Sammellogistik auf Werksebene erfolgt im Poolsystem (**L2.3=Poolsystem**). Der Transport der Abfälle erfolgt zunächst zur Zwischensammelstelle (**ZWS2=Poolstelle**). Ab der Poolstelle übernimmt das „Poolfahrzeug“, das ausschließlich für die Transporte zwischen Poolstelle und zentraler Senke zuständig ist, den Transport der Abfälle zur zentralen Senke **iS1**. Die Transporte sind somit von einander entkoppelt; es bildet sich eine zweistufige Transportkette.

| | |
|-----|---|
| Ax | Abfallart: x=1, nicht überwachungsbedürftiger Abfall x=2, (bes.) überwachungsbedürftiger Abfall x=3, Volumenfraktion x=4, produktionsspezifischer Abfall |
| L1 | Sammellogistik in der Halle (L1.1=Umleerverfahren, L1.2=Wechselverfahren) |
| L2 | Sammellogistik auf Werksebene (L2.1=zentrale Sammlung, L2.2=dezentrale Sammlung, L2.3=Poolsystem) |
| ZWS | Zwischensammelstelle (1=keine, 2=Poolstelle) |
| iS1 | zentrale innerbetriebliche Senke |
| iS2 | dezentrale innerbetriebliche Senke |

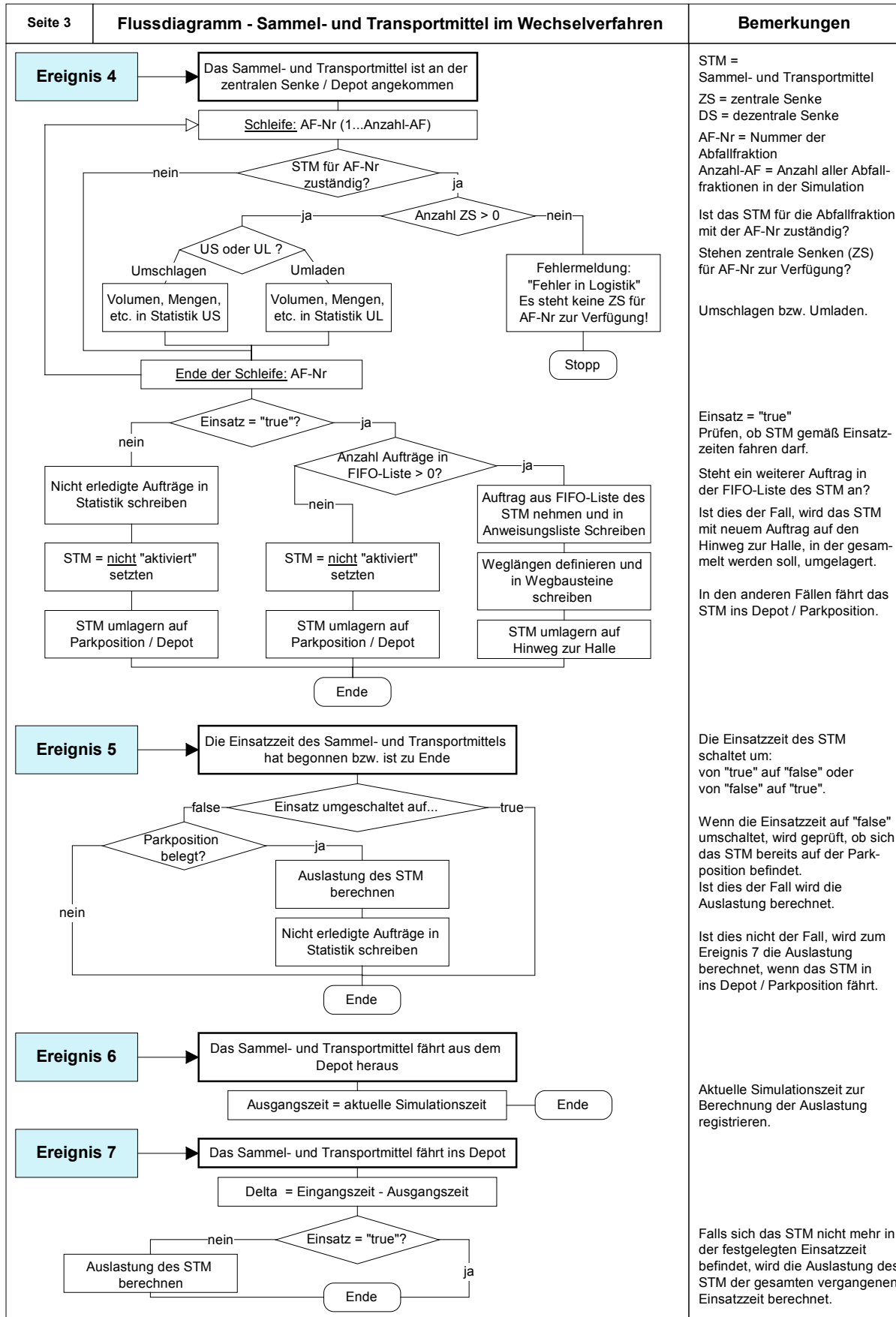
A1 b): Prozessketten der innerbetrieblichen Entsorgung Teil II.



A2 a): Flussdiagramm Teil I: Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren.

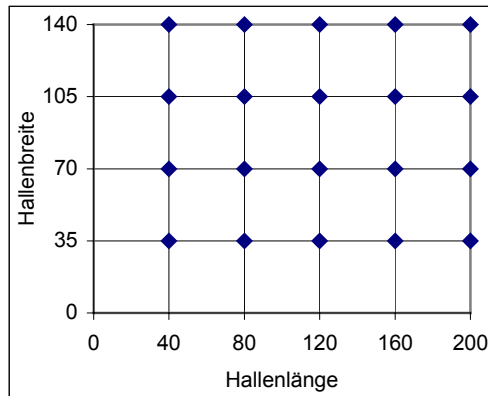


A2 b): Flussdiagramm Teil II: Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren.



A2 c): Flussdiagramm Teil III: Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren.

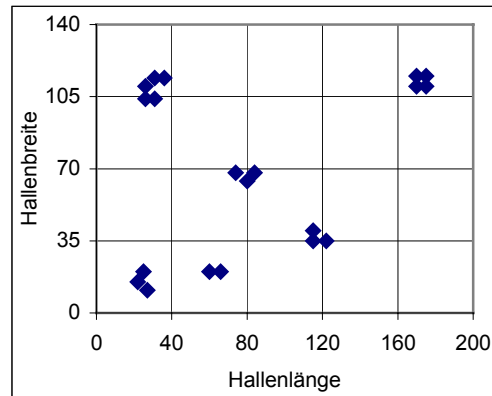
Behältermatrix in der Simulation



Variante 1

Hallenlänge: 200m
Hallenbreite: 140m

Beispiel für reale Behälterstandorte



Variante 2

Merkmale des Sammel- und Transportmittels:

Sammelverfahren in der Halle: Wechselverfahren¹⁴
Anzahl der mitgeführten Sammelbehälter: 4

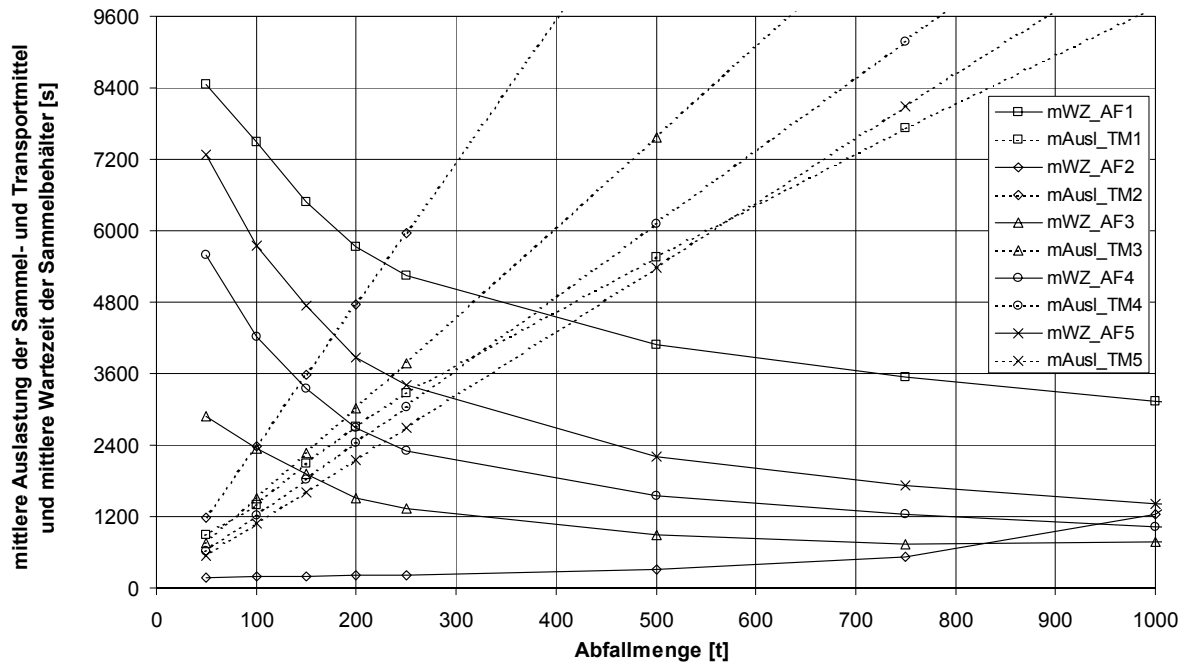
Die Behälter, die geleert werden sollen, werden mit Hilfe eines Zufallsgenerators ermittelt. Die Reihenfolge ist demnach beliebig. Jeweils 4 Behälter lösen eine Sammeltour durch das Sammel- und Transportmittel aus.

Simulierte Sammeltouren: 400 (=1600 Behälterleerungen)
Stichproben: 10

| mittlere Wegstrecke pro Sammeltour | | | | |
|------------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Stichprobe | Variante 1 [m] | Variante 2 [m] | Differenz [m] | Abweichung [%] |
| 1 | 341,7 | 337,1 | 4,6 | 1,35 |
| 2 | 338,1 | 328,5 | 9,6 | 2,84 |
| 3 | 334,4 | 329,9 | 4,5 | 1,35 |
| 4 | 339,2 | 328,6 | 10,6 | 3,12 |
| 5 | 339,7 | 332,7 | 7 | 2,06 |
| 6 | 336,6 | 328,9 | 7,7 | 2,29 |
| 7 | 341,4 | 326,6 | 14,8 | 4,34 |
| 8 | 349,2 | 337,2 | 12 | 3,44 |
| 9 | 346,2 | 333,6 | 12,6 | 3,64 |
| 10 | 341,8 | 339,4 | 2,4 | 0,70 |
| Abweichung | | Mittelwert: | 8,58 | 2,51 |

A3: Gegenüberstellung der zurückgelegten Wege bei Sammeltouren in der Halle im Wechselverfahren, die mit Hilfe der Behältermatrix in der Simulation berechnet wurden und den Wegstrecken bei realen Behälterstandorten.

¹⁴ Beim Umlerverfahren werden die Abweichungen größer, wenn mehrere Behälter, wie in Variante 2 dargestellt, gebündelt an einem Standort stehen. Ist bekannt, dass jeweils immer 2 Behälter an einem Standort stehen, so ist z. B. eine gute Näherung, die in der Simulation berechneten Wege zwischen den Behältern zu halbieren, u.s.w..



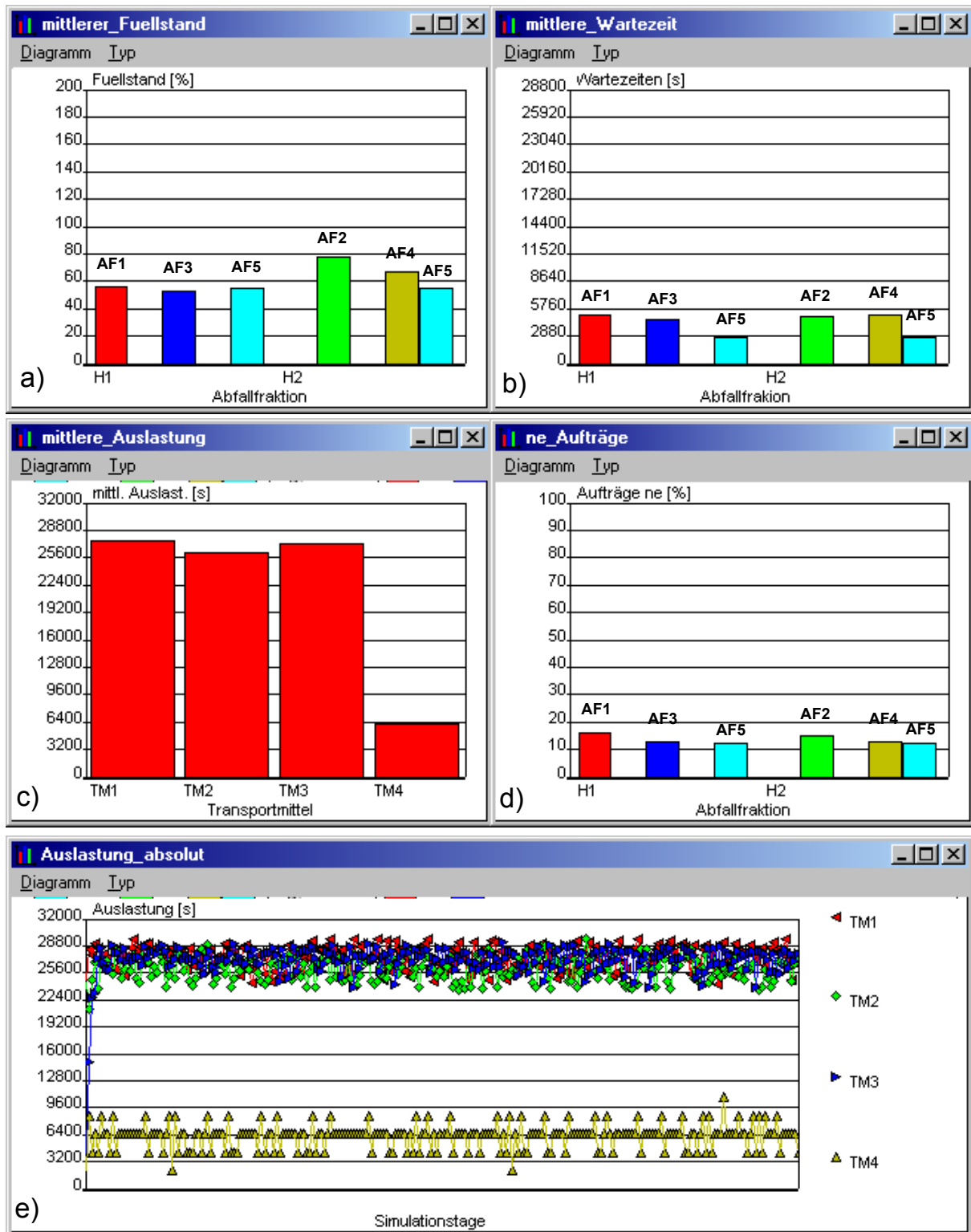
A4: Mittlere Auslastung der Sammel- und Transportmittel und mittlere Wartezeit der Sammelbehälter im Simulationsmodell der Variante 1 (vgl. Kapitel 7.2.1).

SimdiAL - Eingabeparameter (Planspiel)

| Abfallarten und -mengen | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| Kürzel | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 |
| Bezeichnung | PPK | Folie | Restabfall | Holz | Fe-Schrott |
| Menge [t/a] | 500 | 150 | 600 | 300 | 3500 |
| Dichte (unverdichtet) [t/m ³] | 0,2 | 0,05 | 0,25 | 0,2 | 0,6 |
| Dichte (verdichtet) [t/m ³] | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | - |
| Hallen | | | | | |
| Kürzel | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
| Hallenlänge [m] | 180 | 380 | | | |
| Hallenbreite [m] | 125 | 130 | | | |
| Anzahl Fraktionen | 3 | 3 | - | - | - |
| Fraktion | AF1 | AF2 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS4 | - | - | - | - |
| Behälterzahl | 87 | 54 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 120 | 120 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF3 | AF4 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | - | DS1, DS2 | - | - | - |
| Behälterzahl | 75 | 43 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 120 | 120 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF5 | AF5 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS3 | - | - | - | - |
| Behälterzahl | 65 | 83 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 500 | 500 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 50 | 50 | - | - | - |
| *) Wenn keine dezentrale Senke angegeben ist, wird zentral gesammelt. | | | | | |
| Zentrale Senken | | | | | |
| Kürzel | ZS1 | ZS2 | ZS3 | ZS4 | ZS5 |
| Abfallfraktion: | AF1 | AF2 | AF3 | AF5 | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | UL | - |
| Verdichtung | ja | ja | ja | nein | - |
| Volumen [m ³] | 30 | 20 | 30 | 40 | - |
| über Poolstelle: | DS4 | - | - | - | - |
| Dezentrale Senken/ Poolstelle | | | | | |
| Kürzel | DS1 | DS2 | DS3 | DS4 | DS5 |
| Abfallfraktion: | AF4 | AF4 | AF5 | AF1 | - |
| aus Halle: | 2 | 2 | 1 | 1 | - |
| Weg_Halle_DS [m] | 90 | 100 | 130 | 85 | - |
| Weg_DS_ZS [m] | 720 | 240 | 610 | 920 | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | US | - |
| Systemgrenze (nein=Poolstelle): | ja | ja | ja | nein | - |
| Verdichtung | nein | ja | nein | - | - |
| Volumen [m ³] | 30 | 20 | 40 | - | - |
| Transportmittel | | | | | |
| Kürzel | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
| Umleeren oder Wechseln | u | u | w | w | - |
| Kapazität [l] | 3300 | 2720 | - | - | - |
| Anzahl mitgeführter Behälter | 3 | 4 | 1 | 5 | - |
| Geschwindigkeit [m/s] | 3 | 3 | 3,5 | 5 | - |
| Poolfahrzeug | nein | nein | nein | ja | - |
| Anzahl AF | 2 | 2 | 1 | 1 | - |
| AF1 | x | - | - | x | - |
| AF2 | x | - | - | - | - |
| AF3 | - | x | - | - | - |
| AF4 | - | x | - | - | - |
| AF5 | - | - | x | - | - |
| Umleer-/Wechselzeiten | | | | | |
| - in der Halle/ an Poolstelle [s]: | 30 | 30 | 20 | 60 | - |
| - an der Senke [s]: | 180 | 180 | 60 | 300 | - |
| Einsatzzeiten: | | | | | |
| Tage | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | - |
| Schicht | früh | früh | früh | früh | - |
| Zeit [h:min] | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | - |

AF = Abfallfraktion, ZS = zentrale Senke, DS = dezentrale Senke

A5 a): Eingabeparameter: Ausgangssituation im Planspiel.



- H1, H2 Halle 1, Halle 2
 AF1...AF5 Abfallfraktion 1 - 5 (PPK, Folie, Restabfall, Holz, Fe-Schrott)
 TM1, TM2 Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren
 TM3 Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren
 TM4 Poolfahrzeug im Wechselverfahren

A5 b): Ausgangssituation im Planspiel: Ergebniskennzahlen nach Simulationdurchlauf.

SimdiAL - Eingabeparameter (Planspiel)

| Abfallarten und -mengen | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 |
| Bezeichnung | PPK | Folie | Restabfall | Holz | Fe-Schrott |
| Menge [t/a] | 500 | 150 | 600 | 300 | 3500 |
| Dichte (unverdichtet) [t/m ³] | 0,2 | 0,05 | 0,25 | 0,2 | 0,6 |
| Dichte (verdichtet) [t/m ³] | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | - |

| Hallen | | | | | |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kürzel | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
| Hallenlänge [m] | 180 | 380 | | | |
| Hallenbreite [m] | 125 | 130 | | | |
| Anzahl Fraktionen | 3 | 3 | - | - | - |
| Fraktion | AF1 | AF2 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS4 | - | - | - | - |
| Behälterzahl | 87 | 54 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 120 | 120 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF3 | AF4 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | - | DS1, DS2 | - | - | - |
| Behälterzahl | 75 | 43 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 120 | 120 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF5 | AF5 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS3 | DS3 | - | - | - |
| Behälterzahl | 65 | 83 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 500 | 500 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 50 | 50 | - | - | - |

*) Wenn keine dezentrale Senke angegeben ist, wird zentral gesammelt.

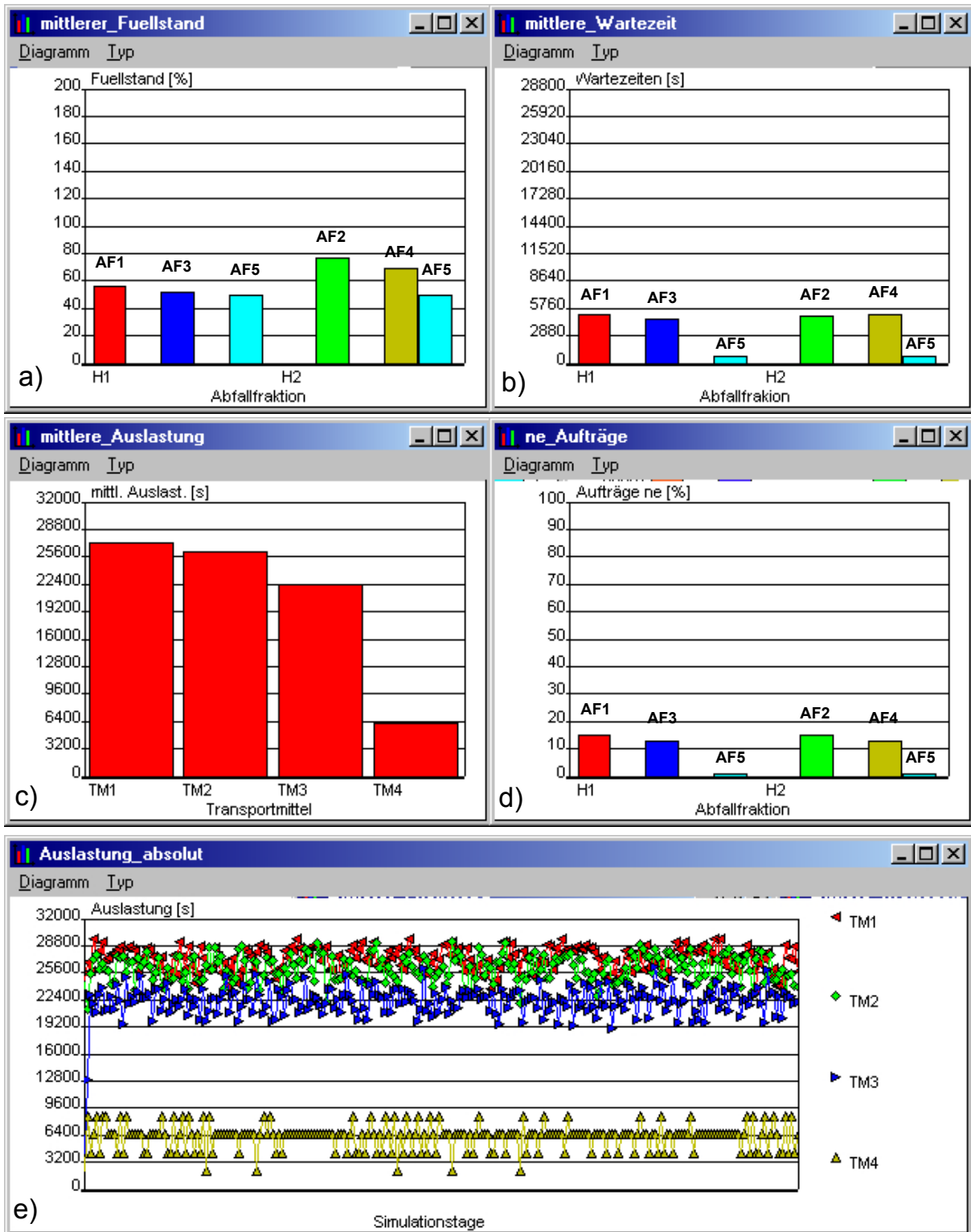
| Zentrale Senken | | | | | |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | ZS1 | ZS2 | ZS3 | ZS4 | ZS5 |
| Abfallfraktion: | AF1 | AF2 | AF3 | - | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | - | - |
| Verdichtung | ja | ja | ja | - | - |
| Volumen [m ³] | 30 | 20 | 30 | - | - |
| über Poolstelle: | DS4 | - | - | - | - |

| Dezentrale Senken/ Poolstelle | | | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | DS1 | DS2 | DS3 | DS4 | DS5 |
| Abfallfraktion: | AF4 | AF4 | AF5 | AF1 | - |
| aus Halle: | 2 | 2 | 1, 2 | 1 | - |
| Weg_Halle_DS [m] | 90 | 100 | 130, 120 | 85 | - |
| Weg_DS_ZS [m] | 720 | 240 | 610 | 920 | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | US | - |
| Systemgrenze (nein=Poolstelle): | ja | ja | ja | nein | - |
| Verdichtung | nein | ja | nein | - | - |
| Volumen [m ³] | 30 | 20 | 40 | - | - |

| Transportmittel | | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| Kürzel | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
| Umleeren oder Wechseln | u | u | w | w | - |
| Kapazität [l] | 3300 | 2720 | - | - | - |
| Anzahl mitgeführter Behälter | 3 | 4 | 1 | 5 | - |
| Geschwindigkeit [m/s] | 3 | 3 | 3,5 | 5 | - |
| Poolfahrzeug | nein | nein | nein | ja | - |
| Anzahl AF | 2 | 2 | 1 | 1 | - |
| AF1 | x | - | - | x | - |
| AF2 | x | - | - | - | - |
| AF3 | - | x | - | - | - |
| AF4 | - | x | - | - | - |
| AF5 | - | - | x | - | - |
| Umleer-/Wechselzeiten | | | | | |
| - in der Halle/ an Poolstelle [s]: | 30 | 30 | 20 | 60 | - |
| - an der Senke [s]: | 180 | 180 | 60 | 300 | - |
| Einsatzzeiten: | | | | | |
| Tage | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | - |
| Schicht | früh | früh | früh | früh | - |
| Zeit [h:min] | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | - |

AF = Abfallfraktion, ZS = zentrale Senke, DS = dezentrale Senke

A5 c): Eingabeparameter: Optimierung 1 im Planspiel.



- H1, H2 Halle 1, Halle 2
- AF1...AF5 Abfallfraktion 1 - 5 (PPK, Folie, Restabfall, Holz, Fe-Schrott)
- TM1, TM2 Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren
- TM3 Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren
- TM4 Poolfahrzeug im Wechselverfahren

A5 d): Optimierung 1 im Planspiel (Dezentrale Sammlung der Abfallfraktion AF5 aus Halle 2): Ergebniskennzahlen nach Simulationsdurchlauf.

SimdiAL - Eingabeparameter (Planspiel)

| Abfallarten und -mengen | | | | | |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 |
| Bezeichnung | PPK | Folie | Restabfall | Holz | Fe-Schrott |
| Menge [t/a] | 500 | 150 | 600 | 300 | 3500 |
| Dichte (unverdichtet) [t/m³] | 0,2 | 0,05 | 0,25 | 0,2 | 0,6 |
| Dichte (verdichtet) [t/m³] | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | - |

| Hallen | | | | | |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kürzel | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
| Hallenlänge [m] | 180 | 380 | | | |
| Hallenbreite [m] | 125 | 130 | | | |
| Anzahl Fraktionen | 3 | 3 | - | - | - |
| Fraktion | AF1 | AF2 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS4 | - | - | - | - |
| Behälterzahl | 87 | 54 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 120 | 120 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF3 | AF4 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | - | DS1, DS2 | - | - | - |
| Behälterzahl | 75 | 43 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 120 | 120 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF5 | AF5 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS3 | DS3 | - | - | - |
| Behälterzahl | 65 | 83 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 500 | 500 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 50 | 50 | - | - | - |

*) Wenn keine dezentrale Senke angegeben ist, wird zentral gesammelt.

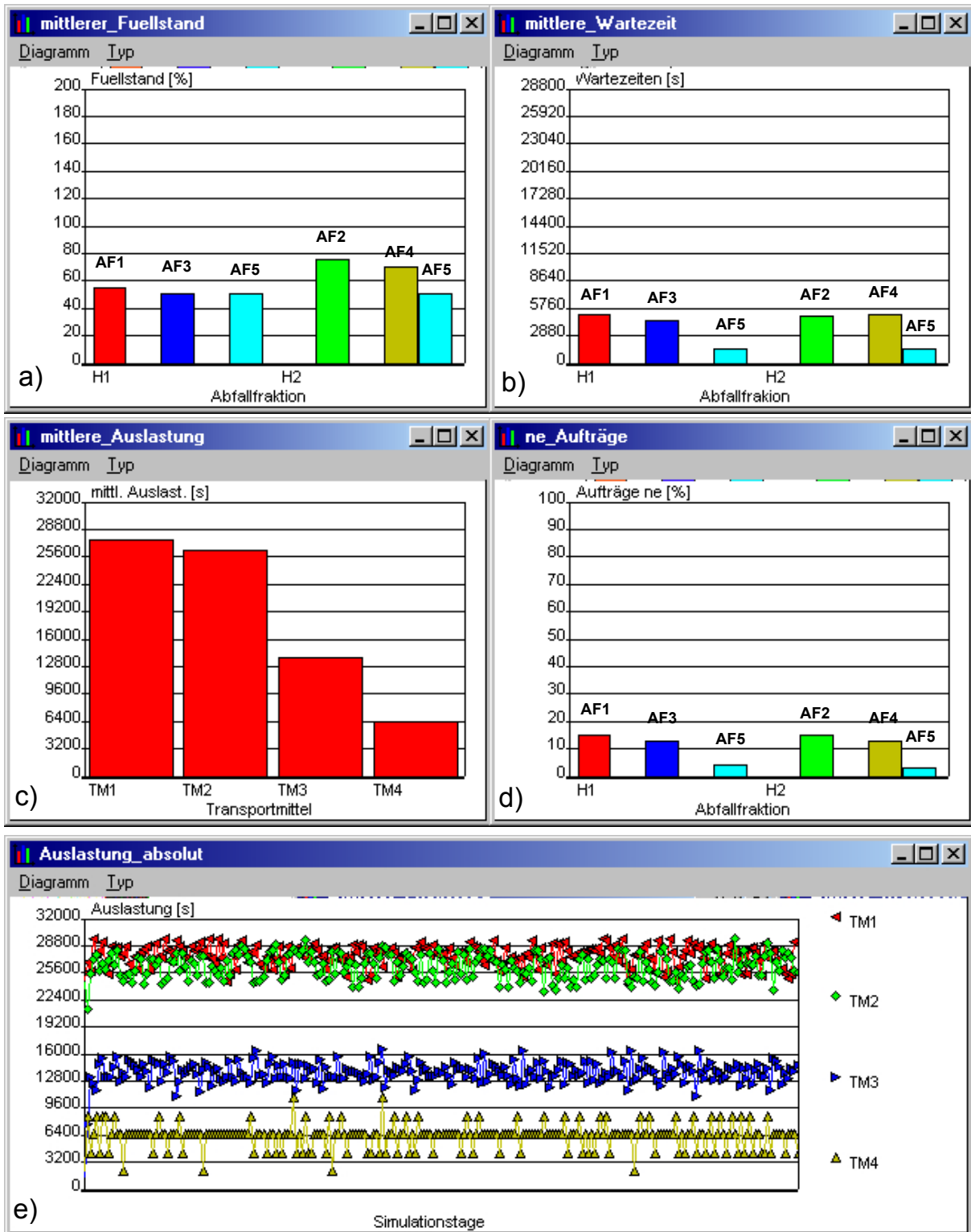
| Zentrale Senken | | | | | |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | ZS1 | ZS2 | ZS3 | ZS4 | ZS5 |
| Abfallfraktion: | AF1 | AF2 | AF3 | - | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | - | - |
| Verdichtung | ja | ja | ja | - | - |
| Volumen [m³] | 30 | 20 | 30 | - | - |
| über Poolstelle: | DS4 | - | - | - | - |

| Dezentrale Senken/ Poolstelle | | | | | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | DS1 | DS2 | DS3 | DS4 | DS5 |
| Abfallfraktion: | AF4 | AF4 | AF5 | AF1 | - |
| aus Halle: | 2 | 2 | 1, 2 | 1 | - |
| Weg_Halle_DS [m] | 90 | 100 | 130, 120 | 85 | - |
| Weg_DS_ZS [m] | 720 | 240 | 610 | 920 | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | US | - |
| Systemgrenze (nein=Poolstelle): | ja | ja | ja | nein | - |
| Verdichtung | nein | ja | nein | - | - |
| Volumen [m³] | 30 | 20 | 40 | - | - |

| Transportmittel | | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| Kürzel | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
| Umleeren oder Wechseln | u | u | w | w | - |
| Kapazität [l] | 3300 | 2720 | - | - | - |
| Anzahl mitgeführter Behälter | 3 | 4 | 3 | 5 | - |
| Geschwindigkeit [m/s] | 3 | 3 | 3,5 | 5 | - |
| Poolfahrzeug | nein | nein | nein | ja | - |
| Anzahl AF | 2 | 2 | 1 | 1 | - |
| AF1 | x | - | - | x | - |
| AF2 | x | - | - | - | - |
| AF3 | - | x | - | - | - |
| AF4 | - | x | - | - | - |
| AF5 | - | - | x | - | - |
| Umleer-/Wechselzeiten | | | | | |
| - in der Halle/ an Poolstelle [s]: | 30 | 30 | 20 | 60 | - |
| - an der Senke [s]: | 180 | 180 | 60 | 300 | - |
| Einsatzzeiten: | | | | | |
| Tage | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | - |
| Schicht | früh | früh | früh | früh | - |
| Zeit [h:min] | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | - |

AF = Abfallfraktion, ZS = zentrale Senke, DS = dezentrale Senke

A5 e): Eingabeparameter: Optimierung 2 im Planspiel.



- H1, H2 Halle 1, Halle 2
 AF1...AF5 Abfallfraktion 1 - 5 (PPK, Folie, Restabfall, Holz, Fe-Schrott)
 TM1, TM2 Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren
 TM3 Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren
 TM4 Poolfahrzeug im Wechselverfahren

A5 f): Optimierung 2 im Planspiel (Erhöhung der Behälterkapazität des Sammel- und Transportmittels TM3 von 1 auf 3): Ergebniskennzahlen nach Simulationsdurchlauf.

SimdiAL - Eingabeparameter (Planspiel)

| Abfallarten und -mengen | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | PPK | Folie | Restabfall | Holz | Fe-Schrott |
| Bezeichnung | PPK | Folie | Restabfall | Holz | Fe-Schrott |
| Menge [t/a] | 500 | 150 | 600 | 300 | 3500 |
| Dichte (unverdichtet) [t/m ³] | 0,2 | 0,05 | 0,25 | 0,2 | 0,6 |
| Dichte (verdichtet) [t/m ³] | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | - |

| Hallen | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kürzel | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
| Hallenlänge [m] | 180 | 380 | - | - | - |
| Hallenbreite [m] | 125 | 130 | - | - | - |
| Anzahl Fraktionen | 3 | 3 | - | - | - |
| Fraktion | AF1 | AF2 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS4 | DS5 | - | - | - |
| Behälterzahl | 44 | 27 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 360 | 360 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF3 | AF4 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | - | DS1, DS2 | - | - | - |
| Behälterzahl | 38 | 22 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 360 | 360 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF5 | AF5 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS3 | DS3 | - | - | - |
| Behälterzahl | 65 | 83 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 500 | 500 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 50 | 50 | - | - | - |

*) Wenn keine dezentrale Senke angegeben ist, wird zentral gesammelt.

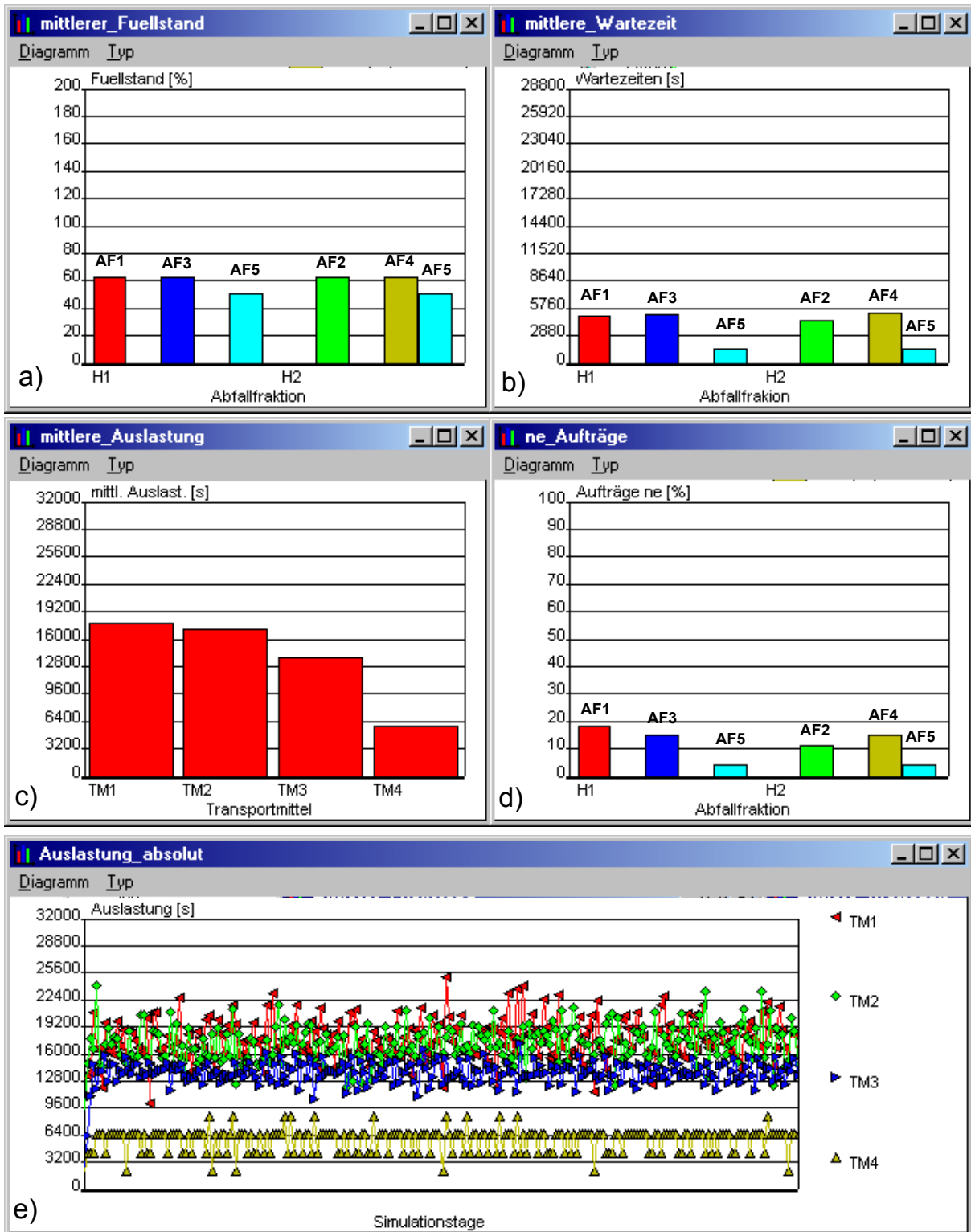
| Zentrale Senken | ZS1 | ZS2 | ZS3 | ZS4 | ZS5 |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | ZS1 | ZS2 | ZS3 | ZS4 | ZS5 |
| Abfallfraktion: | AF1 | - | AF3 | - | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | - | UL | - | - |
| Verdichtung | ja | - | ja | - | - |
| Volumen [m ³] | 30 | - | 30 | - | - |
| über Poolstelle: | DS4 | - | - | - | - |

| Dezentrale Senken/ Poolstelle | DS1 | DS2 | DS3 | DS4 | DS5 |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | DS1 | DS2 | DS3 | DS4 | DS5 |
| Abfallfraktion: | AF4 | AF4 | AF5 | AF1 | AF2 |
| aus Halle: | 2 | 2 | 1, 2 | 1 | 2 |
| Weg_Halle_DS [m] | 90 | 100 | 130, 120 | 85 | 45 |
| Weg_DS_ZS [m] | 720 | 240 | 610 | 920 | 400 |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | US | UL |
| Systemgrenze (nein=Poolstelle): | ja | ja | ja | nein | ja |
| Verdichtung | nein | ja | nein | - | nein |
| Volumen [m ³] | 30 | 20 | 40 | - | 25 |

| Transportmittel | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| Kürzel | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
| Umleeren oder Wechseln | u | u | w | w | - |
| Kapazität [l] | 3300 | 2720 | - | - | - |
| Anzahl mitgeführter Behälter | 3 | 4 | 3 | 5 | - |
| Geschwindigkeit [m/s] | 3 | 3 | 3,5 | 5 | - |
| Poolfahrzeug | nein | nein | nein | ja | - |
| Anzahl AF | 2 | 2 | 1 | 1 | - |
| AF1 | x | - | - | x | - |
| AF2 | x | - | - | - | - |
| AF3 | - | x | - | - | - |
| AF4 | - | x | - | - | - |
| AF5 | - | - | x | - | - |
| Umleer-/Wechselzeiten | | | | | |
| - in der Halle/ an Poolstelle [s]: | 30 | 30 | 20 | 60 | - |
| - an der Senke [s]: | 180 | 180 | 60 | 300 | - |
| Einsatzzeiten: | | | | | |
| Tage | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | Mo,Di,Mi,Do,Fr | - |
| Schicht | früh | früh | früh | früh | - |
| Zeit [h:min] | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | - |

AF = Abfallfraktion, ZS = zentrale Senke, DS = dezentrale Senke

A5 g): Eingabeparameter: Optimierung 3 im Planspiel.



- H1, H2 Halle 1, Halle 2
 AF1...AF5 Abfallfraktion 1 - 5 (PPK, Folie, Restabfall, Holz, Fe-Schrott)
 TM1, TM2 Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren
 TM3 Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren
 TM4 Poolfahrzeug im Wechselverfahren

A5 h): Optimierung 3 im Planspiel (Erhöhung des Volumens der Sammelbehälter für die Abfallfraktionen AF1-AF4): Ergebniskennzahlen nach Simulationsdurchlauf.

SimdiAL - Eingabeparameter (Planspiel)

| Abfallarten und -mengen | AF1 | AF2 | AF3 | AF4 | AF5 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | PPK | Folie | Restabfall | Holz | Fe-Schrott |
| Bezeichnung | PPK | Folie | Restabfall | Holz | Fe-Schrott |
| Menge [t/a] | 500 | 150 | 600 | 300 | 3500 |
| Dichte (unverdichtet) [t/m ³] | 0,2 | 0,05 | 0,25 | 0,2 | 0,6 |
| Dichte (verdichtet) [t/m ³] | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | - |

| Hallen | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kürzel | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
| Hallenlänge [m] | 180 | 380 | | | |
| Hallenbreite [m] | 125 | 130 | | | |
| Anzahl Fraktionen | 3 | 3 | - | - | - |
| Fraktion | AF1 | AF2 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS4 | DS5 | - | - | - |
| Behälterzahl | 44 | 27 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 360 | 360 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF3 | AF4 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | - | DS1, DS2 | - | - | - |
| Behälterzahl | 38 | 22 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 360 | 360 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 100 | 100 | - | - | - |
| Fraktion | AF5 | AF5 | - | - | - |
| Weg zur ZS [m] | 800 | 1000 | - | - | - |
| DS-Nummer *) | DS3 | DS3 | - | - | - |
| Behälterzahl | 65 | 83 | - | - | - |
| Behältervolumen [l] | 500 | 500 | - | - | - |
| Füllgrad | 0,9 | 0,9 | - | - | - |
| Mengenanteil [%] | 50 | 50 | - | - | - |

*) Wenn keine dezentrale Senke angegeben ist, wird zentral gesammelt.

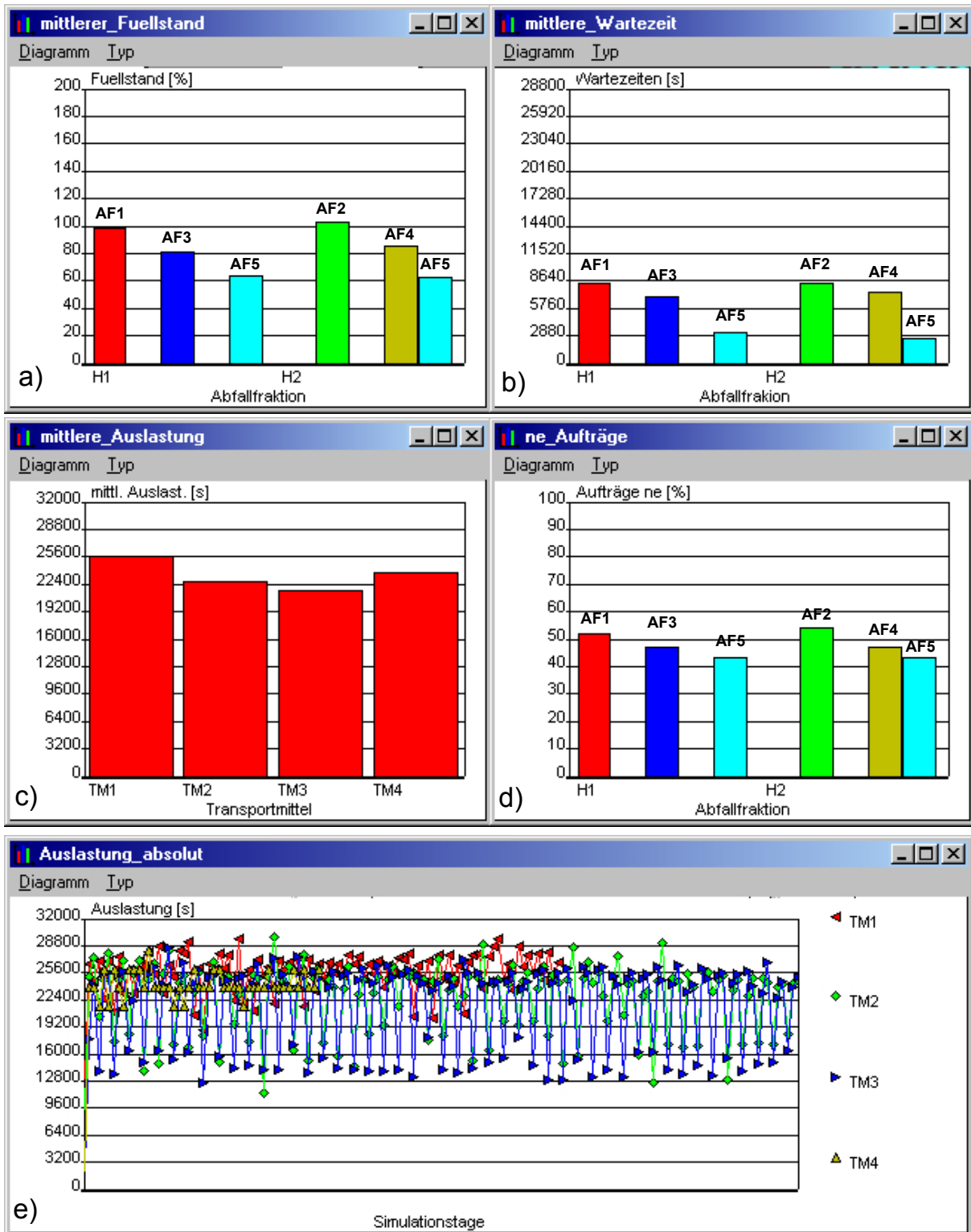
| Zentrale Senken | ZS1 | ZS2 | ZS3 | ZS4 | ZS5 |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | ZS1 | ZS2 | ZS3 | ZS4 | ZS5 |
| Abfallfraktion: | AF1 | - | AF3 | - | - |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | - | UL | - | - |
| Verdichtung | ja | - | ja | - | - |
| Volumen [m ³] | 30 | - | 30 | - | - |
| über Poolstelle: | DS4 | - | - | - | - |

| Dezentrale Senken/ Poolstelle | DS1 | DS2 | DS3 | DS4 | DS5 |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Kürzel | DS1 | DS2 | DS3 | DS4 | DS5 |
| Abfallfraktion: | AF4 | AF4 | AF5 | AF1 | AF2 |
| aus Halle: | 2 | 2 | 1, 2 | 1 | 2 |
| Weg_Halle_DS [m] | 90 | 100 | 130, 120 | 85 | 45 |
| Weg_DS_ZS [m] | 720 | 240 | 610 | 920 | 400 |
| Umschlag (US) / Umladen (UL) | UL | UL | UL | US | UL |
| Systemgrenze (nein=Poolstelle): | ja | ja | ja | nein | ja |
| Verdichtung | nein | ja | nein | - | nein |
| Volumen [m ³] | 30 | 20 | 40 | - | 25 |

| Transportmittel | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Kürzel | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 | TM5 |
| Umleeren oder Wechseln | u | u | w | w | - |
| Kapazität [l] | 3300 | 2720 | - | - | - |
| Anzahl mitgeführter Behälter | 3 | 4 | 3 | 5 | - |
| Geschwindigkeit [m/s] | 3 | 3 | 3,5 | 5 | - |
| Poolfahrzeug | nein | nein | nein | ja | - |
| Anzahl AF | 2 | 2 | 1 | 1 | - |
| AF1 | x | - | - | x | - |
| AF2 | x | - | - | - | - |
| AF3 | - | x | - | - | - |
| AF4 | - | x | - | - | - |
| AF5 | - | - | x | - | - |
| Umleer-/Wechselzeiten | | | | | |
| - in der Halle/ an Poolstelle [s]: | 30 | 30 | 20 | 60 | - |
| - an der Senke [s]: | 180 | 180 | 60 | 300 | - |
| Einsatzzeiten: | | | | | |
| Tage | Di, Do | Mo, Mi, Fr | Mo, Mi, Fr | Do | - |
| Schicht | früh | früh | früh | früh | - |
| Zeit [h:min] | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | 0:00 - 8:00 | - |

AF = Abfallfraktion, ZS = zentrale Senke, DS = dezentrale Senke

A5 i): Eingabeparameter: Optimierung 4 im Planspiel.



H1, H2 Halle 1, Halle 2
 AF1...AF5 Abfallfraktion 1 - 5 (PPK, Folie, Restabfall, Holz, Fe-Schrott)
 TM1, TM2 Sammel- und Transportmittel im Umleerverfahren
 TM3 Sammel- und Transportmittel im Wechselverfahren
 TM4 Poolfahrzeug im Wechselverfahren

A5 j): Optimierung 4 im Planspiel (Reduzierung der Einsatzzeiten der Sammel- und Transportmittel): Ergebniskennzahlen nach Simulationdurchlauf.

Lebenslauf

Name: Robert Schulz
Geburtsdatum: 04.06.1970
Geburtsort: Esslingen
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig

Schule

1977-1981 Grundschule, Stuttgart
1981-1990 Leibniz-Gymnasium, Stuttgart. Mai 1990 Abitur

Studium

Oktober 1990 Studium des allgemeinen Maschinenbaus an der
Universität Stuttgart
Oktober 1995 Abschluss als Diplom-Ingenieur

Berufliche Tätigkeit

seit Oktober 1995 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für
Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart