

# **Abschlussbericht**

## **Simulationsgestützte Planung und Nutzung von Getränke-Abfüllanlagen**

Dieses Vorhaben (Projekt-Nr. 12265-N) ist aus Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert und im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik e.V., Bremen, durchgeführt worden.

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

**Dipl.-Ing. Makrem Kadachi (Projektleitung)**

**fml** • Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstraße 15

D-84758 Garching bei München

Lehrstuhl fml

12265-N

---

Name der Forschungsstelle(n)

---

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.12.1999 bis 31.08.2001

---

Bewilligungszeitraum

**Schlussbericht für den Zeitraum: 01.12.1999 bis 31.08.2001**

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema:

Simulationsgestützte Planung und Nutzung von Getränke-Abfüllanlagen

Garching, 06.12.2001

---

Ort, Datum

---

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>I</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>V</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 WISSENSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG .....	1
1.2 KONVENTIONELLE AUSLEGUNGSVERFAHREN .....	2
1.3 SIMULATIONSTECHNIK.....	3
<b>2 FORSCHUNGSZIEL</b> .....	<b>7</b>
2.1 ZIEL DER FORSCHUNGSARBEITEN .....	7
2.2 AUSGANGSSITUATION.....	7
2.3 VORGEHENSWEISE .....	8
2.3.1 Systemanalyse .....	8
2.3.2 Anforderungsprofil .....	8
2.3.3 Erstellung der Geräte-Bibliothek.....	9
2.3.4 Das simulationsgestützte Assistenzsystem .....	9
<b>3 STAND DER TECHNIK DER GETRÄNKE-ABFÜLLANLAGEN</b> .....	<b>11</b>
3.1 BEGRIFFSDEFINITION EINER ABFÜLLANLAGE .....	11
3.2 ALLGEMEINE BESCHREIBUNG EINER ABFÜLLANLAGE .....	15
3.2.1 Übersicht .....	15
3.2.2 Beispiel einer Abfüllanlage .....	16
3.2.3 Unterscheidung zwischen Ein- und Mehrweg-Abfüllanlagen.....	17
3.3 AGGREGATE EINER ABFÜLLANLAGE .....	19
3.3.1 Ent- und Bepalettierer.....	20

3.3.2	Kastenerkennung .....	20
3.3.3	Aus- und Einpacker .....	21
3.3.4	Abschrauber .....	22
3.3.5	Inspektionsmaschinen .....	22
3.3.6	Flaschenreinigungsmaschine .....	23
3.3.7	Füller .....	24
3.3.8	Etikettierung.....	25
3.3.9	Kastenreinigungsmaschine .....	25
3.3.10	Zusammenfassung .....	26
3.4	TRANSPORTTECHNIK .....	26
3.4.1	Paletten- und Gebindetransport.....	27
3.4.2	Behältertransport .....	28
3.5	ANLAGENAUSLEGUNG UND -STEUERUNG .....	29
3.5.1	Anlagenauslegung.....	30
3.5.2	Pufferauslegung im Nassbereich.....	34
3.5.3	Regelungskonzepte im Nassbereich .....	38
3.5.4	Anlagenregelung zwischen Nass- und Trockenbereich.....	43
<b>4</b>	<b>ANFORDERUNGEN AN EINEM SIMULATIONSWERKZEUG .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>ABBILDUNG EINER ABFÜLLANLAGE .....</b>	<b>49</b>
5.1	EINFÜHRUNG IN DER ABBILDUNGSMETHODIK .....	49
5.1.1	Die Aufbaustruktur eines Modells .....	51
5.1.2	Die Ablaufstruktur eines Modells .....	52
5.2	HIERARCHISCHE STRUKTUR DES GESAMTMODELLS.....	53

5.3	ABBILDUNG DES SYSTEMS „ABFÜLLANLAGE“ .....	54
5.4	KLASSIFIZIERUNG DER AGGREGATE .....	57
5.5	VORGEHENSWEISE BEI DER ABBILDUNG DER AGGREGATE .....	59
5.5.1	Kennzeichnung der Elemente der Aggregate .....	62
5.5.2	Kennzeichnung eines Aggregats .....	63
5.5.3	Hierarchische Untergliederung im Gesamtsystem.....	63
5.6	ABBILDUNG DER FÖRDERTECHNISCHEN ANBINDUNGEN.....	65
5.6.1	Abbildung der Transportverbindung im Trockenbereich .....	65
5.6.2	Abbildung der Transportverbindung im Nassbereich.....	72
5.6.3	Einfluss der Sammelbehälter auf die Abbildung der Aggregate im Nassbereich .....	83
5.7	ZUSAMMENFASSUNG .....	85
<b>6</b>	<b>MODELLIERUNG UND IMPLEMENTIERUNG .....</b>	<b>86</b>
6.1	DIE BAUSTEINBIBLIOTHEK .....	86
6.1.1	Das Modellieren der Aggregate .....	86
6.1.2	Das Modellieren der Transportsysteme .....	92
6.1.3	Das Modellieren eines externen Puffers .....	94
6.1.4	Hilfsbausteine und Hilfsbereiche .....	96
6.1.5	Zusammenfassung .....	98
6.2	VORGEHENSWEISE BEI MODELLAUFBAU .....	98
6.2.1	Das Definieren der Behälter .....	98
6.2.2	Das Definieren der Prozessfähigkeiten .....	100
6.2.3	Das Definieren des Arbeitsplans .....	101
6.2.4	Der Aufbau eines Modells .....	102

<b>7</b>	<b>EXPERIMENTIEREN UND AUSWERTEN .....</b>	<b>104</b>
7.1	DIE DURCHFÜHRUNG VON EXPERIMENTE .....	104
7.1.1	Der Experiment-Assistent.....	104
7.1.2	Darstellung und Animation .....	106
7.1.3	Statistische Auswertung .....	108
7.1.4	Verwendung der Simulationsergebnisse .....	111
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>117</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>120</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestandteile einer Abfüllanlage .....	15
Abbildung 2: Darstellung einer repräsentativen Abfüllanlage .....	16
Abbildung 3: Abfüllanlagen als geschlossene Einheit .....	17
Abbildung 4: Materialflussdiagramm einer Einweg-Abfüllanlage .....	18
Abbildung 5: Materialflussdiagramm eine Mehrweg-Abfüllanlage .....	19
Abbildung 6: Be- und Entpalettierer.....	20
Abbildung 7: Aus- und Einpacker .....	21
Abbildung 8: Abschrauber .....	22
Abbildung 9: Inspektionsmaschine für Behälter.....	22
Abbildung 10: Reinigungsmaschine .....	23
Abbildung 11: Füllmaschine .....	24
Abbildung 12: Etikettiermaschine .....	25
Abbildung 13: Gebindetransport.....	27
Abbildung 14: Behältertransport .....	28
Abbildung 15: Zwangsverkoppelung zwei Aggregate.....	31
Abbildung 16: Pufferstrecke in einer Abfüllanlage .....	32
Abbildung 17: Berg'sche Kurve [Pete-93] .....	33
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Pufferwirkung [Prob-82] .....	35
Abbildung 19: Pufferdiagramm für Euro-Flaschen und Schanierbandketten .....	37
Abbildung 20: Regelung der Leistung in Abhängigkeit des Füllstands .....	38
Abbildung 21: Die Zweipunktregelung.....	40
Abbildung 22: Reduzierung der Bandgeschwindigkeit .....	41
Abbildung 23: Die Dosierregelung.....	42
Abbildung 24: Regelung des Gebindetransports (Normalzustand).....	43
Abbildung 25: Schematische Darstellung einer Mehrweg-Abfüllanlage .....	44

Abbildung 26: Zusammenhang zwischen dem Behälter- und dem Gebindetransport	46
Abbildung 27: Gliederung eines Gesamtsystems .....	53
Abbildung 28: Struktur des Gesamtmodell .....	54
Abbildung 29: System „Abfüllanlage“ .....	55
Abbildung 30: Produkt- und Behälterablauf .....	56
Abbildung 31: Spezifikationsdaten für die Elemente Prozess und Puffer .....	62
Abbildung 32: Spezifikationsdaten für den Baustein „Aggregat“ .....	63
Abbildung 33: Untergliederung der Aggregate im Gesamtsystem .....	64
Abbildung 34: Eine Abbildungsmöglichkeit einer Transportstrecke .....	66
Abbildung 35: Struktur und Spezifikationsdaten für den Transport .....	67
Abbildung 36: Hierarchiestruktur des Transportsystems .....	68
Abbildung 37: Abbildung der Regelung vor und nach dem Aggregat .....	69
Abbildung 38: Hierarchische Struktur des gesamten Systems .....	71
Abbildung 39: Verwendung der Sammelbehälter zur Abbildung von einsträngigen Transporteure .....	73
Abbildung 40: Abbildung eines einsträngigen Transporteurs .....	74
Abbildung 41: Durchlaufdiagramm bei unterschiedlichen Sammelbehältern .....	76
Abbildung 42: Durchsatzberechnung mit unterschiedlichen Sammelbehältern .....	77
Abbildung 43: Beide Funktionen eines Massentransporteurs .....	80
Abbildung 44: Zeitlicher Ablauf eines Objektes auf einem Transporteur .....	81
Abbildung 45: Die Bausteinbibliothek mit den vier Grundbausteine .....	87
Abbildung 46: Parametrierungsfenster eines Aggregates .....	87
Abbildung 47: Parametrierungsfenster für den Puffer und den Prozess .....	88
Abbildung 48: Erweiterte Bausteinbibliothek für die Grundbausteine .....	90
Abbildung 49: Parametrierungsfenster des Bereichs „Auspacker“ .....	91
Abbildung 50: Ein Transportsystem und sein Parametrierungsfenster .....	92
Abbildung 51: Das Transportelement und sein Parametrierungsfenster .....	93

Abbildung 52: Der externe Puffer und seine Parametrierungsfenster .....	95
Abbildung 53: Der Materialverwalter.....	99
Abbildung 54: Das Definieren von Prozessfähigkeiten und Prozessoperationen ....	100
Abbildung 55: das Definieren des Arbeitsplans .....	101
Abbildung 56: Ausschnitt einer symbolisch aufgebauten Anlage .....	102
Abbildung 57: Der Experiment-Assistent.....	105
Abbildung 58: Hierarchie-Ansicht und Symbol-Ansicht eines Modells.....	107
Abbildung 59: Animation eines Puffers und eines Transportsystems.....	107
Abbildung 60: Der Statistik-Assistent mit einer Auswahl an Darstellungsformen ....	109
Abbildung 61: Kreisdiagramm und Tabelle der charakteristische Werte .....	111
Abbildung 62: Diagramm des mittleren Durchsatzes.....	112
Abbildung 63: Durchlaufdiagramm eines Transportsystems .....	113
Abbildung 64: Histodiagramm eines Puffer .....	114

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: [DIN 8782 Seite 3] .....	13
Tabelle 2: [DIN 8782 Seite 3] .....	14
Tabelle 3: Berechnung der Pufferzeit und -kapazität [Pete-93] .....	36
Tabelle 4: Klassifizierung der Aggregate .....	58
Tabelle 5: Abbildung der Aggregate .....	60
Tabelle 6: Auswahl an statistischen Darstellungen .....	110

# 1 Einleitung

## 1.1 Wissenschaftliche Problemstellung

Die Investitionen im Bereich der Abfüllanlagen der Getränkeindustrie haben eine erhebliche Bedeutung für die Kostensituation der Betriebe. So machen beispielsweise bei Brauereien je nach Betriebsgröße und Umfang der Anlagenausrüstung die Investitionen im Flaschenkeller etwa 20 % der Gesamtinvestition aus. Liegt allerdings die Nutzungsdauer der Anlagen in anderen Bereichen bei bis zu dreißig Jahren, so sind in der Abfülltechnik zehn bis fünfzehn Jahre üblich.

Weiterhin wird von solchen Anlagen ein hoher Wirkungsgrad sowie eine große Zuverlässigkeit erwartet. Diese beiden Merkmale werden durch die wachsende Produktvielfalt in Bezug auf Getränke, Flaschen- und Gebindeformen beeinflusst. So ist es heute zutage nicht mehr üblich, Abfüllanlagen nur zum Abfüllen eines einzigen Produkts in einer einzigen Behälterart einzusetzen. Diese Anforderung an eine ausreichende Produktvielfalt und Zuverlässigkeit wird dann durch einen Automatisierungsgrad erfüllt.

Die Planung von Abfüllanlagen muss sorgfältig durchgeführt und auf die jeweiligen Rahmenbedingungen abgestimmt werden. Gestützt auf die persönliche Erfahrung der Planer wird die Gesamtanlage, ohne ein real existierendes Gegenstück zu haben, geplant und aufgebaut. Dabei spielen Rahmenbedingungen wie Kosten, Termintreue, Zuverlässigkeit, Lärmbelastung und Flexibilität für schwankende Auftragslagen eine entscheidende Rolle.

Die Auslegung der Anlage erfolgt durch Erfahrungswerte aus der Vergangenheit, die vor allem auf Angaben ähnlicher, real existierender Systeme, basieren. Die Einmaligkeit neuer Anlagen erfordert jedoch die Anpassung der Annahmen an den konkreten Einsatzfall. Meistens werden pauschale Sicherheitszuschläge angesetzt, um die Forderungen zu erfüllen. Die Anlagenteile werden somit überdimensioniert, um Mindestleistungen der Gesamtanlage zu gewährleisten. Dabei wird in Kauf genommen, dass Ressourcen aufgebaut werden, die nur bei Spitzenleistungen zum Einsatz kommen können und dadurch höhere Kosten entstehen.

## 1.2 Konventionelle Auslegungsverfahren

Die konventionelle Berechnungsverfahren basieren auf Erfahrungswerten, die die in den 60er Jahren von Prof. Berg (TU München, Weihenstephan) entwickelte Auslegungsmethode nutzen. Da eine Abfüllanlage als ein verkettetes Materialflusssystem gilt, wird eine Maschine, in diesem Fall der Füller, als zentrales Element der Anlage bzw. als Führungsmaschine ausgelegt. (siehe z.B. [Knei-96]). Vor- und nachgelagerte Anlagenteile nehmen in ihrer Leistung V-förmig vom Füller ausgehend zu. Dadurch soll gewährleistet werden, dass der Füller stetig mit Flaschen versorgt wird. Aufgrund der Verkettung des Materialflusses entspricht die Nennleistung der Führungsmaschine der der Gesamtanlage. Die Abstufung der Nennleistung der vor- und nachgeschalteten Maschinen bewirkt, dass die Führungsmaschine die taktgebende Anlage im Gesamtsystem wird.

Die erforderliche Überkapazität der Aggregate vor und nach dem Füller hängt allerdings in erheblichen Maße von der technischen Beschaffenheit und Speicherkapazität der Transportstrecken und Puffer ab. Diese sind vom Gebäude und den Layout-Möglichkeiten abhängig und können deswegen nur schwer verallgemeinert betrachtet werden. Darüber hinaus führen unterschiedliche Störcharakteristika der Aggregate gerade bei der Nutzung unterschiedlicher Hersteller zu schwer abschätzbaren Einflüssen. Die Güte der Auslegung der Anlage ist dadurch letztendlich stark von der Erfahrung des projektierenden Mitarbeiters abhängig.

Für die Steuerung der Abfüllanlagen werden in den vergangenen Jahren zunehmend elektronische Steuerungen und geregelte Antriebe verwendet. Durch die gezielte Regelung der Transporteure und Aggregate soll ein gleichmäßiger Fluss in der Anlage aufrechterhalten werden [Capi-94]. Zielsetzung dieser Systeme ist es, bei gegebener Anlagenstruktur den Fluss der Gebinde und Flaschen zu optimieren. Sie berücksichtigen hingegen nicht die Problemstellung der optimalen Einsteuerung der Chargen.

Gerade bei einem wachsenden Produktmix und den damit zusammenhängenden vermehrten Rüstvorgängen sinkt die Aussagekraft der konventionellen Berechnungsmethoden. Dieser Unsicherheit wird durch Überdimensionierung begegnet. In der Praxis weisen Abfüllanlagen insbesondere bei kleinen und mittleren

Brauereien deswegen oft ungenügende Auslastungen auf. Erfahrungswerte zeigen, dass je nach Produktmix und Schichtmodell maximal 65 bis 80 Prozent der nominalen Anlagenleistung produktiv genutzt werden [Unte-98].

Auch wenn Nutzungsgrade über 85 Prozent wegen Rüst- und Wartungsarbeiten nur schwerlich zu erreichen sind, liegen in der mangelnden Auslastung erhebliche Optimierungspotentiale. So könnte die Planung optimiert werden, aber auch Entscheidungen über Produktwechsel in den Linien werden oft ohne ausreichende Berücksichtigung der Einflüsse auf den Betrieb getroffen.

Die Neuplanung und Umgestaltung komplexer Systeme ist mit Risiken behaftet. Bei Nichterfüllen der Planungsvorgaben entsteht ein erheblicher Anpassungsaufwand während der Inbetriebnahme. Zur Vermeidung langer Anlaufzeiten während der Realisierungsphase neigt der Planer deswegen dazu, insgesamt die Anlage so großzügig wie nur möglich auszulegen. Grenzen sind ihm dabei durch die bei der Überdimensionierung entstehenden Kosten gesetzt.

### **1.3 Simulationstechnik**

Die dynamische Materialflusssimulation hat sich in den vergangenen Jahren zu einem anerkannten Werkzeug der Planungsunterstützung entwickelt (siehe z.B. [Kuhn-96]). Dies war durch eine Weiterentwicklung der Software-Werkzeuge, insbesondere aber auch durch die Leistungssprünge der Rechnertechnik möglich. Insgesamt zeigt sich ein breitgefächertes Angebot an Software-Werkzeugen, die unterschiedliche Schwerpunkte und Möglichkeiten aufweisen. Bei der Auswahl eines Simulationsprogramms ist deswegen vor allem auf den Verwendungszweck zu achten (siehe [Günth-97]).

Eingesetzt wird die Simulationstechnik zur Überprüfung des dynamischen Verhaltens vorhandener oder nicht existierender Systeme. Bei komplexen dynamischen Zusammenhängen ist die Simulation meist das einzige Verfahren, mit dem das System noch durchleuchtet werden kann. Durch die komplexen Wirkzusammenhänge in der Getränkeindustrie ist die Simulationstechnik ein

geeignetes Hilfsmittel bei der Auslegung von neuen und bei der Nutzung von bereits vorhandenen Abfüllanlagen.

Für die Getränkeindustrie ist die Anwendung diskreter ereignisorientierter Simulationsberechnungen sehr gut geeignet. Die Ereignisse, die in diskreter zeitlicher Abfolge auftreten und sich gegenseitig beeinflussen, werden nach den Regeln, die im Simulationsmodell hinterlegt sind, abgearbeitet. Somit können auch Prozesse, deren Charakteristik vom Zeitpunkt ihres Auftretens abhängig ist und die sich gegenseitig beeinflussen, untersucht werden. Das Verhalten einer Abfüllanlage ist abhängig von den sich zeitlich verändernden Störgrößen einzelner Bearbeitungsmaschinen und deren gegenseitiger Beeinflussung. Die Simulationstechnik ist somit ein effektives Hilfsmittel zur Analyse der von stochastischen Einflüssen geprägten, komplexen Abfüllanlagen in der Getränkeindustrie. Die Simulation bietet dem Planer eine einfache Möglichkeit, unterschiedliche Konzepte miteinander zu vergleichen und auszuwerten. Zum kritischen Punkt bei der Simulation einer Abfüllanlage kann die hohe Anzahl an Fördergütern werden, die gleichzeitig im Modell vorhanden sind. Denn jedes Fördergut auf den Förderstrecken bewirkt im Simulationslauf Ereignisse, die berechnet werden müssen. Bei der hohen Anzahl von Berechnungen entsteht, trotz der heute zur Verfügung stehenden leistungsstarken Rechner, eine lange Simulationsdauer. Deswegen ist die Art der Modellbildung in Hinblick auf die Erzielung kurzer Rechenzeiten abzustimmen.

Nur vereinzelt wird Simulationstechnik zur Unterstützung der Fertigungssteuerung eingesetzt. Hier ist auch zu unterscheiden zwischen Programmsystemen, die tatsächlich einen ereignisorientierten Algorithmus unter Einbeziehung stochastischer Einflüsse nutzen, und analytischen Berechnungsansätzen, die letztendlich nur für eingeschwungene, mittlere Zustände Aussagen erlauben. Für Fragen der Auslegung und der Steuerung sind aber gerade auch Spitzenlasten und Übergangssituationen von Bedeutung.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass Simulationstechnik zumeist projektbezogen eingesetzt wird, innerhalb des Projekts aber auch nicht durchgängig, sondern punktuell im Planungsablauf. Dies ist vor allem durch den hohen Aufwand für die Systemanalyse, den Modellaufbau und die Experimentdurchführung zu erklären.

Hingegen ist der zeitliche Aufwand für die Ergebnisinterpretation relativ gering (siehe z.B. [Hard-95]).

Gerade in kleinen und mittleren Unternehmen ist ein regelmäßiger Einsatz der Simulationstechnik nur selten zu verzeichnen. Wird dieses Werkzeug genutzt, so zumeist zeitlich begrenzt und durch externe Dienstleister. Gerade aber ein durchgängiger Einsatz der Simulation relativiert den Zeitaufwand für Informationssammlung und Modellaufbau (siehe auch [Günth-98]). Denn entsteht das Modell projektbegleitend, spiegelt es den aktuellen Planungsstand stets wider und kann in voller Detaillierung auch den Betrieb unterstützen (siehe [Knep-96]).

Obwohl Simulationswerkzeuge seit etwa zehn Jahren im industriellen Einsatz sind, werden von den Benutzern noch erhebliche Defizite festgestellt ([Rein-97]). Schwerpunkte liegen bei der allgemeinen Bedienbarkeit, dem Aufwand für die Modellierung und der Unterstützung bei der Experimentdurchführung und der Auswertung. Aus den Wünschen der Anwender spricht letztendlich die Forderung nach einer deutlichen Reduzierung des Zeitaufwandes und des Bedarfs an Spezialkenntnissen. Die Simulation sollte standardisiert und vereinfacht werden. Denn auf diese Weise wäre es möglich, dass Simulationswerkzeuge nicht nur durch Simulationsexperten, sondern praxisnah durch den interessierten Nutzer verwendet werden könnten.

Die am Markt verfügbaren Simulatoren belassen es zumeist dabei, umfangreiche Möglichkeiten der Modellierung und Auswertung anzubieten. Es wird dem Anwender überlassen, die Möglichkeiten der Software durch Programmierung an seine Problemstellung anzupassen. Demzufolge wird der Anwender auch nicht direkt bei seinen planerischen Aufgaben unterstützt. Die eigentliche Simulationsdurchführung und -auswertung ist allein von seinem Fachwissen abhängig.

Für ein praxisorientiertes Werkzeug ist es erforderlich, den Anwender aktiv zu unterstützen. Dies bedeutet, einen schnellen Modellaufbau zu ermöglichen und vordefinierte Simulationsexperimente anzubieten, die auf typische Zielsetzungen der Simulationsanwendung abgestimmt sind. Allerdings wird das Anwendungsfeld des Simulators damit eingegrenzt, denn eine Standardisierung des Modellaufbaus und der Experimentdurchführung kann nicht vollkommen allgemein, sondern muss branchenspezifisch durchgeführt werden.

Für einen effizienten Einsatz der Simulationstechnik in kleinen und mittleren Unternehmen wäre es erforderlich, den Modellaufbau zu standardisieren, so dass der Anwender ohne Programmierkenntnisse die Anlage flexibel aufbauen und detaillieren kann. Zudem müsste die Durchführung von Experimenten mit Erfahrungswissen hinterlegt und weitgehend automatisiert werden, damit sich der Zeitaufwand im wesentlichen auf die Interpretation der Ergebnisauswertungen konzentrieren kann. Modell-, Ergebnis- und Dokumentationsdaten müssten systematisch verwaltet werden, damit der Rückgriff auf vergangene Simulationsexperimente einfach erfolgen kann.

## **2 Forschungsziel**

### **2.1 Ziel der Forschungsarbeiten**

Im Rahmen dieses Projekts soll ein Assistenzsystem entwickelt werden, das mittels der zeitdiskreten Simulation eine detaillierte Analyse von Abfüllanlagen ermöglicht. Durch eine einfache Anwendung, abgesicherte Simulationsergebnisse und aussagekräftige Bewertungsmethoden sollen die Aufgaben der Planung und des Betriebs effizient unterstützt werden. Dabei sind Simulationszeiten sicherzustellen, die der Anwendung gerecht werden. Insbesondere für die technischen Systeme im Nassbereich sind deswegen geeignete Modellierungsmethoden erforderlich.

### **2.2 Ausgangssituation**

Am Lehrstuhl fml der TU München wird seit mehreren Jahren erfolgreich die Entwicklung von simulationsgestützten Assistenzsystemen für die Planung betrieben. Die am Lehrstuhl bestehende Entwicklungsumgebung wurde im Rahmen früherer Forschungsprojekte entwickelt (siehe hierzu [Günth-98] und [Ha-97]). Sie basiert auf der objektorientierten Simulationssprache ModSim der Firma CACI und ermöglicht neben der Realisierung von Simulationsmodellen auch die Verwaltung von Daten und die Gestaltung von Oberflächen.

Die Entwicklungsumgebung stellt somit ideale Voraussetzungen zur Verfügung und dient als wichtige Grundlage der Forschungsarbeit. Das im Rahmen dieses Projekts zu entwickelnde Assistenzsystem für die Getränkeindustrie kann auf eine bestehende breite Infrastruktur aufbauen. Dadurch umfasst der Aufwand im wesentlichen die anwendungsorientierte Analyse der unterschiedlichen Problemstellungen und die Untersuchung von Abbildungsmethoden für die unterschiedlichsten Komponenten einer Abfüllanlage. Die erforderlichen Implementierungsarbeiten können auf eine tragfähige Lösung aufsetzen und sich auf den branchenspezifischen Anteil beschränken.

## **2.3 Vorgehensweise**

Die Vorgehensweise sieht vier Arbeitspakete vor. Dabei wird in einem ersten Schritt eine Systemanalyse durchgeführt, auf deren Basis die Anforderungen an einem Simulationswerkzeug für die Getränke-Abfüllanlagen festgestellt werden kann. In einem zweiten Abschnitt wird auf der Basis der Systemanalyse die Abfüllanlage und ihre Komponenten abgebildet. Unterstützend wird dabei eine laufzeitoptimierte Bibliothek an Modellelementen der Anlagenteile erstellt. Weiterhin soll die Anwendung dieser Bibliothek bei dem Aufbau einer Abfüllanlage beschrieben werden. Eine weitere Phase soll dazu dienen, die Vorgehensweise beim Experimentieren und beim Auswerten der Simulationsergebnisse zu beschreiben.

### **2.3.1 Systemanalyse**

Für die Erstellung der Geräte-Bibliothek sind die Komponenten typischer Abfüllanlagen in ihrem Zusammenwirken zu analysieren. Zielsetzung der Systemanalyse ist das Herausarbeiten der Einflüsse und Charakteristika, die sich auf den Materialfluss in der Anlage und dessen Steuerung im Betrieb auswirken. Hierzu gehören Fehlerszenarien, die Produktabhängigkeit des Durchsatzverhaltens, der Rüstaufwand, sowie Regelschleifen und Steuerstrecken der Anlagensteuerung.

Wesentliche Anlagenteile stellen für die Analyse die unterschiedlichen materialflusstechnischen Systeme wie Förderbänder, Pufferstrecken und Handhabungsautomaten dar, auch in ihrer Abhängigkeit von unterschiedlichen Betriebsszenarien und Behältertypen. Darüber hinaus sind aber vor allem auch die kostenintensiven Aggregate des Nassbereichs wie Füller, Flaschenreinigungsmaschine, Etikettierer und Pasteur in ihrer Durchsatzabhängigkeit und ihrem Störverhalten zu betrachten.

### **2.3.2 Anforderungsprofil**

Der erste Schritt zur Verwendung der Simulationstechnik ist basierend auf einer ausführlichen Systemanalyse die Erstellung eines Anforderungsprofils und die Festlegung der Systemgrenze. Grundlegend hierfür sind Möglichkeiten und Grenzen der Softwareunterstützung aufzuzeigen. Es sind aber auch die Problemfelder der Praxis zu erkennen.

Bestandteile des Anforderungsprofil sind:

- Die Zielsetzung des Assistenzsystems in Bezug auf die Anwendungsfelder.
- Abgrenzung der Zielgruppe der Anwendung in Bezug auf Qualifikation, verfolgter Zielsetzung und Häufigkeit der Anwendung.

### **2.3.3 Erstellung der Geräte-Bibliothek**

Auf der Basis der Systemanalyse wird in einem nächsten Schritt eine Bibliothek der Anlagenteile erstellt. Hierbei kann auf Objekte der Entwicklungsumgebung zurückgegriffen werden, die allerdings entsprechend den Spezifikationen der Anlagenkomponenten kombiniert und angepasst werden müssen. Um die erforderliche Abbildungsgüte sicherzustellen, sind die einzelnen Gerätetypen mit dem Betriebsverhalten realer Systeme zu vergleichen.

Nach dieser grundlegenden Erstellung der Bibliothek stehen dem Anwender vorparametrierte Modellelemente zur Verfügung, die einen hohen Wiedererkennungsggrad ermöglichen und durch rein grafisch-interaktive Parametrierung an die spezielle Anlage angepasst werden können. Wesentlich für die Konzeption der Geräte-Bibliothek ist, dass die Modellelemente herstellerunabhängig sind. Dadurch wird gewährleistet, dass die Betreiber, die zumeist unterschiedliche Anlagen im Betrieb haben, das Assistenzsystem ohne umfangreichen Adaptionaufwand für alle Systeme einsetzen können.

### **2.3.4 Das simulationsgestützte Assistenzsystem**

Auf der Basis des Anforderungsprofils des Assistenzsystems, der ausgeführten Systemanalyse, den systematischen Vorgehensweisen und den Erfahrungen der experimentellen Planungsarbeiten kann das eigentliche Assistenzsystem konzipiert werden. Es soll den Anwender bei seinen Aufgaben unterstützen und ihm angepasste Hilfsmittel zur Verfügung stellen. Als wesentliche Kennzeichen des Assistenzsystems zeichnen sich aus heutiger Sicht ab:

- Durchgängige Unterstützung des Anwenders bei der systematischen Vorgehensweise durch hinterlegtes Erfahrungswissen und Hinweise zu den Arbeitsschritten.
- Anwenderfreundliche Oberfläche, die einen guten Wiedererkennungsgrad und eine intuitive, grafisch-interaktive Parametrierung ermöglicht.
- Integration der konventionellen Berechnungsmethoden bei der Modellerstellung und Ergebniserzeugung
- Einfache Handhabung der Simulation durch das Bereitstellen anwendungsgerechter Experimente und auf den Anwendungsfall abgestimmte statistische Auswertungen.
- Gemeinsame Verwaltung der Daten zu Anforderungen, Berechnungen, Experimenten, Auswertungen und Dokumentationen.

Das Konzept zum Assistenzsystem wird auf der Basis der bestehenden lehrstuhleigenen Entwicklungsumgebung implementiert. Zur Gestaltung der anwendungsgerechten Oberfläche kann auf die bestehende Infrastruktur zurückgegriffen werden.

Bei den konventionellen und simulationsgestützten Berechnungsmethoden wird auf die modellinhärente Datenhaltung zurückgegriffen, so dass die Verwendung der gleichen Datenbasis sichergestellt ist. Die programminternen Spezifikationen der Berechnung und Simulation werden durch die Oberfläche gekapselt. Dadurch erhält der Anwender eine ihm vertraute technische Sicht der Anlage. Die Durchführung der Experimente und die Aufbereitung der Statistikdaten erfolgt automatisch, so dass sich der Anwender auf die Analyse der Ergebnisse konzentrieren kann.

## 3 Stand der Technik der Getränke-Abfüllanlagen

Obwohl die Abfüllanlagen in der Getränkeindustrie als sehr komplexe und aufwändige Anlagen gelten, ist ihre Aufstellung und Zusammensetzung sowie der interne Materialfluss sehr übersichtlich und klar definiert. Um diese Eigenschaften zu verdeutlichen und die Merkmale solcher Anlagen hervorzuheben, ist es erforderlich, sowohl den Prozessablauf zu analysieren, als auch den physischen Aufbau zu erläutern. Hierzu ergeben sich speziell folgende Themen:

- Begriffsdefinition einer Abfüllanlage
- Allgemeine Beschreibung einer Abfüllanlage
- Aufbau einer Abfüllanlage
- Beschreibung der Komponenten einer Abfüllanlage

### 3.1 Begriffsdefinition einer Abfüllanlage

An erster Stelle werden einige Begriffe vorgestellt, die in diesem Bericht verwendet werden und in der Getränkeindustriebranche üblich sind. Weiterhin werden wichtige Kenngrößen einzelner Aggregate bzw. eine Abfüllanlage erläutert.

Laut der Deutschen Norm [DIN 8782] lässt sich eine Abfüllanlage für die Getränkeindustrie folgendermaßen definieren:

- eine Gesamtheit der im Verbund zusammenwirkenden, einzelnen Aggregate zum Abfüllen von Getränken, einschließlich der vor- und nachgeschalteten Maschinen und Geräte – in der Regel von der Eingabe des gepackten und gegebenenfalls palettierten Leergutes bis zur Abgabe des gepackten und gegebenenfalls palettierten Vollgutes.

Weiterhin sind in der Norm [DIN 8782] die in einer solchen Anlagen beweglichen Güter in mehreren Gruppen unterteilt wurde.

- Diese Norm verwendet den Begriff „Getränkebehältnis“ als das für der Aufnahme von Getränke bestimmte Behälter, der durch Material, Verschlussart, Volumen, Form, Maße und Toleranzen oder nach Zeichnung gekennzeichnet ist, z.B. Flaschen oder Dosen.
- Unter „Packmittel“ soll im Sinne dieser Norm ein Aufnahmehilfsmittel für Getränke oder Getränkebehältnisse, z.B. Flaschen, Kästen oder Paletten, zu verstehen sein.
- Außerdem werden die „Sammelpackungen als die Zusammenfassung von Einzelpackungen oder –packmittel, z.B. Kästen oder Schachteln, mit gefüllten oder leeren Flaschen sowie beladenen Paletten bezeichnet.

In diesem Bericht wurden die Vielfalt an Behälter und ihre Erläuterungen folgender Maßen abgekürzt und zusammengefasst:

- **Behälter** entsprechen der Beschreibung des Begriffs „Getränkebehältnis“ der DIN-Norm.
- **Gebinde** bezeichnen diejenigen Packhilfsmittel, in denen die Behälter aufgenommen werden.
- **Paletten** stellen wiederum die Ladehilfsmittel für die Gebinde dar.

Weiterhin beschreibt die DIN 8782 die in der Getränkeindustrie gängigen Kenngrößen für Aggregate und für Gesamtanlagen, die nicht nur das dynamische Verhalten festlegen, sondern in der Abnahmephase wichtig sind.

Tabelle 1: [DIN 8782 Seite 3]

Kenngrößen einzelner Aggregate der Abfüllanlage		
Benennung	Formelzeichen	Definition
Nennausbringung	$Q_{nE}$	<p>Ausbringung je Zeiteinheit, für die das Aggregat berechnet und ausgelegt wurde. Sie ist je nach Art des Aggregates abhängig von Getränkebehältnis, Packmittel, Ausstattung und Getränkesorte. Daraus resultiert, dass eine Maschine verschiedene Nennausbringung besitzen kann.</p> $Q_{nE} = \frac{\text{Stückzahl}}{\text{Zeiteinheit}}$ <p style="text-align: right;">z.B. Flaschen/h, Paletten/Tag</p>
Einstellausbringung	$Q_{estE}$	<p>Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine. Sie gibt die theoretische Ausbringung je Zeiteinheit wieder, die bei eingestellter Arbeitsgeschwindigkeit, ungestörten Lauf und voller Beaufschlagung erreichbar ist. Die maximale Einstellausbringung der Maschine muss mindestens gleich ihrer Nennausbringung sein.</p> $Q_{estE} = \frac{\text{Stückzahl je Umdrehung oder Takt}}{\text{Sekunde je Umdrehung oder Takt}} \cdot \frac{\text{Sekunde}}{\text{Zeiteinheit}}$
Effektivausbringung	$Q_{effE}$	<p>Stückzahl, die während der allgemeinen Laufzeit im Durchschnitt je Zeiteinheit von dem Aggregat in einwandfreiem Zustand ausgebracht wurde. Die allgemeine Laufzeit ist die Summe aus störungsfreie Arbeitszeiträume und der maschinenbedingten Störzeiten.</p> $Q_{effE} = \frac{\text{Stückzahl}}{\text{Allgemeine Laufzeit des Aggregates}}$
Wirkungsgrad	$\eta_E$	<p>Verhältnis von Effektivausbringung zur Einstellausbringung. Die Differenz (1- <math>\eta_E</math>) gibt den Ausbringungsverlust gegenüber der Einstellausbringung. Dieser Wert ist gleich dem Anteil der Eigenstörzeiten (maschinenbedingte Störzeit) an der allgemeinen Laufzeit des Aggregates.</p> $\eta_E = \frac{\text{Effektivausbringung}}{\text{Einstellausbringung}} = \frac{Q_{effE}}{Q_{estE}}$

Tabelle 2: [DIN 8782 Seite 3]

Kenngrößen der Abfüllanlage		
Benennung	Formelzeichen	Definition
Nennausbringung	$Q_{n A}$	<p>Sie wird für eine Getränkesorte und ein Getränkebehältnis nach Art, Größe, Verschluss und Ausstattung je Zeiteinheit angegeben. Daraus folgt, dass eine Abfüllanlage verschiedene Nennausbringung besitzen kann.</p> <p>Die Nennausbringung der Abfüllanlage stimmt mit der Nennausbringung der in der Abfüllanlage arbeitenden Füllmaschine(n) überein. Voraussetzung hierzu ist, dass alle anderen Aggregate zumindest die gleiche Nennausbringung besitzen wie die Füllmaschine(n) bei den jeweiligen Getränkebehältnissen und Getränken. Ist dies nicht der Fall, kann die Nennausbringung auf das Aggregat mit der niedrigsten Nennausbringung bezogen werden.</p>
Effektivausbringung	$Q_{eff A}$	Stückzahl, die während der allgemeinen Laufzeit der Abfüllanlage im Durchschnitt je Zeiteinheit ausgebracht werden. Die Zeitnahme und Stückzahlermittlung erfolgt, solange das letzte und das erste Aggregat voll beschickt sind.
Durchschnittsausbringung	$Q_{m A}$	Stückzahl, die während der Arbeitszeit der Abfüllanlage im Durchschnitt je Zeiteinheit ausgebracht wird.
Wirkungsgrad	$\eta_A$	<p>Verhältnis der Effektivausbringung der Abfüllanlage zur Einstellausbringung der Füllmaschine(n). Er zeigt, in welchen Umfang Störungen der einzelnen Aggregate die Ausbringung der Füllmaschine(n) und damit die Abfüllanlage beeinflussen. Der Wirkungsgrad der Abfüllanlage ist somit ein Maß für die Störanfälligkeit der einzelnen Aggregate in Verbindung mit der Auslegung aller Anlageteile.</p> $\eta_A = \frac{\text{Effektivausbringung der Anlage}}{\text{Einstellausbringung der Füllmaschine}} = \frac{Q_{eff A}}{Q_{est \text{ Füllmaschine}}}$

## 3.2 Allgemeine Beschreibung einer Abfüllanlage

### 3.2.1 Übersicht

So vielfältig Getränke und ihre Verpackung sind und so verschieden die Kundenwünsche sein können, so wenig unterscheiden sich Abfüllanlagen vom Prinzip her [Foit-00]. Sie setzen sich aus einer Vielzahl miteinander verketteter Komponenten zusammen, die bei den meisten Anlagen vorhanden sind. Aus Sicht des physischen Materialflusses können die Komponenten in zwei übergeordneten Klassen unterteilt werden: die Aggregate und die Förderstrecken.

Die Aggregate oder Maschinen stellen im Vergleich zur den Fertigungseinrichtung eines Produktionsbereichs die Bearbeitungsmaschinen dar. Sie verändern die physischen Eigenschaften des eingegangenen Gutes. Zum Beispiel werden die leeren Flaschen im Füller befüllt oder die verschmutzten Flaschen in der Reinigungsmaschine gereinigt.

Die Förderstrecken einer Abfüllanlagen übernehmen die Aufgabe des Förderns und Transportierens sowie des Puffern und Regeln.

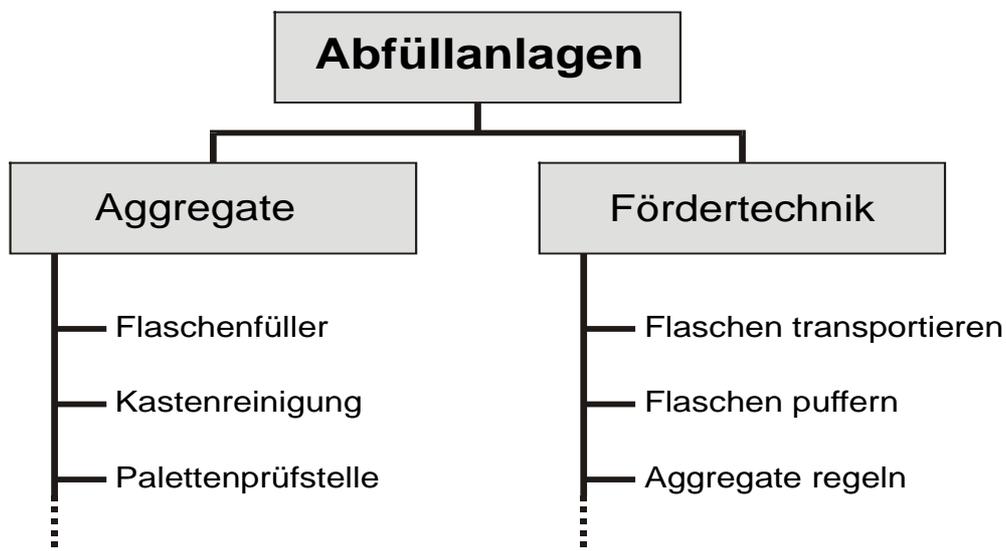
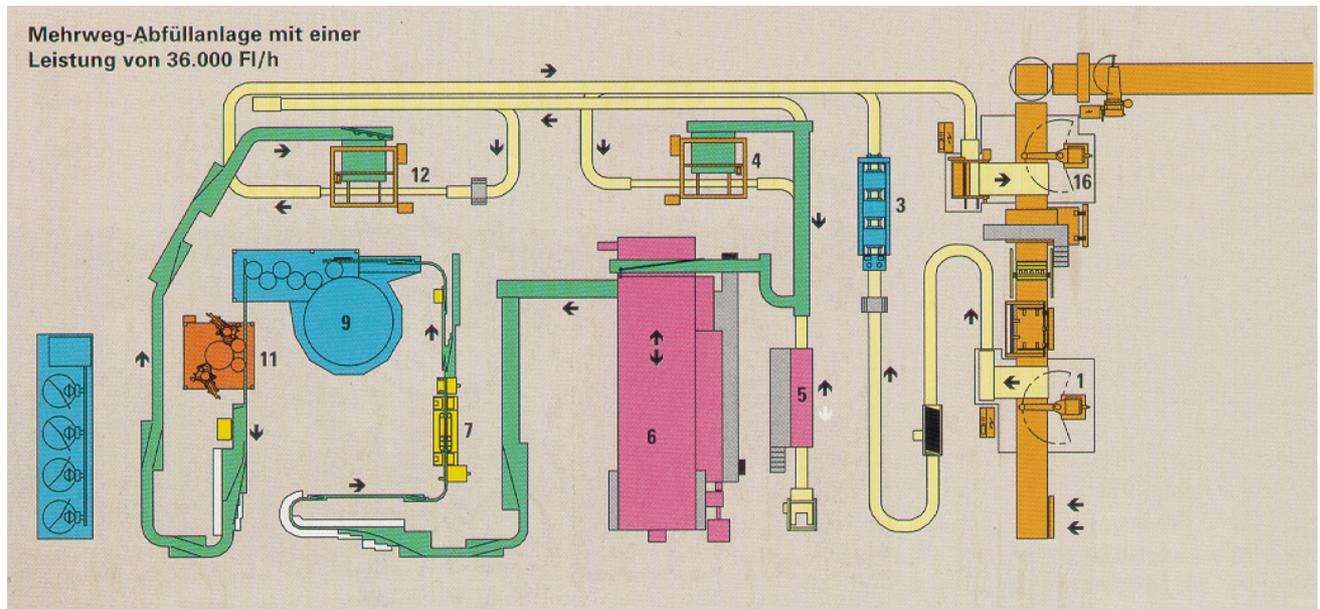


Abbildung 1: Bestandteile einer Abfüllanlage

### 3.2.2 Beispiel einer Abfüllanlage

Eine beispielhafte Anlage zum Abfüllen von Mehrwegflaschen wird in der nachfolgenden Abbildung gezeigt [Krones].



- |                              |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| (1) Entpalettierer           | (7) Leerflaschen-Inspektionsmaschine |
| (3) Entschrauber / Entkorker | (9) Füller                           |
| (4) Auspacker                | (11) Etikettiermaschine              |
| (5) Kastenwascher            | (12) Einpacker                       |
| (6) Reinigungsmaschine       | (16) Bepalettierer                   |

Abbildung 2: Darstellung einer repräsentativen Abfüllanlage [Krones]

Mit Hilfe eines Gabelstaplers wird die Anlage im *Eingangsbereich* (Abb.2 unten rechts) mit Paletten beliefert. Der Entpalettierer (1) entnimmt Ihren Inhalt, in diesem Fall Kasten befüllt mit leeren schmutzigen Flaschen. Die leeren Paletten werden nun kontrolliert und für den späteren Gebrauch gelagert. Nach einer erfolgreichen Erkennung und Kontrolle werden die Verschlüsse aus den Flaschen im Entschrauber (3) entfernt. Diese werden dann zum Auspacker (4) transportiert, in dem die einzelnen Flaschen entnommen werden. Die leeren Kasten werden dann gereinigt und auf Stauförderern gelagert. Die Flaschen gelangen dann in die Reinigungsmaschine (6). Bevor die Flaschen mit Flüssigkeit in der Füllmaschine (9) befüllt werden, muss überprüft werden, ob der Reinigungsprozess erfolgreich war. Die befüllten Flaschen werden nachfolgend etikettiert (11). Im Anschluss an die

Etikettierung erfolgt die Kontrolle der richtigen Füllhöhe und der Etikettierung. Die befüllten Flaschen werden dann im Einpacker (12) wieder in den bereits wartenden Kasten zugefügt. Die vollen Kästen werden dann nachmals kontrolliert und im Bepalettierer (16) auf die bereitgestellten Paletten eingepackt.

Der hier beschriebene Anlagenaufbau, insbesondere die Reihenfolge der Aggregate, ist in nahezu allen Getränkeabfüllanlagen gleich. Sie unterscheiden sich jedoch in der räumlichen Anordnung und den fördertechnischen Komponenten, die die Aggregate miteinander verbinden.

### 3.2.3 Unterscheidung zwischen Ein- und Mehrweg-Abfüllanlagen

Weiterhin können Abfüllanlagen nach Einweg- und Mehrwegbehälter unterschieden werden.

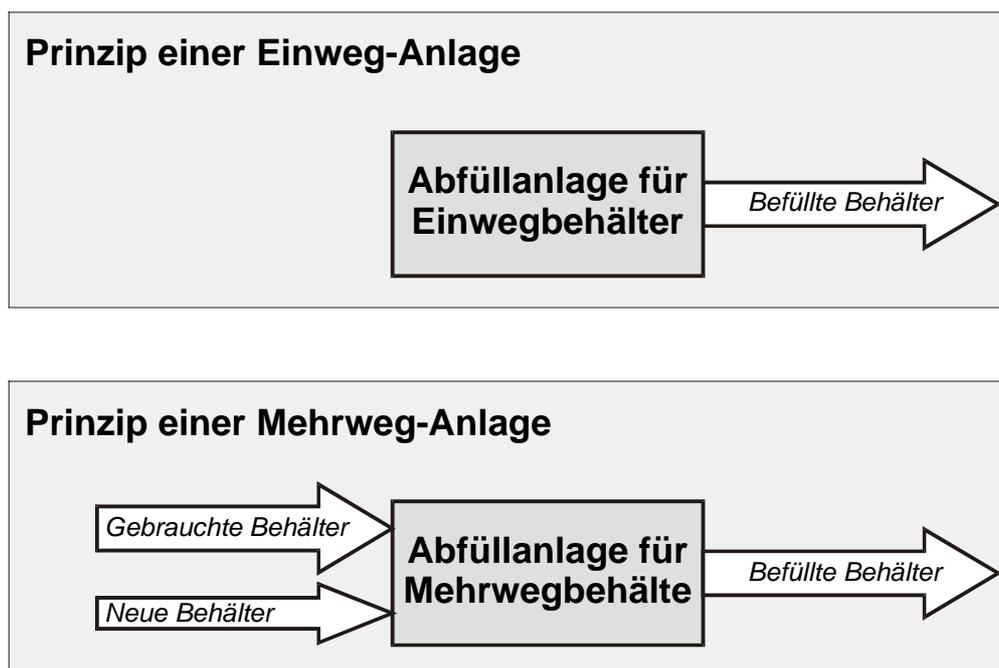


Abbildung 3: Abfüllanlagen als geschlossene Einheit

Bei Einweg-Anlagen werden die Flaschen oder Dosen in der sogenannten Streckblasmaschine hergestellt. Danach laufen sie über den Rinser, in dem die Behälter gereinigt werden, zum Füller. Die befüllten Flaschen werden dann in Kasten, Gebinde oder Trays gepackt, die wiederum palettiert werden. Wird diese Anlage als eine gesamte Einheit, d.h. als Blackbox, betrachtet, verfügt sie hinsichtlich

dem Transport der kleinsten Einheiten, d.h. Flaschen, nur über eine Hauptabführung. Die Zuführung entfällt hier, da die Flaschen oder Dosen vor Ort hergestellt werden. Eine Abfüllanlage für Mehrwegbehälter hat dagegen einen Abführstrecke und eine Zuführstrecke. Außerdem kann eine zusätzliche Zuführung vorgesehen werden, um neue Behälter in die Anlage einzuschleusen.

Anhand der folgenden Materialflussdiagramme einer Mehrweg-Abfüllanlage sowie einer Einweg-Abfüllanlage wird deutlich, wie einfach und übersichtlich die Arbeitsfolgen einer Abfüllanlage sind. Alle Bestandteile einer Abfüllanlage sind an eine feste Arbeitsreihenfolge gebunden. Kein Arbeitsschritt kann übersprungen und später nachgeholt werden [Rädl-00].

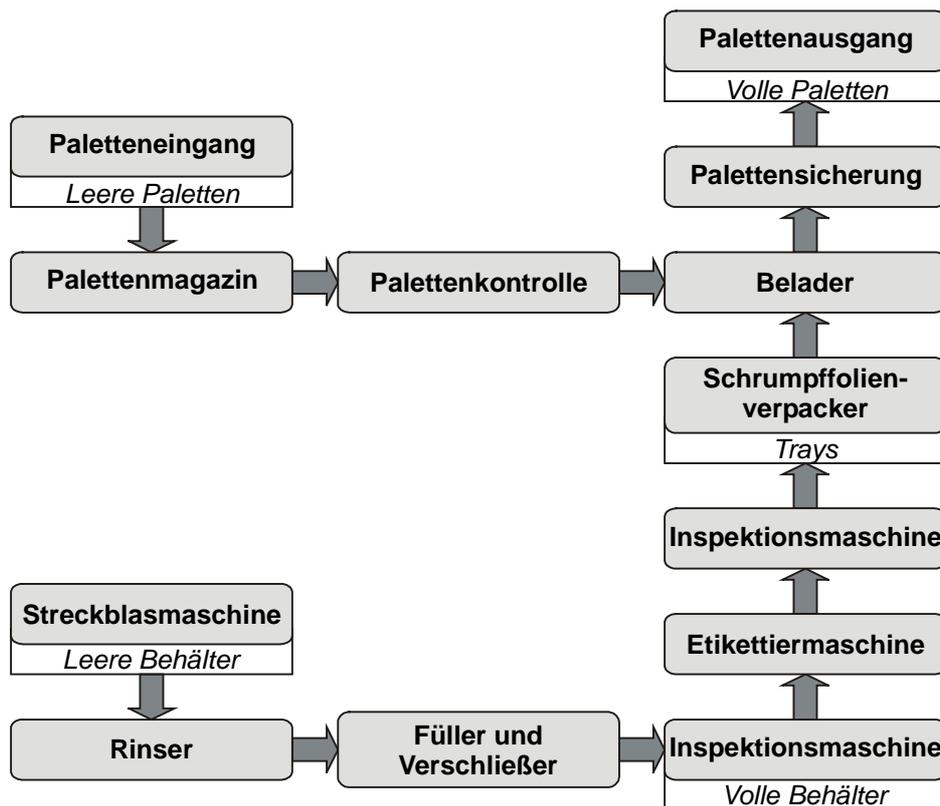


Abbildung 4: Materialflussdiagramm einer Einweg-Abfüllanlage

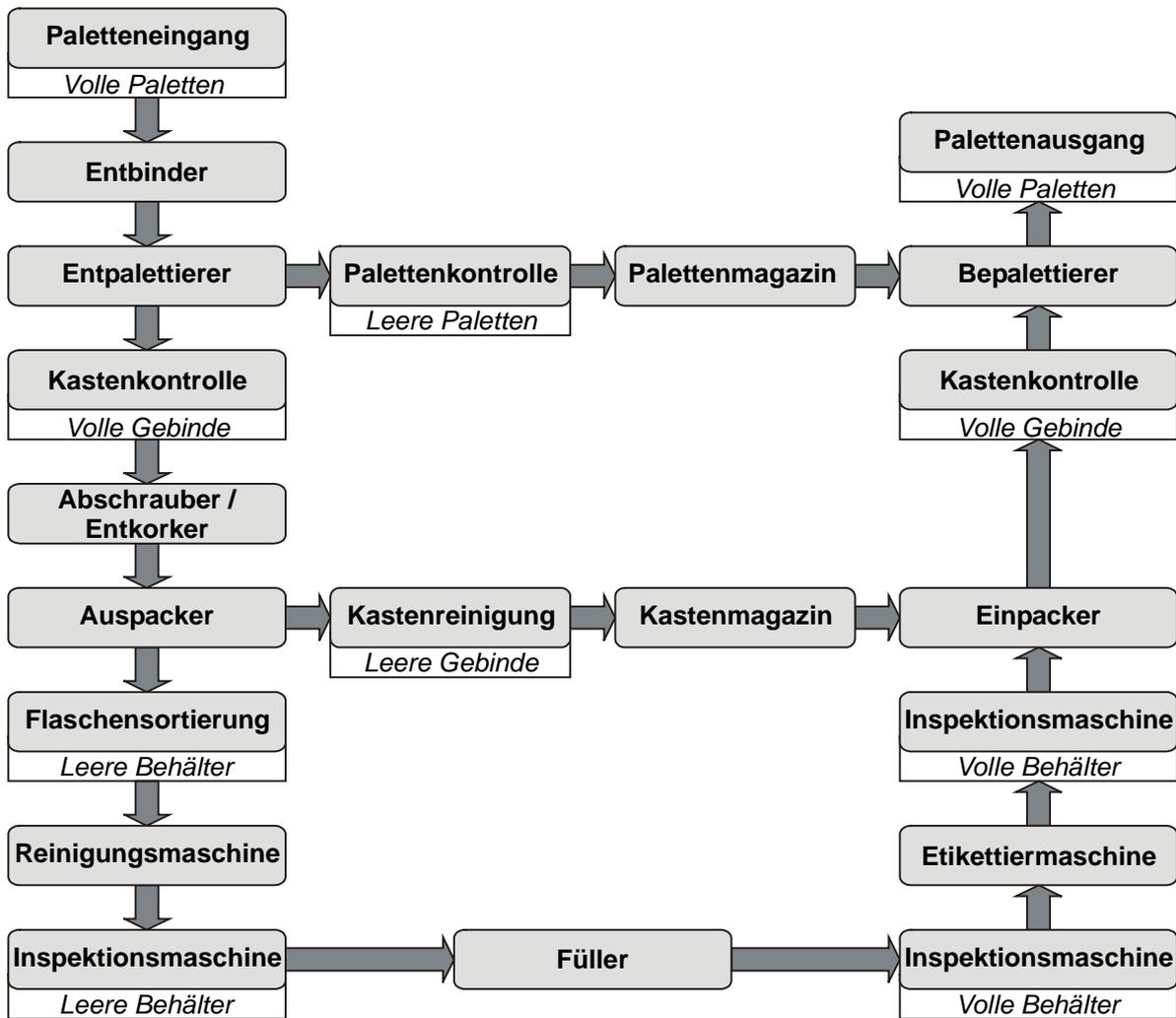


Abbildung 5: Materialflussdiagramm eine Mehrweg-Abfüllanlage

### 3.3 Aggregate einer Abfüllanlage

Aufgrund der hohen hygienischen Anforderungen in der Getränkeindustrie werden die Anlagen in zwei Bereiche unterteilt: in den Trocken- und den Nassbereich.

Der Trockenbereich beinhaltet Komponenten, die keinen direkten Kontakt mit dem abzufüllendem Produkt und mit den Behältern, in die abgefüllt wird, haben, wie z.B. Ent- und Bepalettierer, Aus- und Einpacker. Der Nassbereich besteht z.B. aus Füller, Etikettierer, Reinigungsmaschinen und Inspektionsmaschinen.

### 3.3.1 Ent- und Bepalettierer

Die Palette wird über Rollenbahnen oder Kettenförderer transportiert und gelangt zum Entpalettierer. Dort werden die einzelnen Gebinde von der Palette entnommen und einzeln weitertransportiert. Zum Bepalettieren werden die Gebinde vor der Maschine entweder mehrstück- oder lagenweise gesammelt und dann auf der bereits gestellten Paletten aufgetragen.

Das Ent- und Bepalettieren wird u.a. von einer modular aufgebauten Robotergeneration unterstützt, die bei engen Räumlichkeiten die notwendige Flexibilität bietet [Gold-99]. Außer der Robotertechnik gibt es zahlreiche weitere Maschinentypen:

- Be- und Entlademaschinen für Mehrweggebinde (Kunststoffkästen)
- Belademaschinen mit Schiebelech für Kartonage oder Trays
- Abschieber und Abheber zur Neuglaszuspeisung bei Einweg- und Dosenanlagen

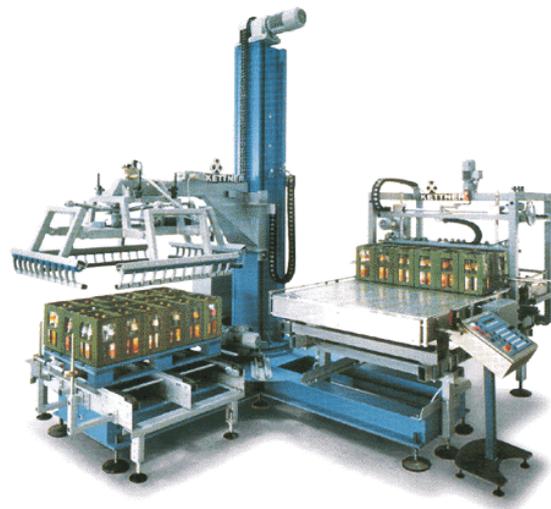


Abbildung 6: Be- und Entpalettierer [Krones]

### 3.3.2 Kastenerkennung

Um Störungen in der Anlage zu vermeiden, müssen die Gebinde mit dem Leergut vor dem Auspacken sowie die Gebinde mit dem befüllten Behälter nach dem Einpacken überprüft werden. Kontrolliert wird nach Flaschengröße, Flaschenfarbe, Fremdkörpern und Stülpflaschen.

Fremdf Flaschen müssen bereits im Gebinde erkannt und aus der Anlage entnommen werden. Mit diesem System kommen nur einwandfreie Gebinde zum Auspacker, die keine Störungen verursachen können und mit den richtigen Flaschen bestückt sind.

Das gleiche Prinzip gilt auch für die Gebinde vor dem Bepalettieren. Unerwünschte Gebinde werden zur Sortierung ausgeschleust. Dafür bietet sich die Möglichkeit der Aussortierung über Pusher oder über eine Tragpalettenverteilung. Der Pusher schleust einzelne Gebinde über einen pneumatisch gesteuerten Ausstoßbügel aus.

### 3.3.3 Aus- und Einpacker

Prinzipiell wird zwischen kontinuierlich laufenden und getakteten Maschinen zum Ein- und Auspacken der Flaschen aus den Gebinden unterschieden. Bei den kontinuierlich laufenden Maschinen kommen die einzelnen Gebinde nicht zum Stillstand. Der taktweise laufende Ein- oder Auspacker wird mit einer bestimmten Anzahl an Kisten oder Kartons bestückt, die während des Aus- oder Einpackvorgangs angehalten werden müssen.

Weiterhin werden aufgrund des anhaltenden Trends hin zu Einwegverpackungen in der Getränkeindustrie zunehmend Einwegverpackungsmaschinen wie Multipacker, Traypacker mit Schrumpffolie oder Wrap-around-Maschinen eingesetzt.

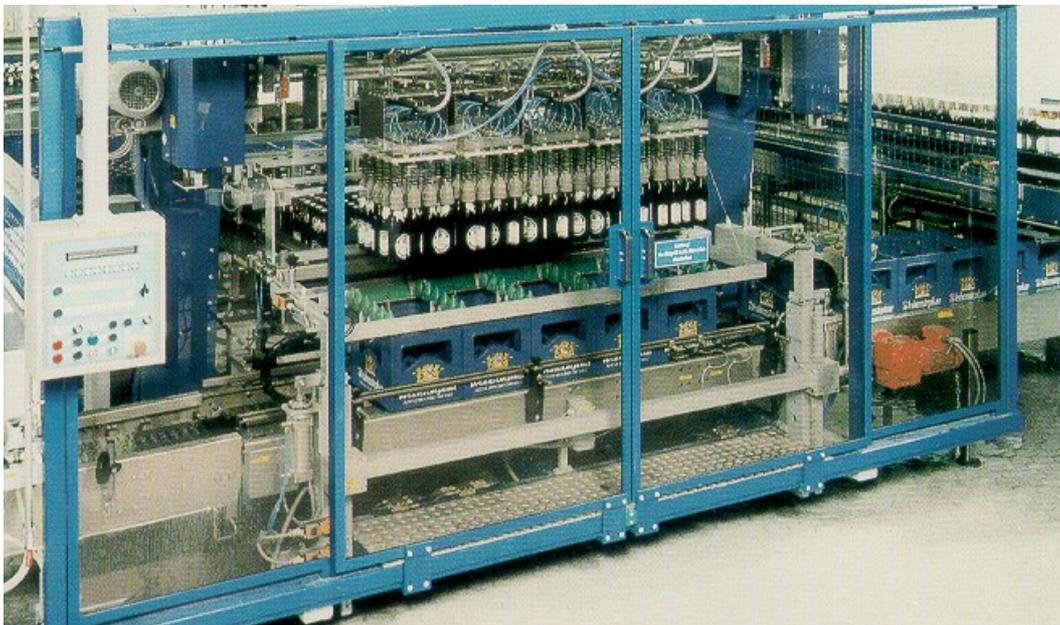


Abbildung 7: Aus- und Einpacker [Krones]

### 3.3.4 Abschrauber

Der Abschrauber entfernt Verschlüsse vom eingehenden Leergut. Dabei ist eine zuverlässige, geräuscharme, störungs- und beschädigungsfreie Verrichtung des Abschraubers von besonderer Bedeutung. Auch schief sitzende, locker aufgeschraubte oder festsitzende Verschlüsse müssen gewindeschonend entfernt werden. Bei Flaschen ohne Verschluss muss die Vermeidung jeglicher Beschädigung gewährleistet werden. Der Auswurf der abgeschraubten Verschlüsse sollte nach definierten Sortierungsvorgaben erfolgen.



*Abbildung 8: Abschrauber  
[Krones]*

### 3.3.5 Inspektionsmaschinen

In einer Abfüllanlage sind verschiedenen Inspektionsaggregate notwendig, um die Anforderungen an eine hohe Produktqualität zu erfüllen und somit eine Unterbrechung des Abfüllprozesses zu vermeiden. Sie befinden sich entweder vor oder nach dem Füller.

Ähnlich der Gebindeprüfung erfolgt vor dem Reinigen der Behälter eine Inspektion hinsichtlich ihrer Verschmutzung und evtl. vorliegenden Fremdkörpern. Auffällige Behälter mit Verschmutzungen oder größeren Fremdkörpern werden ausgestoßen. Die verbleibenden Behälter werden zur Reinigung weiterbefördert. Danach werden die gereinigten Behälter mit Hilfe von Kameras hinsichtlich des Reinigungszustandes und möglichen Beschädigungen überprüft. Behälter, die bei dieser Inspektion auffällig sind, werden aussortiert.



*Abbildung 9: Inspektionsmaschine  
für Behälter [Krones]*

Die Messbrücke zur Füllhöhen- und Etikettenkontrolle wird im Anschluss an die Etikettiermaschine aufgebaut. Zur Prüfung der Füllhöhe von transparenten Behältern aus Glas oder Kunststoff können unterschiedliche Systeme eingesetzt werden: radiometrische Gammasysteme, Infrarotsysteme, Röntgensysteme oder Kontrolle mit Kamera. Bei nicht transparenten Behältern wie Dosen oder Flaschen, bei denen die Füllhöhe durch das Etikett oder Stanniol verdeckt ist, kommt das Gamma- oder Röntgensystem zum Einsatz. Die Etiketten können entweder mit Hilfe von Sensoren auf ihr Vorhandensein erfolgen oder anhand von Kameras auf den exakten Positionierung überprüft werden.

### 3.3.6 Flaschenreinigungsmaschine

Die Reinigungsmaschine hat die Aufgabe, für die nachfolgende Füllmaschine einwandfrei sterile Behälter zur Verfügung zu stellen. Sie wird meistens modular aufgebaut, um individuellen Kundenwünschen nachzukommen.

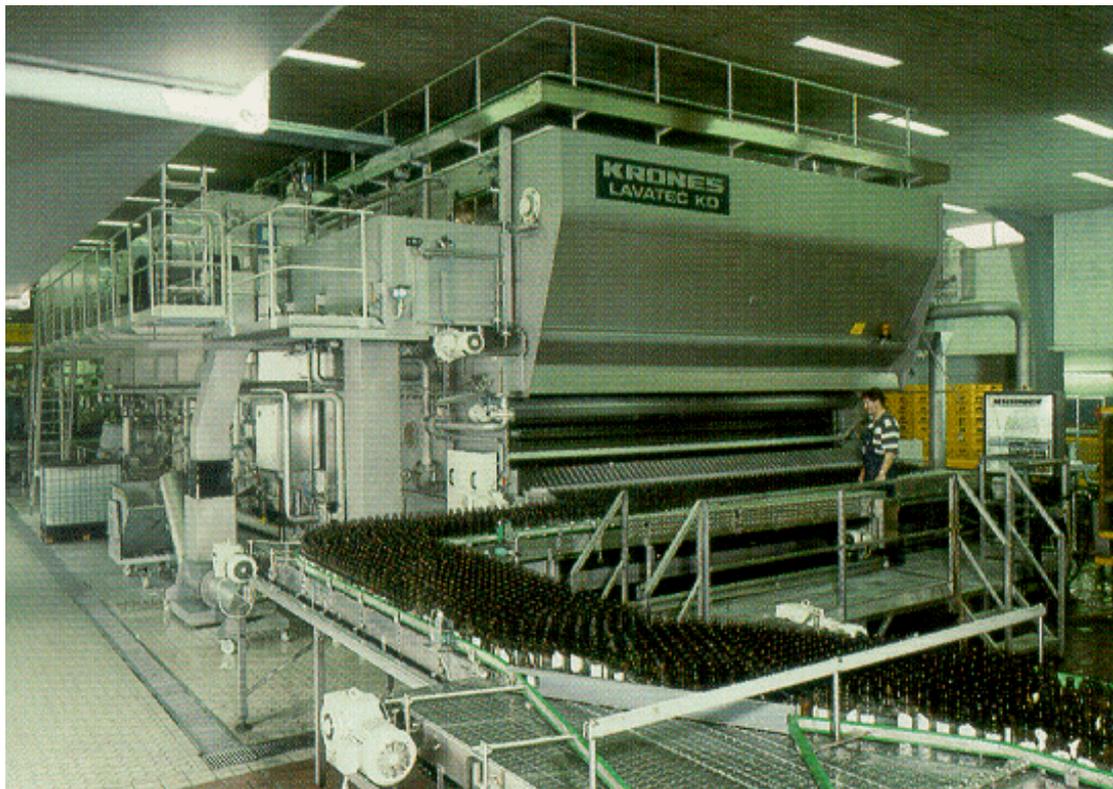


Abbildung 10: Reinigungsmaschine [Krones]

Eine Flaschenreinigungsmaschine beinhaltet die mechanischen Komponenten: Einschub, Spritzungen und Ausschub.

- Die Flaschen werden über den Einschub in die Reinigungsmaschine eingeführt. Ein Drängeltisch bringt die Behälter drucklos aus den angeschlossenen Förderstrecken zum Aufgabentisch und werden in der Regel in reihenweise angeordnete Körben, sogenannten Flaschenzellen, aufgenommen und durch die Anlage transportiert werden.
- Die Spritzung bewirkt die eigentliche Reinigung der Flasche.
- Beim Flaschenausschub werden die Flaschen aus den Vorrichtungen der Flaschenreinigungsmaschine entnommen und über Gleitbahnen auf das Abgabetransportband geschoben.

### 3.3.7 Füller

Die Befüllung der Flaschen ist der Kernprozess des gesamten Abfüllprozesses. Hier sind nicht nur die mechanischen Aspekte in Betracht zu ziehen, sondern auch die biologischen und hygienischen Kriterien zu erfüllen. Die vor dem Aggregat hintereinander angesammelten Behälter werden in einem Rundlauf abgefüllt. Beim Füllen der Flaschen laufen je nach Abfüllmedium verschiedene Prozesse. Es wird zwischen zwei Methoden unterschieden: Vakuumfüllsysteme und volumetrische Füllsysteme.



Abbildung 11: Füllmaschine [Krones]

### 3.3.8 Etikettierung

Neben dem Befüllen der Flaschen ist die Etikettierung ein wesentlicher Bestandteil der Abfüllanlage. Abhängig vom Kundenauftrag sind verschiedene Vorgänge zu unterscheiden:

- Rundumetikettierung speziell zur Verarbeitung von Dosen
- Rollenetikettierung für lange Laufzeiten
- Selbstklebeetikettierung zur Vereinfachung des Klebprozesses
- Etikettierung aus Magazinen
- Sleeve-Etikettierung

Bei der Etikettierung laufen die Flaschen einzeln zumeist im Rundlauf durch die Etikettiermaschine und werden mit den vorgesehenen Etiketten ausgestattet. Neben Brust- und Halsetiketten werden auch Verschlussicherungen aufgetragen.



Abbildung 12: Etikettiermaschine [Krones]

### 3.3.9 Kastenreinigungsmaschine

Auch die Gebinde werden in der Abfüllanlage einer Reinigung unterzogen. Üblich sind eine Kastenbodendusche und eine Kastenüberrieselung. Diese Aggregate sind direkt an Förderbändern eingebaut, so dass die Gebinde während des Reinigungsprozess diese Maschinen durchlaufen. Die Kästen werden bei der Kastenbodendusche mittels Sprühdüsen unten abgespritzt, um z.B.

Bandschmiermittel vor dem Palettieren abzuwaschen. Eine feine Besprühung erfolgt durch die Kastenüberrieselung, um hartnäckigen Schmutz oder Etiketten zu entfernen.

### 3.3.10 Zusammenfassung

Die allgemeine Beschreibung einer Getränkeabfüllanlage und deren Aggregate soll dazu dienen, einen ersten Überblick über den Aufbau und die Funktionalität solcher Anlagen zu ermitteln. Es soll helfen die Komplexität sowie die Merkmale und die Unterschiede ihrer Zusammensetzung zu erfassen. Exemplarisch wurden einige Aggregate ausführlich beschrieben, die in der Regel in aller Abfüllanlagen vorhanden sind. Diese Erläuterung zeigt ihre anspruchsvolle Prozessfähigkeiten. Aber obwohl die Aggregate untereinander verschiedene Aufgaben und Kenngrößen besitzen, ist nach dieser kurzen Beschreibung deutlich zu erkennen, dass es eine große Ähnlichkeit in der Arbeitsweise der Aggregate gibt. Beispielsweise unterscheiden sich der Auspacker und der Entpalettierer an erster Stelle nur in der Art der zu bearbeitenden Behälter.

## 3.4 Transporttechnik

Ein wirklich optimaler Ausstoß kann nur dann verwirklicht werden, wenn die Fördertechnik vor, in und nach der Abfüllanlage die Produktmenge reibungslos transportiert [Foit-00]. Daher ist die richtige Auswahl und Dimensionierung der Transporttechniken zum Erreichen der notwendigen Verfügbarkeit und eines hohen Wirkungsgrads von großer Bedeutung.

Darüberhinaus sind noch weitere betriebliche Gegebenheiten und Bedürfnisse zu berücksichtigen sind wie z.B. [Pete-93]:

- Übersichtliche räumliche Anordnung der Aggregate
- Schnelle Erreichbarkeit aller Aggregate und Transportmittel durch das Bedienungspersonal bei Störungen
- Platzsparende Anordnung der Aggregate

- Raum für Reparatur- und Wartungsaufgaben
- Beachten von Gesundheitsschutzregeln, wie z. B. Lärmschutz

In einer Abfüllanlage werden im Regelfall drei Transporteinheiten mit verschiedenen Eigenschaften und Abmessungen befördert:

- Flaschen
- Kästen
- Paletten.

Die Fördereinheiten sind in der Getränkeindustrie vielfältig und werden in der Regel aus Baugruppen bzw. Baukästen zusammengestellt. Sie verfügen über Sensoren und regelbare Antriebe, die so einen optimalen Transport gewährleisten.

### 3.4.1 Paletten- und Gebindetransport

Für den Palettentransport kommen die gängigen Standardtechniken zum Einsatz, wie z.B. Rollenbahnen, Kettenförderer, Verteilwagen und Drehtische. Die Rollenbahnen dienen nicht nur zum Befördern der Güter, sondern können auch als Pufferstrecke verwendet werden. Der modulare Aufbau sowie die bereits standardisierten Komponenten und Steuerungen solcher Fördersysteme vereinfachen die Planung und Realisierung dieser Anlagenbereiche.

Die Wahl der Transporteinrichtungen der Gebinde ist abhängig von den Eigenschaften der Fördergüter. Drei verschiedenen Transportausführungen stehen zur Verfügung [Krones]:

- Scharnierbandkette für Kästen
- Kunststoff-Mattenketten
- Rollen für Kästen, Kartons oder Trays

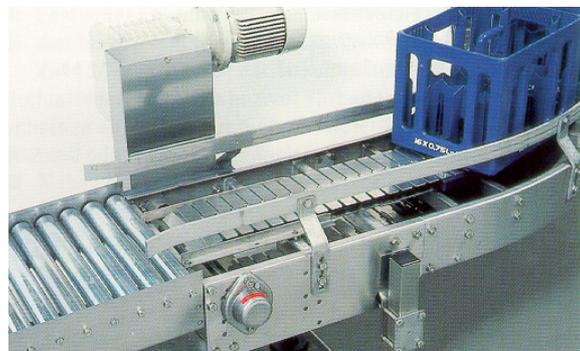
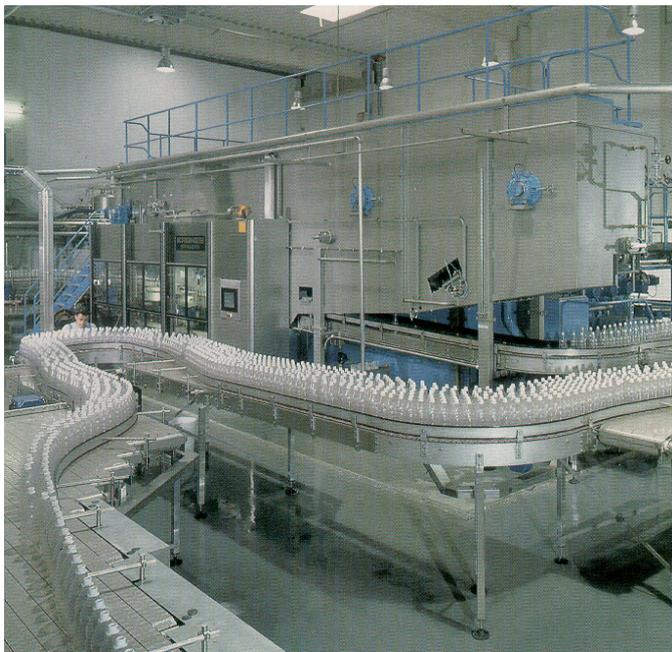


Abbildung 13: Gebindetransport [Krones]

Die Ausrichtung der Gebinde, die für eine genaue Beförderungen erforderlich ist, wird z.T. über Führungsschienen ermöglicht. Schrägrollenförderer geben Gebinde rechts- oder linksbündig weiter und können eine Drehung von 90° bewirken. Außerdem werden Transporteure von Gebinden je nach Anwendungsgebiet mit Drehstationen, Kastenwendern, Zusammenführungen, Verteilungen, Ausstoßvorrichtungen und Stoppnern kombiniert. Bei größeren Anlagenleistungen und ungenügenden Transportkapazitäten können zwei oder mehrere Bahnen nebeneinander aufgebaut werden. Weiterhin können sie dem Bedarf entsprechend, staufähig sein, um eine Puffermöglichkeit vor und nach den Aggregaten zu ermöglichen.

### 3.4.2 Behältertransport

Das größte Transportproblem in Abfüllanlagen bildet der Transport der Behälter, d.h. der zu befüllenden Einheiten bzw. der Flaschen. Neben dem notwendigen hohen



Durchsatz bedeuten die Bruchempfindlichkeit der Glasflaschen und die Verformungsempfindlichkeit der PET-Flaschen erhebliche Erschwernisse. Außerdem ergeben sich durch das Aufeinanderstoßen der Flaschen beim Transport hohe Lärmemissionen. [Pete-93].

All diese Merkmale müssen bei der Planung der Transportstrecken berücksichtigt werden.

*Abbildung 14: Behältertransport [Krones]*

Für den Transport werden in der Regel Kettentransportbänder aus verschiedensten Materialien verwendet. Für leere PET-Flaschen gibt es aufgrund ihres Gewichts eine besondere Form der Transporteinrichtung: den Luftförderer.

Beim Behältertransport wird zwischen ein- und mehrsträngigen Transportstrecken unterschieden. Aufgrund des hohen Durchsatzes der Anlagen und der Forderung nach Platzersparnis muss eine hohe Anzahl an Behältern auf kurzen Strecken transportiert werden. Hier werden dann mehrere Kettenförderer nebeneinander aufgebaut, genannt mehrsträngige Transporteure oder Massentransporteure. Aufgrund ihrer Breite können dann die Behälter in Reihen nebeneinander transportiert werden. Diese Lösung ermöglicht außerdem das Zusammenfassen zweier Funktionen, das Fördern und das Puffern.

Da in den meisten Aggregaten die Behälter seriell bearbeitet werden, müssen sie nacheinander und gerichtet zugeführt werden. Daher werden sie nach diesen Massentransporteuren auf einsträngigen Transporteure vereinzelt. Aufbauend auf diesem Prinzip müssen dann die Behälter nach dem Verlassen des Aggregats wieder von einem einsträngigen Transporteur auf einen mehrsträngigen Transporteur umgelagert werden.

### **3.5 Anlagenauslegung und -steuerung**

Eine Besonderheit der Abfüllanlage besteht in der Auslegung und Dimensionierung der verschiedenen Aggregate und Transportstrecken. Die an eine Abfüllanlage gestellten Anforderungen stellen verschiedene Problemfelder bei der Planung und Realisierung, insbesondere für die Aggregate und die Transporttechnik im Nassbereich sowie deren Verknüpfungen.

Daher wird in diesem folgenden Abschnitt eine ausführliche Beschreibung und Analyse der Anlagenauslegung und Aggregatregelung in der Strecke vom Auspacker über den Füller bis hin zum Einpacker vorgestellt.

Im Hinblick auf der Aufgabenstellung des Forschungsprojekts interessieren vor allem die Leistungsauslegungen der Aggregate sowie das Dimensionieren der Transportstrecken insbesondere im Nassbereich.

### 3.5.1 Anlagenauslegung

Aus wirtschaftlichen Gründen wird angestrebt, die Arbeitsabläufe einer Abfüllanlage als einen kontinuierlichen Prozess zu gestalten. Damit kann eine hohe Produktivität erreicht und die Konkurrenzfähigkeit des Betreibers gesichert werden, ohne dass die Wartungs- und Instandhaltungskosten solcher hoch mechanisierten Anlagen beeinträchtigt werden, die durch Verschleiß beim häufigen An- und Abfahren der Aggregate entstehen können. Aus lebensmitteltechnologischen Gründen soll das Abfüllen der Behälter störungsfrei und ohne lange Unterbrechungen stattfinden. Standzeiten des Füllers können sich negativ auf die Produktqualität ausüben:

- Bereits abgefüllte Flaschen kommen vor dem Verschließen in Kontakt mit der Außenluft
- Gereinigte Flaschen vor dem Füller können rekontaminieren

Da die Anzahl der vom Füller ordnungsgemäß ausgebrachten Behälter die Wirtschaftlichkeit der Anlage bestimmt, ist ihre Nennausbringung auf die Füllmaschine bezogen [Pete-93]. Aus diesem Grund wird der Füller als das Kernstück oder Leitmaschine der Anlage bezeichnet. Somit entspricht die Nennausbringung des Füllers der der Anlage, die vom Kunden gefordert wird.

Unter dem Gesichtspunkt eines hohen anlagentechnischen Wirkungsgrades gilt es die Leistungen der anderen Aggregate und Transporteure zu bestimmen und sie aufeinander abzustimmen. Dazu stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Die Zwangsverkopplung zweier Aggregate
- Das Vorsehen einer Puffermöglichkeit zwischen den beiden Aggregaten

#### 3.5.1.1 Zwangsverkopplung der Aggregate

Bei der Lärminderung am Transportsystem von Abfüllanlagen stellt sich die Frage, ob auf die aufwändigen und offensichtlich schalltechnische Probleme schaffenden Transportstrecken nicht völlig verzichtet werden kann, wenn die Behälter zwischen den Aggregaten zwangsgeführt werden, z.B. durch mit Gummibacken bestückte Klemmförderer [Prob-82].

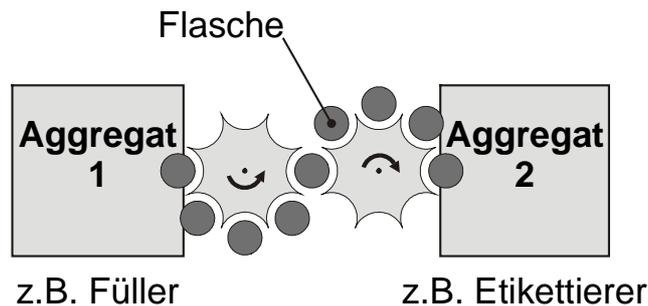


Abbildung 15: Zwangsverkopplung zwei Aggregate

Hier müssen die beiden Aggregate mit dem gleichen Maschinendurchsatz, auch Maschinenleistung genannt, betrieben werden. Aufgrund des zwischen den beiden Aggregate fehlenden Puffers wirkt sich jede Art von Störung eines Aggregates sofort auf das andere aus und beeinträchtigt somit den gesamten Wirkungsgrad dieser Anordnung negativ, da sich der Gesamtwirkungsgrad aus dem Produkt aller Einzelwirkungsgrad der Aggregate berechnen lässt:

$$Q_{eff\ 1} = Q_{eff\ 2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot Q_{est\ 1,2}$$

Die beiden Effektivausbringungen der zwangsgekoppelten Aggregate sind gleich und entsprechen dem Produkt aus der niedrigsten Leistung und dem Anteil der Eigenstörungen. Besteht z.B. eine Abfülllinie aus 6 Einzelaggregaten, die miteinander verkettet sind und beträgt die Eigenstörung 5%, so würde die Gesamtstördauer dieser Aggregateanordnung 30% der Produktionsdauer betragen. Durch das Übertragen der Störung von einem Aggregat zum anderen ist die angestrebte Kontinuität des Prozessablaufs nicht erreicht.

Trotzdem kann eine solche Verblockung bei einigen Aggregaten zu Vorteilen führen. So ist z.B. eine Verblockung des Füllers mit dem Verschließer aus hygienischen Gründen sehr sinnvoll. Während Flaschen oder Dosen auf Massentransportern relativ ungeordnet laufen, müssen sie beim Einlauf in die Maschine definiert geordnet werden [Foit-00]. Daher ist es sinnvoll, die Anordnung der Behälter für die nachkommenden Prozessschritte beizubehalten. So wurden der Füller, der Verschließer und die Etikettiermaschine mechanisch miteinander verkettet. Diese sogenannte Verblockung der Aggregate führt nicht nur zu einer Vereinfachung des Transports, sondern auch zu einer Platzersparnis. Mit einer Blockanlage kann eine Reduzierung der notwendigen Fläche von 40% erzielt werden. Aufgrund der

Verbesserung der Automatisierungsmöglichkeit wurde außerdem der Wirkungsgrad eines solchen Maschinenblocks gegenüber einer konventionellen Anlagenaufstellung verbessert.

### 3.5.1.2 Das Vorsehen einer Puffermöglichkeit zwischen den Aggregaten

Wie oben erwähnt, bedeutet eine Verblockung aller Aggregate nicht immer eine Verbesserung des Wirkungsgrads. Daher ist in den meisten Fällen das Integrieren von Pufferstrecken unumgänglich.



Abbildung 16: Pufferstrecke in einer Abfüllanlage [Krones]

Offen bleibt aber, mit welchen Leistungen die beiden miteinander verketteten Aggregaten eingestellt werden sollen:

- Haben hier die beiden Aggregate den gleichen Maschinendurchsatz, d.h. die gleiche Effektivausbringung,
- und hat die Pufferstrecke eine ausreichende Kapazität, um die Störung der benachbarten Maschine auszugleichen
- und wird der Gesamtwirkungsgrad auf einem der beiden Aggregaten bezogen,

so sind die Einstelleistungen der Aggregate sowie der Gesamtwirkungsgrad der Anordnung höher als bei einer Verblockung der Aggregate. In diesem Fall muss die

Auslegung der Pufferstrecke nicht nur die Eigenstörung des Aggregats, sondern auch die Störung des vorliegenden Aggregates berücksichtigen. Dies ist in der Praxis wichtig, da beispielsweise der Abfüllprozess aufgrund der technologischen Anforderungen kontinuierlich sein muss und deswegen nicht von Fremdstörungen beeinflusst werden darf.

Basierend auf die angestrebte Kontinuität der Abfüllung wird der Gesamtwirkungsgrad einer Abfüllanlage auf die Effektivleistung des Füllers ausgelegt. Um diese Eigenschaften der Abfüllanlage zu realisieren, müssen jederzeit genügend Flaschen oder Behälter am Maschinenanlauf vorhanden sein, bis die Fremdstörung eines benachbarten Aggregats behoben wird. D.h. die Pufferstrecke vor dem Füller soll meist gefüllt sein, so dass die Fremdstörung „geschluckt“ werden kann, ohne dass der Füller zum Halten kommt. Dies wird erreicht, indem die Einstellleistung der vorliegenden Aggregate so groß ist, dass es der Kompensation seiner Eigenstörzeiten entspricht [Pete-93]. Dies führt zu einer Charakteristik der Maschinen-Einstelleistungen, wie sie in der folgenden Abbildung, der Berg'sche Kurve, dargestellt wird. Durch die Leistungsabstufung wird erreicht, dass der Abfüllprozess möglichst wenig durch anlagenbedingte Störungen unterbrochen wird.

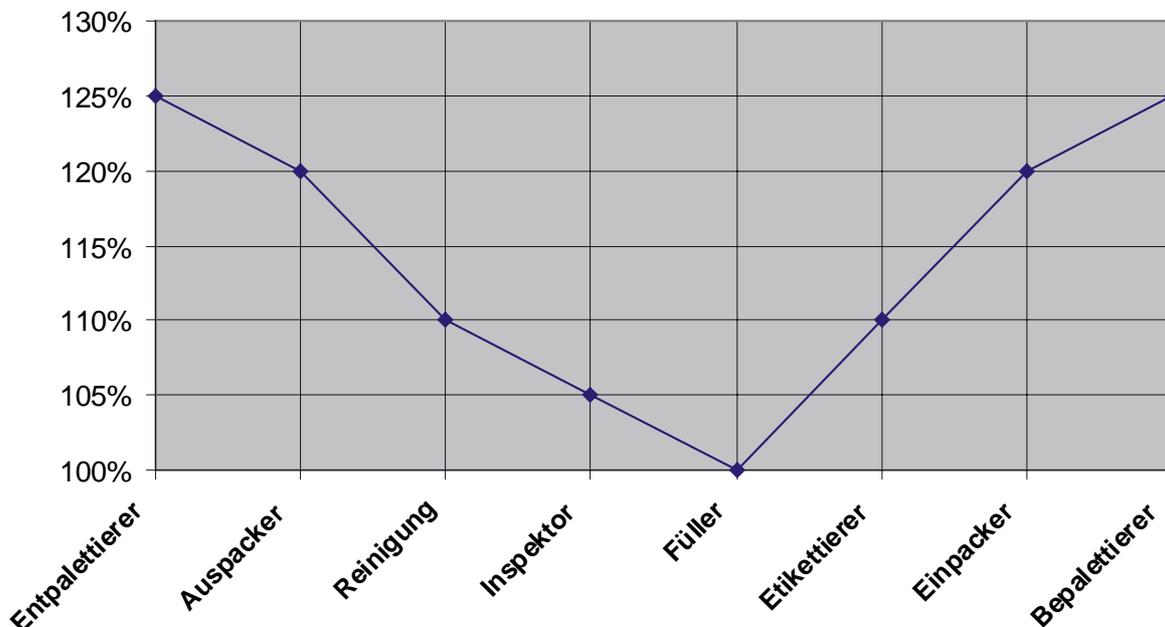


Abbildung 17: Berg'sche Kurve [Pete-93]

Anzumerken ist, dass auch die Aggregate nach dem Füller eine höhere Einstellleistung haben. Hier gilt grundsätzlich die gleiche Begründung wie für die Aggregate vor dem Füller. Eine Fremdstörung eines nachliegenden Aggregates bewirkt einen Rückstau, der sich bis zum Füller ausdehnen und somit zu einem Anhalten des Abfüllprozesses führen kann. Um derartige Fremdstörungen zu vermeiden, müssen die nachfolgenden Aggregate mit einer höheren Leistung betrieben werden, damit die Behälter schneller als im Füller bearbeitet werden und somit die Bildung eines Rückstaus verhindert werden kann.

Diese Eigenschaften lässt sich zu folgendem Bild vereinfachen:

- die Pufferstrecken vor dem Füller sollen meist belegt sein und nach dem Füller meist leer sein.

Aufgrund der verschiedenen Gütereigenschaften und der unterschiedlichen Menge an transportierten Behälter unterscheidet sich die Auslegung des Puffers wesentlich für den Nassbereich und für den Trockenbereich.

#### **3.5.2 Pufferauslegung im Nassbereich**

Es wurde gezeigt, dass zur Erzielung des gewünschten Nenndurchsatzes bzw. zur Herabsetzung der Auswirkungen von leistungsmindernden Störungen, ausreichende Puffer vorzusehen sind. Dabei wird die Pufferfunktion in die Transporttechnik integriert. Mehrsträngigen Transporteure bieten aufgrund ihrer Breite und der eingesetzten Transporttechnik eine gute Puffermöglichkeit. Hier stellt sich nun die Frage, wie diese Transportstrecken dimensioniert werden müssen, damit die Störung eines Aggregats den Betrieb einer benachbarten Maschine nicht beeinflusst, ohne dabei den erforderlichen Flächenbedarf und die Investitionskosten außer Acht zu lassen. In der folgenden Abbildung wird veranschaulicht, wie der Materialfluss zwischen zwei Aggregaten während einer Störung sich verändern kann. Hier wird der Zusammenhang zwischen der Stördauer eines Aggregats und der Pufferkapazität offensichtlich. Kurz vor einer Störung sollen auf der Pufferstrecke genügend Einheiten vorhanden sein, um die Maschine M2 weiter zu betreiben und eine wegen Materialmangel verursachte Störung zu vermeiden.

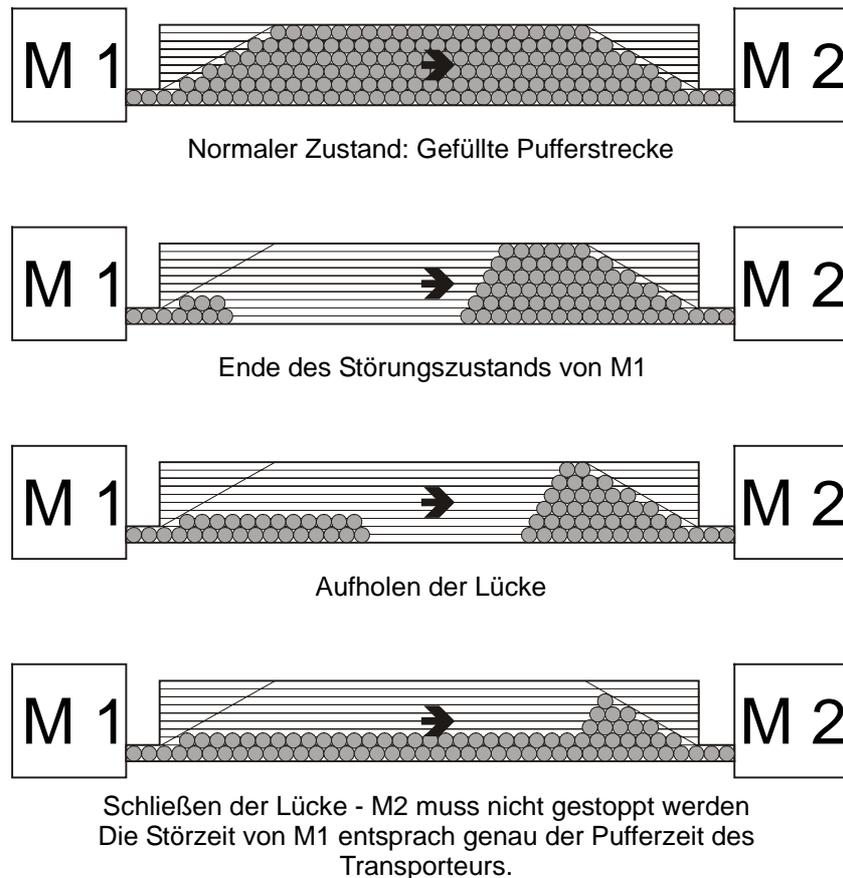


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Pufferwirkung [Prob-82]

Neben der Pufferkapazität wird in der Getränkeindustrie der Begriff „Pufferzeit“ angewendet und ist eine hilfreiche Kenngröße zur Dimensionierung der Transportstrecken. Für ihre Definition werden zwei Fälle unterschieden [Prob-82]:

- Aggregate vor dem Füller: Die Pufferzeit zwischen zwei Maschinen ist die Zeit, die die stromaufwärtige Maschine bei gefüllter Pufferstrecke als Ausgangssituation angehalten werden kann, ohne dass sich als Folge dieses Stillstandes Flaschenmangel an der stromabwärtigen Maschine ergibt.
- Aggregate nach dem Füller: Die Pufferzeit zwischen zwei Maschinen ist die Zeit, die die stromabwärtige Maschine bei nur Primärstrom belegter Transportstrecke als Ausgangssituation angehalten werden kann, ohne dass sich als Folge dieses Stillstandes Flaschenrückstau am Auslauf der stromaufwärtigen Maschine ergibt.

Weiterhin lassen sich die Pufferzeit und -kapazität folgendermaßen berechnen. Vorauszusetzen ist, dass die Behälter in der dichtesten Packung transportiert werden (siehe folgende Tabelle).

Die Pufferzeit ist gleich:  $T_B = L \cdot \frac{V_T - V_P}{V_T \cdot V_P} \quad (s)$ mit $V_P = \frac{F \cdot d}{\left(\frac{b}{d} - 1\right) \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} + 1}$ für einspurigen Transporteur gilt : $b = d \Rightarrow V_P = F \cdot d$	L : die Entfernung zwischen zwei Aggregaten
	B : Breite des Transporteurs
	d : Behälterdurchmesser
	F : die Leistung des schwächeren Aggregats
	V <sub>T</sub> : die Fördergeschwindigkeit
	V <sub>P</sub> : die Pulkgeschwindigkeit
Die Pufferkapazität N ist gleich  $N = \frac{L}{d} \cdot \left[ \left( \frac{b}{d} - 1 \right) \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} + 1 \right]$	

Tabelle 3: Berechnung der Pufferzeit und -kapazität [Pete-93]

Es muss die Fördergeschwindigkeit zum Erreichen des geforderten Durchsatzes unter Berücksichtigung des Lärmpegels und der Reibungseffekte ermittelt werden. Ein Massentransporteur, auch Durchlaufpuffer genannt, vereint die beiden Funktionen Transportieren und Puffern [Rädl-00] (siehe vorhergehende Abbildung). Die Behälter auf der Pufferfläche haben eine effektive Eigengeschwindigkeit gleich null und daher ein Schlupf gegenüber die Fördergeschwindigkeit von 100%. Um einen produktschonenden Transport zu realisieren, muss die Geschwindigkeit auf diesen Pufferstrecken so gering wie möglich gehalten werden. Die glatte Oberfläche der meist eingesetzten Scharnierbandketten und eine ausreichende Schmierung tragen außerdem dazu bei, dass die Reibungseffekte bei geringen Geschwindigkeiten niedrig bleiben.

In der oben dargestellten Formel werden zwei Geschwindigkeitsbezeichnungen  $v_P$  und  $v_T$  verwendet. Die Pulkgeschwindigkeit  $v_P$  hängt lediglich von geometrischen Abmessungen und der Leistung des Aggregates ab und kann somit berechnet werden. Übrig bleibt der Wert der Fördergeschwindigkeit  $v_T$ , der in den meisten Fällen ein Erfahrungswert ist. In verschiedenen Veröffentlichungen oder Firmendokumenten sind Tabellen und Diagramme zu finden, in denen die Fördergeschwindigkeit, die Pufferkapazität, die Pufferzeit, die geometrischen Abmessung der Förderstrecke, so wie die Anzahl der Ketten und die verfügbare Länge in Abhängigkeit voneinander dargestellt werden. Bei der Planung einer neuen Abfüllanlage sind lediglich die räumlichen Randbedingungen und die gewünschte Effektivleistung bekannt. Die anderen Kenngrößen, z.B. die Leistungen der Aggregate oder die Puffergröße sind noch zu ermitteln. Da die Mehrheit dieser Kenngrößen voneinander abhängig sind, müssen die optimalen Werte zur Dimensionierungen des Durchlaufpuffers bzw. der Anlage in mehreren iterativen Schleifen ermittelt werden.

Die Abbildung 19 zeigt beispielsweise, wie die Pufferbreite bzw. die Kettenzahl in Abhängigkeit der Förderlänge ermittelt werden kann.

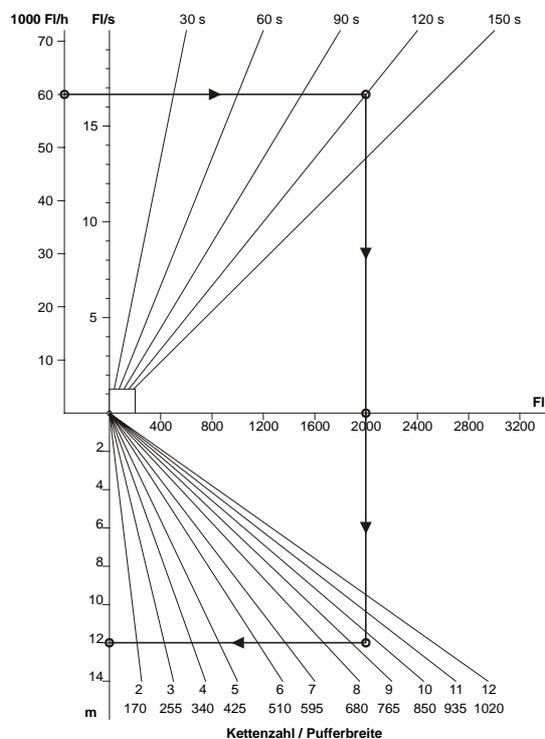


Abbildung 19: Pufferdiagramm für Euro-Flaschen und Schanierbandketten [Pete-93]

Wird bei einer Flaschenfüllkolonne mit einer Einstelleistung von 60.000 Flaschen/h eine Pufferkapazität von 120 Sekunden gewünscht, so müssen insgesamt 2000 Flaschen gespeichert werden. Beträgt die wirkliche Nutzlänge für die Pufferung auf dem Transporteur 12 Meter, so müssen nach dem vorliegenden Diagramm 10 Bänder parallel gelegt werden bzw. beträgt die Gesamtbreite des Puffers 850 mm.

### 3.5.3 Regelungskonzepte im Nassbereich

Bisher wurden die verschiedenen Aggregate und Transporttechniken sowie die Anlagenauslegung beschrieben. Die Anforderungen an den Prozessablauf, insbesondere das Vermeiden von Unterbrechungen des Abfüllvorgangs und das Erreichen des gewünschten Durchsatzes, können neben der geometrischen Dimensionierung der Transporteure und der Leistungsauslegung der Aggregate auch mit Hilfe einer sinnvollen Anlagenregelung erfüllt werden.

Die gesamte Anlage wird mit Hilfe unterschiedlichster Stauschalter geregelt, die vor und nach jedem Aggregat aufgestellt sind. Obwohl die Regelungskonzepte von der Ausführung, dem Automatisierungsgrad und den Auswirkungen sehr unterschiedlich sein können, ist ihre grundsätzliche Funktionsweise die gleiche. Sie haben die Aufgabe, den Füllgrad der Förderstrecken zu überwachen und bei bestimmten Werten eine Aktion auszulösen. Hier bieten sich folgende Alternativen an [Prob-82]:

- Durchsatzregelung zur Minimierung von Haltezeiten
- Durchsatzregelung zur optimalen Ausnutzung der Pufferstrecken
- Reduzieren der Bandgeschwindigkeit bei sich füllendem Puffer
- Die Dosierregelung im Bereich des gestauten Flaschenstroms

#### 3.5.3.1 Durchsatzregelung zur Minimierung von Haltezeiten

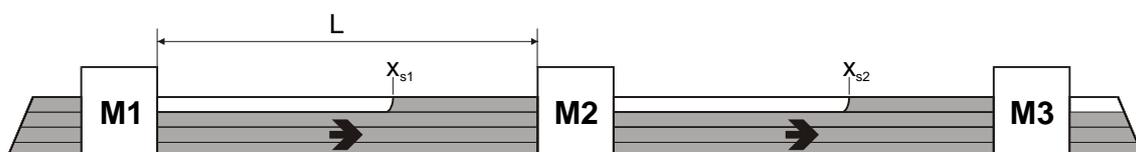


Abbildung 20: Regelung der Leistung in Abhängigkeit des Füllstands

Der Grundgedanke besteht darin, bei einer Störung von M1 oder M3 die Maschine M2 nicht mit maximaler Leistung zu betreiben und dann zu stoppen, sondern ihre Leistung so zu reduzieren, dass ein Anhalten vermieden wird. Dies führt dazu, dass die Einstellleistung der Maschine M2 eine Funktion der Staulage  $x_s$  oder der Gesamtzahl der Behälter im vor- und nachgeschalteten Puffer ist. Die Realisierung dieser Regelungsart erweist sich als schwer, da eine ständige Messung der Behälterverteilung auf der Transporteurlänge erforderlich ist.

#### **3.5.3.2 Durchsatzregelung zur optimalen Ausnutzung der Pufferstrecken**

Eine weitere mögliche Regelung ist die sogenannte Zweipunktregelung über Minderleistungsschalter. Das Aggregat kann mit zwei verschiedenen Leistungen betrieben werden: eine maximale und geminderte Leistung. Hier wird ein möglichst langes Andauern der einzelnen Zustände angestrebt, um ein Verschleiß der Antriebe und Getriebe durch häufige Anfahr- und Bremsvorgänge zu verhindern.

Es kann zwischen zwei Arten von Schaltern unterschieden werden:

- einen vor dem Aggregat befindlichen Stauschalter
- und einen nach dem Aggregat angebrachten Mangelschalter.

Je nach Belegung oder Nichtbelegung des Stauschalters bzw. des Mangelschalters wird die Leistung des dazu gehörigen Aggregates geändert. Außerdem besteht die Möglichkeit, beim Auftreten einer Stau- oder Mangelstörung die Fördergeschwindigkeit der einzelnen Transporteurabschnitte mitzuregulieren und somit die entstandene Lücke zwischen Primärstrom und gepuffertem Pulk schneller abzuschließen. Die beiden Schalter können auf einen einzigen reduziert werden, falls das Umschalten der Leistungen zeitlich verzögert wird.

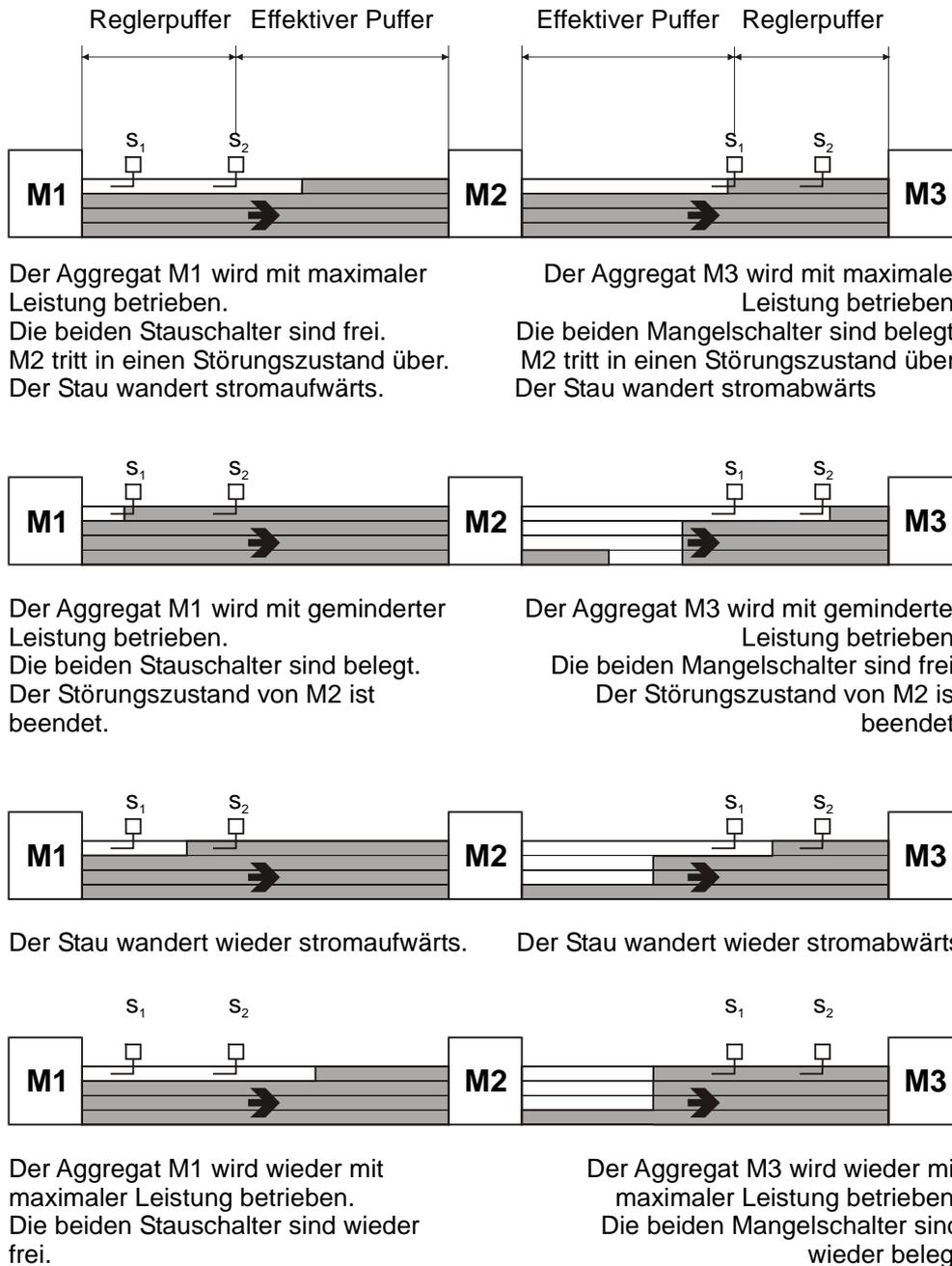


Abbildung 21: Die Zweipunktregelung

Ein häufig angewendeter Spezialfall der Zweipunktregelung ist die Ein-Aus-Regelung, da hier die niedrige Leistung des Aggregates Null beträgt. In diesem Fall wird die Maschine entweder mit maximaler Leistung angetrieben oder angehalten.

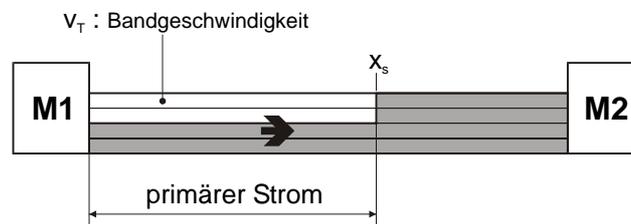
Der Unterschied der Ein-Aus-Regelung zu dem Grundkonzept der Zweipunktregelung liegt in der Pufferdimensionierung und der Lärmemission sowie in der

Automatisierungstiefe. Aus Sicht der Automatisierungs- und Regelungstechnik ist die Ein-Aus-Regelung einfacher zu realisieren. Bei der Verwendung der Ein-Aus-Regelung sind größere Pufferstrecken als bei der Zweipunktregelung notwendig. Die Häufigkeiten des Abschaltens bei der Ein-Aus-Regelung und des Umschaltens bei der Zweipunktregelung ist zu beachten, um ein Verschleiß der Aggregate zu verringern. Daher ist die richtige Wahl der Leistungsstufen und das Positionieren der Stauschalter von großer Bedeutung, um einen optimalen Ablauf zu sichern.

Die Zweipunktregelung kann erweitert werden, wenn mehr als zwei Stau- bzw. Mangelschalter eingebaut werden. In diesem Fall verfügt der Aggregat über mehrere Leistungsstufen. Der Unterschied im Regelungsprinzip liegt darin, dass das Aggregat schrittweise seine Leistung verringert.

### 3.5.3.3 Reduzieren der Bandgeschwindigkeit bei sich füllendem Puffer

Hier wird die Bandgeschwindigkeit im Bereich des nicht rückstauenden primären Behälterstroms in Abhängigkeit des Füllgrads geregelt und geändert, um das Aggregat nur mit maximaler und konstanter Leistung betreiben zu können.



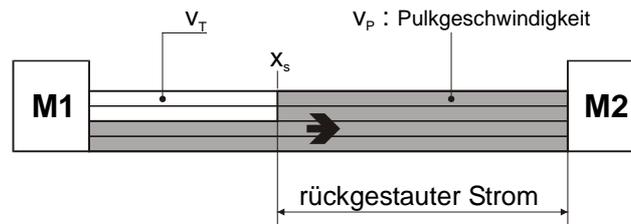
$$v_T = f(x_s)$$

Abbildung 22: Reduzierung der Bandgeschwindigkeit

Nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine  $M_1$  kann nach diesem Regelungsprinzip die Bandgeschwindigkeit erhöht werden, um eine weitere Störung des nachfolgenden Aggregats aufgrund der fehlenden Behälter zu verhindern. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Transportgeschwindigkeit aufgrund der hohen Lärmemission einen bestimmten Grenzwert nicht überschreitet. Trotz der Berücksichtigung dieser Geschwindigkeitsgrenzen entstehen beim Aufprallen der nachkommenden Behälter auf dem Stau Geräusche.

### 3.5.3.4 Die Dosierregelung im Bereich des gestauten Flaschenstroms

Im Gegensatz zum letzten Konzept wird hier die Fördergeschwindigkeit der vollgestauten Transportstrecken reduziert und dem gewünschten Durchsatz angepasst. Somit gleicht sie der Pulkgeschwindigkeit  $v_p$ .



$$v_T = f(v_p)$$

Abbildung 23: Die Dosierregelung

Dieses Ziel wird erreicht, indem durch einen geschwindigkeitsgeregelten Transporteurabschnitt in einen nachfolgenden vollgestauten Transporteurbereich nur so viele Behälter eingespeist werden, wie aus diesem stromabwärts entnommen werden. Die Belegungsichte auf dem Reglerpuffer wird gemessen und entsprechend die Transportgeschwindigkeit angepasst. Sind zu wenig Behälter auf dem Reglerpuffer, so wird sie erhöht. Mit dieser Regelung wird versucht, den Transport der Behälter schonend und geräuscharm zu gestalten.

### 3.5.3.5 Fazit

Es hat sich gezeigt, dass die Anlagenauslegung und fördertechnische Dimensionierung allein nicht ausreichend ist, um die Anforderung an einem kontinuierlichen Prozessablauf erfüllen zu können. Die hier beschriebenen Regelungsalternativen können entweder einzeln eingesetzt oder miteinander kombiniert werden, um den Regelungseffekt zu erhöhen und optimieren. Es muss nur darauf geachtet werden, dass die Investitionskosten der Abfüllanlagen umso höher sind, je höher der Automatisierungsgrad ist.

### 3.5.4 Anlagenregelung zwischen Nass- und Trockenbereich

In den letzten Abschnitten wurde nur auf die Regelungsmöglichkeiten des Flaschen- bzw. des Behältertransports im Nassbereich eingegangen. Die Steuerung des Palettentransports bzw. des Gebindetransports im Trockenbereich erfordern keine genaueren Erläuterungen, da es sich entweder um herkömmliche Fördertechniken mit standardisierten Regelungsprinzipien, wie z.B. der Palettentransport auf der Rollenbahnen, handelt oder Ähnlichkeiten mit den bereits erwähnten Regelungskonzepten vorhanden sind.

#### 3.5.4.1 Anlagenregelung im Trockenbereich

Beispielsweise entspricht die Regelung des Gebindetransports und der Gebindebearbeitung dem Konzept der Ein-Aus-Regelung. Es findet eine Regelung mit Hilfe von Lichtschranken statt, die vor und nach den Aggregaten angebracht sind. Sie überwachen die Belegungsdichte bzw. den Füllgrad vor und nach dem Aggregat.

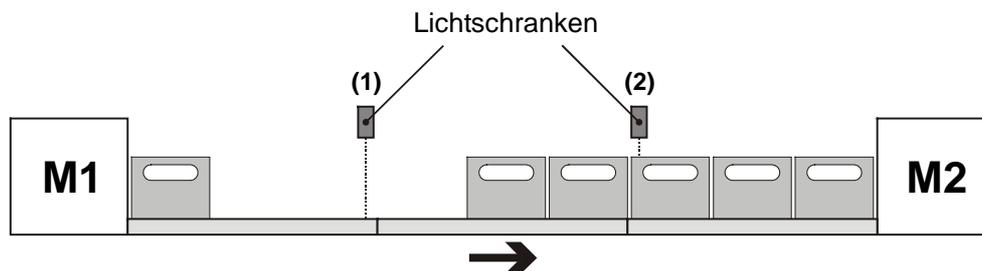


Abbildung 24: Regelung des Gebindetransports (Normalzustand)

Hat eine nachfolgende Maschine M<sub>2</sub> eine längere Störung, bildet sich stromaufwärts einen Rückstau. Somit ist die nach dem Aggregat M<sub>1</sub> eingebrachte Lichtschranke (1) belegt. In diesem Fall tritt auch diese Maschine M<sub>1</sub> in den Stöorzustand, damit der Stau sich nicht bis in das Aggregat M<sub>1</sub> zurückbildet. Im normalen Betriebszustand sollte die Lichtschranke (2) vor dem Aggregat belegt und die nach dem Aggregat frei sein. Somit wird die Maschine nur betrieben, wenn die Transportstrecke vor dem Aggregat mit einer ausreichenden Anzahl an Gebinden belegt ist und die Transportstrecke nach dem Aggregat frei ist.

### 3.5.4.2 Verknüpfung von Nass- und Trockenbereich

Aus den Arbeitsreihenfolgen der Einweg- und Mehrweg-Anlagen (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5) besitzt der interne Materialfluss einer Abfüllanlage mindestens eine **Verzweigungs-** und **Zusammenführungsstelle**. Damit ist nicht gemeint, dass die gleichen Transporteinheiten auf zwei verschiedenen Förderstrecken weiter transportiert werden, sondern die in diese Station eingegangenen Behälter entweder zu einem einzigen Verbund zusammengefasst oder aus einem Verbund zu mehreren Behälter vereinzelt werden.

In diesem Zusammenhang ist eine Analogie zur Fertigungstechnik hilfreich:

- Verzweigungsstellen in der Getränkeabfüllanlagen entsprechen Demontagestationen. Beispielsweise werden die Gebinde im Entpalettierer aus den Paletten entnommen genauso wie die Behälter aus den Gebinden im Auspacker.
- Zusammenführungsstellen in der Getränkeabfüllanlagen entsprechen Montagestationen. Beispielsweise werden die Gebinde im Bepalettierer auf die Paletten aufgebracht, genauso wie die Behälter in die Gebinde im Einpacker.

Außer bei Einweg-Abfüllanlagen, in der die Behälter neu hergestellt und in Trays verpackt werden, kann daher eine Abfüllanlage als ein System von Kreisläufen oder Maschen dargestellt werden, die an diesen Demontage- und Montagestellen miteinander verknüpft sind.

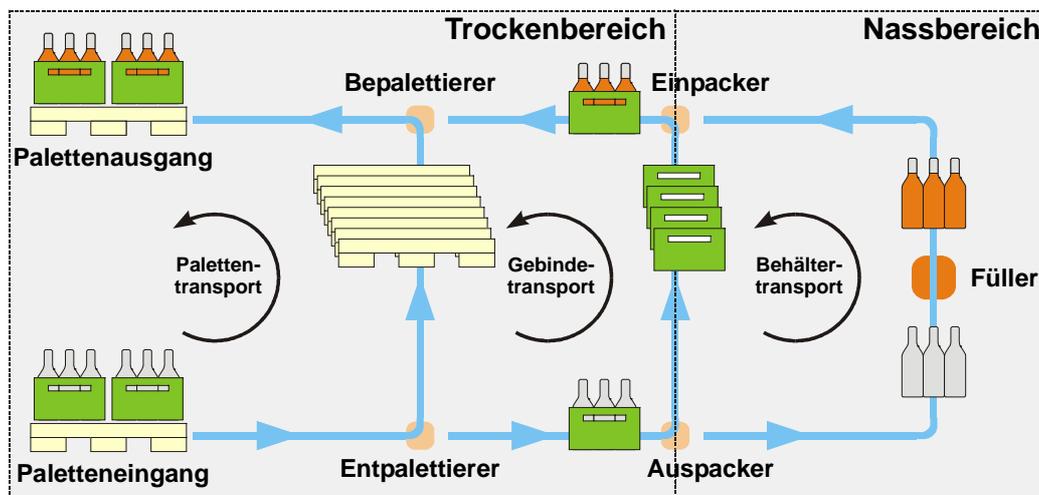


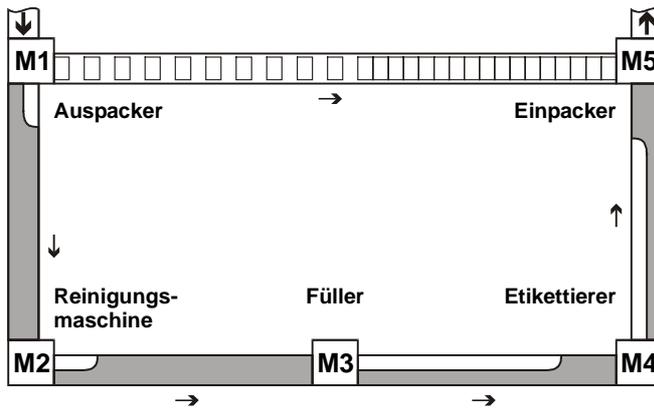
Abbildung 25: Schematische Darstellung einer Mehrweg-Abfüllanlage

Im Hinblick auf die Anforderung über eine möglichst kontinuierliche Abfüllung müssen die Ladehilfsmittel, die Gebinde und die Paletten, an den Montageplätzen, d.h. am Einpacker und am Bepalettierer, vorhanden sein, sobald die Behälter bzw. die Gebinde dort angekommen sind. Auf diese Weise kann ein Rückstau bis zum Füller verhindert werden. Daraus ergibt sich, dass der Transport der leeren Paletten und Gebinde und ihre Pufferzeiten in den Maschen aufeinander abgestimmt werden muss.

Im ersten Kreislauf „Palettentransport“ stellt der Leerpalettentransport keine relevanten Probleme dar. Aufgrund ihrer Aufnahmekapazität ist die Anzahl der notwendigen Leerpaletten im Vergleich zu den Gebinden gering. Außerdem lassen sich die Leerpaletten platzsparend gut und vielfach stapeln. Da dieser Kreislauf der äußerste in der Anlage ist, kann das Ausschleußen der Leerpaletten aus der Anlage einfach gestaltet werden. Daher können die Leerpaletten auch teilweise außerhalb der Anlage gepuffert werden.

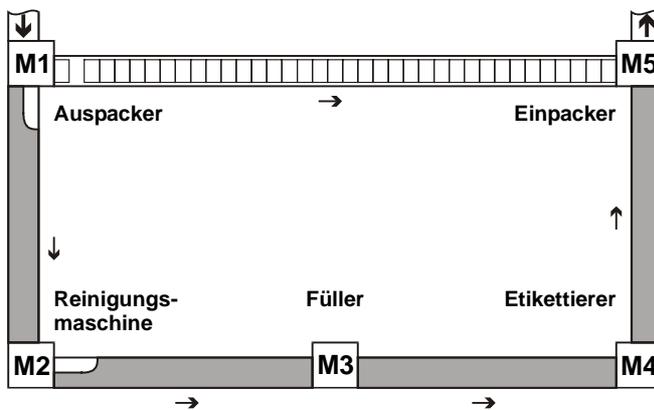
Der andere Kreislauf „Gebindetransport“ mit dem Kastentransport liegt dem Füller sehr nah und kann deshalb stark den Abfüllprozess beeinflussen. Hier ist eine genaue Abstimmung zwischen dem Transport der leeren Gebinde von großer Bedeutung. Es muss eine ausreichende Pufferkapazität für die leeren Gebinde zwischen Auspacker und Einpacker vorhanden sein. Dafür bietet im Normalenfall die Transportstrecke zwischen diesen beiden Aggregaten genügend Platz. In besonderen Fälle werden auch Kastenspeicher integriert.

Die folgende Abbildung [Prob-82] zeigt, wie sich eine Störung im Füller oder im Auspacker auf den Prozessablauf auswirken kann. Im normalen Zustand sollen die Pufferstrecken vor dem Füller gefüllt und nach diesem Aggregat leer sein. Die Gebindebahn soll dafür soweit belegt sein, dass sie sowohl Gebinde aufnehmen als auch abgeben kann.



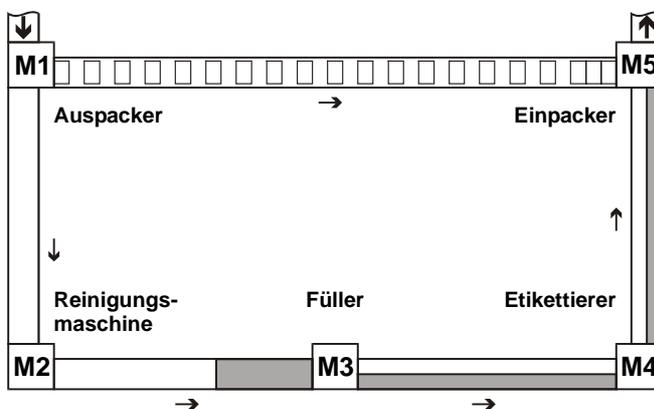
**Normalzustand:**

- Alle Aggregate in störungsfreiem Zustand
- Puffer vor dem Füller befüllt
- Puffer nach dem Füller vom Primärstrom belegt
- Gebindestrecke zwischen Aus- und Einpacker gerade noch aufnahmefähig



**Störungszustand:**

- Einpacker in Störungszustand
- Puffer vor dem Füller befüllt
- Puffer nach dem Füller befüllt
- Gebindestrecke zwischen Aus- und Einpacker nicht mehr aufnahmefähig



**Störungszustand:**

- Auspacker in Störungszustand
- Puffer vor dem Füller teilweise befüllt
- Puffer nach dem Füller vom Primärstrom belegt
- Gebindestrecke zwischen Aus- und Einpacker teilweise befüllt

Abbildung 26: Zusammenhang zwischen dem Behälter- und dem Gebindeftransport

## 4 Anforderungen an einem Simulationswerkzeug

Die ausgeführte Systemanalyse hat es ermöglicht, einen Gesamtüberblick über den Aufbau einer Abfüllanlage sowie ein Verständnis für die Funktionalität der verschiedenen Aggregate zu schaffen. Weiterhin wurde mit Hilfe dieser Analyse die Rolle der Fördertechnik aufgezeigt, die nicht nur die Aufgabe des konventionellen Förderns übernimmt, sondern auch des Puffern und des Regeln. Durch das Ausführen der unterschiedlichen Steuerungsalternativen und der internen Zusammenhäng zwischen allen Bestandteile konnte der hohe Automatisierungsgrad solcher Anlagen verdeutlicht werden.

Obwohl die Abfüllanlagen von ihrem Aufbau und Funktionalität her einfach strukturiert sind, hat sich durch die durchgeführte Systemanalyse gezeigt, dass sie sich von anderen Fertigungs- oder Produktionseinrichtungen stark unterscheiden, nicht zuletzt durch die hohe Anzahl an bewegten Güter.

Daher ist es nun wichtig festzulegen, welche allgemeinen Anforderungen das geeignete Simulationswerkzeug erfüllen soll. Diese können folgendermaßen untergliedert werden:

### Modellaufbau

- Der Anwender soll ohne Vorkenntnisse über die Simulationstechnik in der Lage sein, ein Modell aufbauen zu können. Dazu ist eine Gerätebibliothek nötig, die sich einfach erweitern lässt.
- Die Bibliothek enthält alle möglichen Komponenten einer Anlage, die durch den Anwender selber mit den wichtigsten Kenngrößen parametrisiert werden können.
- In dem Modell soll auf eine einfache Weise das reale Verhalten der Anlage, insbesondere der Transportstrecken, abgebildet werden können.
- Es soll darauf geachtet werden, dass die Abbildungstiefe nicht unnötigerweise erhöht werden, da sie die Benutzerfreundlichkeit und das Verständnis für die Simulation erschweren kann.

### **Experimentieren und Auswerten**

- Durch geeignete Abbildungsmethoden soll die Simulationsdauer aufgrund der großen Anzahl an beweglichen Elemente nicht beeinträchtigt werden.
- Der Anwender soll beim Definieren der Experimente bzw. der Simulationsläufe durch vordefinierte Methoden begleitet werden.
- Es sollen statistische Darstellungsmethoden ausgewählt werden, die dem Anwender helfen, Aussagen über den Durchsatz und die Auslastung der Komponenten zu treffen.

## 5 Abbildung einer Abfüllanlage

Nachdem der Aufbau einer Abfüllanlage sowie deren Bestandteile und ihre Beziehungen zueinander beschrieben wurden, sollen sie nun im Sinne eines späteren Einsatzes der Simulation gedanklich und symbolisch abstrahiert und abgebildet werden. Um die spätere Modellierung und Umsetzung zu vereinfachen, soll eine einheitliche Strukturierung bei der Abbildung der Aggregate und Transporteure erzielt werden. Dabei wird überprüft, welche aus den im realen System vorhandene Komponenten, Strukturen, Regeln und stochastischen Einflüsse so wichtig sind, dass sie für die Zielsetzung im Modell eingesetzt werden müssen [Kost-95].

### 5.1 Einführung in der Abbildungsmethodik

Nach der Festlegung, welches System mit welcher Zielsetzung simuliert werden soll, muss im nächsten Schritt bestimmt werden, wo die Grenze zwischen dem zu simulierenden System und seiner Umwelt liegt und welche Größen ausgetauscht werden [Saue-99]. Dieses System kann sich auch aus mehreren Untersystemen zusammensetzen, die wiederum eine Grenze haben und in Beziehungen zueinander stehen. Dies geschieht über Schnittstellen, die sich auf der Systemgrenze befinden und somit dem Austausch von Eingang- und Ausgangsgrößen ermöglichen. Allgemein gültige Kriterien für die Abgrenzung eines Systems von seiner Umwelt sind praktisch nicht vorhanden. Es ist immer die Aufgabe des Anwenders festzustellen, welche Teilsysteme er betrachten und untersuchen muss, um die aufgestellte Aufgabe zufriedenstellend und genau zu bearbeiten. Relevante Teilsysteme sollen nicht getrennt oder beschnitten werden. Andererseits sollen auch keine Teilsysteme untersucht werden, die nicht im direkten Zusammenhang zur Aufgabe stehen. Das würde die Aufgabe nur unnötig verkomplizieren, die Überschaubarkeit und Nachvollziehbarkeit beeinträchtigen und den weiteren Verlauf der Analyse viel schwieriger gestalten [Lück-97].

Zunächst soll eine grundsätzliche Entscheidung getroffen werden, wie das System bzw. die Untersysteme und ihr Verhalten abgebildet werden müssen. Folgende Verfahren werden dabei angewendet [VDI 3633 Blatt1]:

- Reduktion (Verzicht auf unwichtige Systemeigenschaften und -elemente)
- Abstraktion (Verallgemeinerung der spezifischen Systemkennzeichen und Abbilden des Wesentlichen)

Es ist Aufgabe des Planers zu erkennen, welche Komponenten zusammengefasst bzw. weggelassen werden können. Eine 1:1-Abbildung des Systems zu einem simulationsfähigen Modell ist im allgemeinen unmöglich und nur bei sehr einfachen Systemen möglich. Ein zu detailliertes Modell führt zu einem meist nicht zu rechtfertigenden Arbeitsaufwand, beeinträchtigt die Übersichtlichkeit des Modells und kann sogar die Funktionalität des Modells einschränken oder gar zunichte machen. Zur Modellbildung und zur späteren Modellierung stehen zwei Simulationsmöglichkeiten zur Verfügung:

- Die Abbildung des Systemverhaltens
- oder die Abbildung des Systemstruktur

Bei der **Abbildung des Verhaltens** wird das System bzw. das Untersystem als eine geschlossene Einheit, eine sogenannte „Blackbox“, betrachtet. Die innere Struktur des Systems wird hierbei nicht näher berücksichtigt, so dass lediglich die Interaktion der Blackbox mit der Umwelt im Vordergrund steht. Hier werden nur über die Schnittstellen, die Eingänge und die Ausgänge, bestimmte Größen mit der Umwelt oder mit den anderen Systemen ausgetauscht. Die Eingangsgrößen bewirken eine Zustandsänderung der Blackbox und somit eine Aktualisierung der Ausgangsgrößen, die wiederum als Eingangsgrößen für nachfolgende Systeme gelten.

Beim **Abbilden der Systemstruktur** wird das reale System bzw. das Untersystem in seine wesentlichen Komponenten zerlegt und die Beziehungen zwischen diesen Komponenten untereinander beschrieben und im Modell nachgebildet. Es wird also ein Modell des Systems mit allen Einzelheiten entwickelt. Der größte Nachteil dieser

Methode liegt in der Komplexität der Daten bzw. der Komponenten und Elemente. Häufig ist es nur mit großem Aufwand möglich, ein System so zu durchdringen, dass alle Bestandteile ausreichend beschrieben und abgebildet werden können.

In der Praxis werden je nach Modellzweck, Detaillierungsgrad oder Systemgrenze beide Methoden angewendet, um später die Aussagereichweite der Simulationsstudien zu erhöhen. Somit lässt sich das Gesamtmodell eines Materialflusssystem in Teilmodelle untergliedern, die als Blackbox abgebildet werden können. Daraus entsteht die Notwendigkeit, weitere Modellierungsmöglichkeiten zu erörtern und zu strukturieren.

In der VDI-Richtlinie 3633 wird das System in einer Aufbau- und Ablaufstruktur untergliedert. Beiden Strukturen beschreiben das statische und das dynamische Verhalten des realen Systems und seiner Komponenten, sowie deren Verknüpfungen untereinander.

### **5.1.1 Die Aufbaustruktur eines Modells**

Für den Systemaufbau werden mehrere Modellelemente benötigt, die sich in zwei Gruppen unterteilen lassen: Die physischen und die logischen Elemente.

Ein Materialflusssystem kann technisch aus drei physischen Grundelementen bestehen, mit denen jeder Bereich oder jede Art von Materialfluss- oder Produktionssystem physisch aufgebaut werden kann:

- **Bearbeitungs- oder Prozesselement:** Es verarbeitet auf eine bestimmte Weise das Material und beansprucht hierbei Zeit.
- **Transportelement:** Es nimmt das Material auf und verändert zeitverzögert dessen örtliche Position.
- **Lagerung- oder Pufferelement:** In diesem Element kann das Material nach bestimmten Prinzipien gelagert, bis es von einem Prozess- oder Transportelement abgerufen werden.

Nach dieser Gliederung integriert der Prozess drei Funktionen: das Ändern der Materialeigenschaft, der Zeitverbrauch und die Möglichkeit zum Puffern. Er vereint

damit alle physischen und logischen Eigenschaften der anderen beiden Elemente. Das Transportelement fasst wiederum die Eigenschaften, die Zeit zu verbrauchen und das Material zu puffern, zusammen. Daher wird dieses Element dem Prozess untergeordnet. Somit stehen die drei Elemente in einer hierarchischen Struktur zueinander, wobei der Puffer sich auf der untersten Ebene nach dem Prozess- und dem Transportelement befindet.

Die drei Elemente können entweder einzeln eingesetzt oder in Bausteine zusammengefasst werden. In der Regel werden die Systeme als Puffer-Prozess-Kombinationen sowie einzelne Puffer- und Transportelemente abgebildet.

Neben den genannten Bausteinen und Elemente werden weitere Objekte benötigt, um die Bewegung im System realisieren zu können, sogenannte bewegliche Elemente, wie z.B. Paletten, Kästen oder Flaschen. Sie werden zwischen den drei Grundbausteinen ausgetauscht und bewirken damit eine Änderung deren Zustände.

Die logischen Elemente werden benötigt, um eine Bewegung im System zu erzeugen. Sie beinhalten alle notwendigen Informationen und Daten über das Gesamtsystem und seine verschiedenen Elemente, wie z.B. Aufträge oder Arbeitspläne.

### **5.1.2 Die Ablaufstruktur eines Modells**

Die Aufgabe der Ablaufstruktur besteht darin, die interne Logik des Systems und seiner Bausteine zu beschreiben. Hier wird die Methode festgelegt, nach der die im System eingegangenen Größen in Ausgangsgrößen umgewandelt werden. Im Falle der Abbildung als Blackbox wird das System bzw. das Untersystem ohne nähere Betrachtung des internen Aufbaus durch Algorithmen bzw. mathematische Funktionen beschrieben. Diese Funktionen ermöglichen die Dauer jedes seiner Zustände genau zu berechnen. In der Ablaufstruktur ist außerdem hinterlegt, wie die verschiedenen Elemente des Systems über ihre Schnittstellen miteinander kommunizieren und Materialfluss- sowie Informationsflussobjekte austauschen. Die durch diese Struktur hergestellten Verknüpfungen zwischen den physischen und den logischen Elemente ermöglicht erst, dass das Modell auf Ereignisse und Zustände reagieren kann.

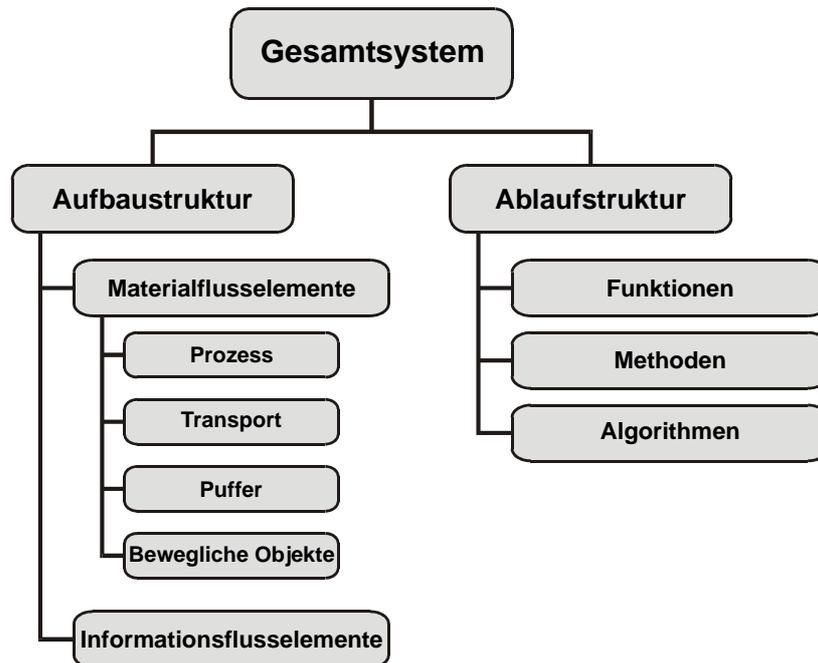


Abbildung 27: Gliederung eines Gesamtsystems

## 5.2 Hierarchische Struktur des Gesamtmodells

Ein reales System lässt sich schwer als eine einzige geschlossene Gesamteinheit abbilden, da es häufig aus mehreren physischen und logischen Elementen sowie Teilmodellen besteht. Eine modulare Systemstruktur ermöglicht eine hierarchische Modellgestaltung und somit einen stufenweisen iterativen Einsatz der Simulation bei der Modellierung und dem Experimentieren.

Das hierarchische Modell gliedert sich wie in der Realität in mehrere untergeordnete Ebenen, die entweder aus Teilsystemen, Elementen oder wiederum aus Ebenen bestehen. Genauso wie in der realen Anlage müssen in und zwischen den Ebenen verschiedene Informationen verarbeitet und ausgetauscht werden, bevor Material in dem Modell fließt. Eine übergeordnete Ebene leitet solange Informationen an eine untergeordnete Ebene, bis eine Ebene erreicht wurde, die sich aus Materialflusselementen zusammensetzt. Hier erst kann der tatsächliche Materialfluss stattfinden. Um diese Vorgänge ständig kontrollieren und verfolgen zu können, müssen auch Informationen oder Rückmeldungen an die übergeordneten Ebenen zurückgegeben werden. Dieses Frage-Antwort-Verfahren ermöglicht eine für die Simulation sinnvolle Entkopplung des Materialflusses vom Informationsfluss. Um dies zu realisieren, verfügen die verschiedenen Bereiche über eine Art von

Informationsverwalter, der selbstständig Daten aus übergeordneten Ebenen entgegennehmen und bearbeiten kann, bevor diese in Materialflussdaten umgewandelt werden. Dem gleichen Prinzip entsprechend soll er den übergeordneten Ebenen Rückmeldungen geben, die aus den Materialbewegungen entstanden sind.

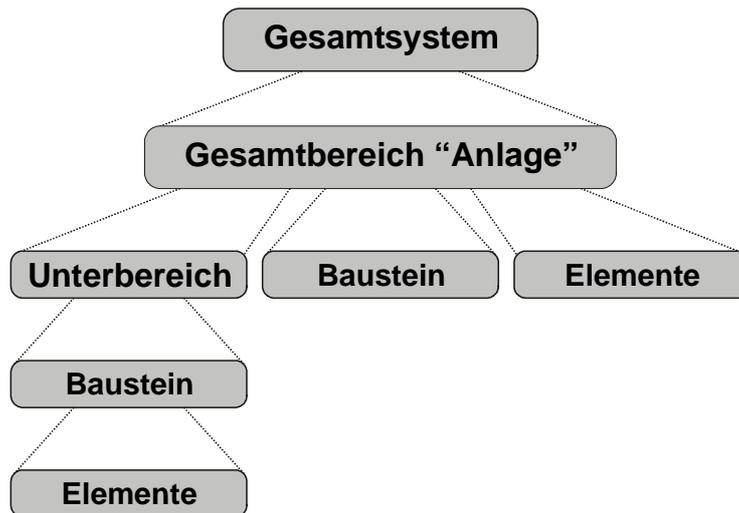


Abbildung 28: Struktur des Gesamtmodells

### 5.3 Abbildung des Systems „Abfüllanlage“

Das Definieren des Systems und seiner Grenzen bereitet bei der Abbildung einer Abfüllanlage keine großen Schwierigkeiten. Zum einen sind solche Anlagen räumlich begrenzt und zum anderen bilden sie eine kompakte Einheit. Sie besitzen in der Regel zwei Schnittstellen zu ihrer Umwelt. Dort können beispielweise beladene Paletten abgegeben und aufgenommen werden. Die beiden Schnittstellen werden als Quelle und Senke bezeichnet. An der Quelle wird das benötigte Material, d.h. die Paletten oder Behälter, generiert und an der Senke verlässt dieses Material die Anlage nach Beendigung aller Arbeitsfolgen. Im Materialflussdiagramm einer Einweg-Abfüllanlage (siehe *Abbildung 4*) entfällt die Quelle, da das Material innerhalb einer solchen Abfüllanlage hergestellt wird. Daraus resultiert, dass das System aus dem Bereich „Abfüllanlage“ und mindestens einem Element „Senke“ besteht. Die Abbildungsweise der beiden Elemente, Senke und Quelle, soll in einem späteren Abschnitt erfolgen.

Die bereits erwähnten Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Bestandteilen einer Abfüllanlage haben sich als zu komplex erwiesen, um sie in einer einzigen mathematischen Funktion zusammenfassen zu können. Daher kann das System „Abfüllanlage“ in seiner Gesamtheit nicht als Blackbox abgebildet werden. Außerdem soll die Möglichkeit offen bleiben, die Simulationsergebnisse der verschiedenen Komponenten einzeln auswerten zu können. Dieses System übernimmt dann die Rolle eines Informationsverwalters und steht an der obersten Hierarchieebene der Modellstruktur. Es beinhaltet den Bereich „Abfüllanlage“, der physisch aus mehreren Materialflusselementen oder Teilbereichen aufgebaut und miteinander durch Material und Informationen verknüpft ist.

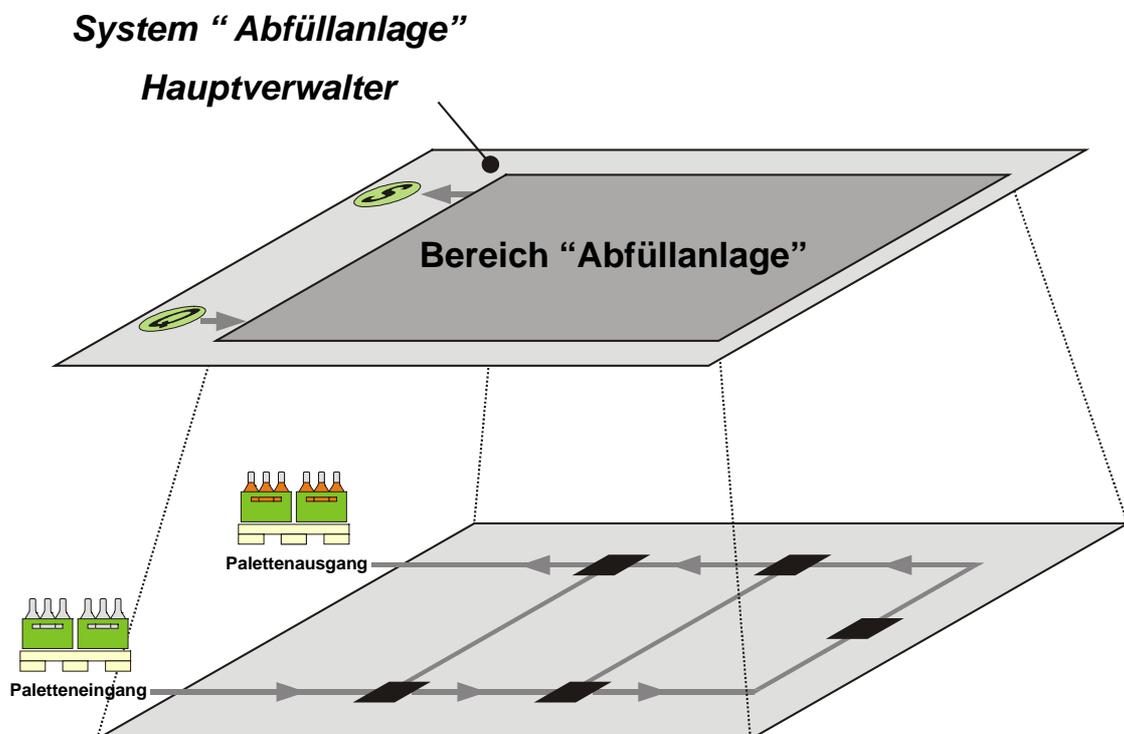


Abbildung 29: System „Abfüllanlage“

In dem System „Abfüllanlage“ werden verschiedene Grunddaten hinterlegt, die die untergliederten Teilsysteme im Verlauf der Simulationläufe benötigen. Hier werden alle Materialien verwaltet, die in der Anlage bearbeitet und transportiert werden. Zur Abbildung werden sie in zwei Klassen unterteilt:

- Das Produkt: Namentliche Definition des herzustellenden Produkts. In jeder Anlage existiert ein Haupt- und mehrere Nebenprodukte.

- Der Behälter: Bewegliche Einheit, mit denen die Produkte im Modell transportiert und bearbeitet werden können.

Neben der Materialspezifikation soll auch in Anlehnung an dem Abschnitt 2.2 ein Materialflussdiagramm definiert werden. Dieses beinhaltet alle Prozessfolgen, die das Produkt bzw. die Behälter durchlaufen müssen. Wie bei der oben vorgenommenen Definition der Produkte wird hier zwischen Haupt- und Nebenarbeitsplan unterschieden. Der erst genannte Plan beinhaltet lediglich die Arbeitsreihenfolge des Hauptprodukts und der zweite die der Nebenprodukte.

Zum Beispiel wird dem System eine Palette mit 50 Kästen à 20 Flaschen, die mit Wasser gefüllt werden sollen, übergeben. Es werden für die Modellierung entsprechend der oben genannten Klassen das Hauptprodukt „Wasser“ und die beiden Nebenprodukte „Leerpalette“ und „Leerkasten“ definiert. Weiterhin werden drei Behälter mit verschiedenen Kapazitäten, „Palette“, „Kasten“ und „Flasche“, spezifiziert. Am Entpalettierer wird eine „Palette“ mit 1000 „Wasser“ transportiert. Hier entstehen die Behälter „Kasten“, die jeweils eine Kapazität von 20 „Wasser“ haben. Nach Beendigung dieses Arbeitsschritts verlässt der Behälter „Palette“ mit dem Nebenprodukt „Leerpalette“ das Aggregat.

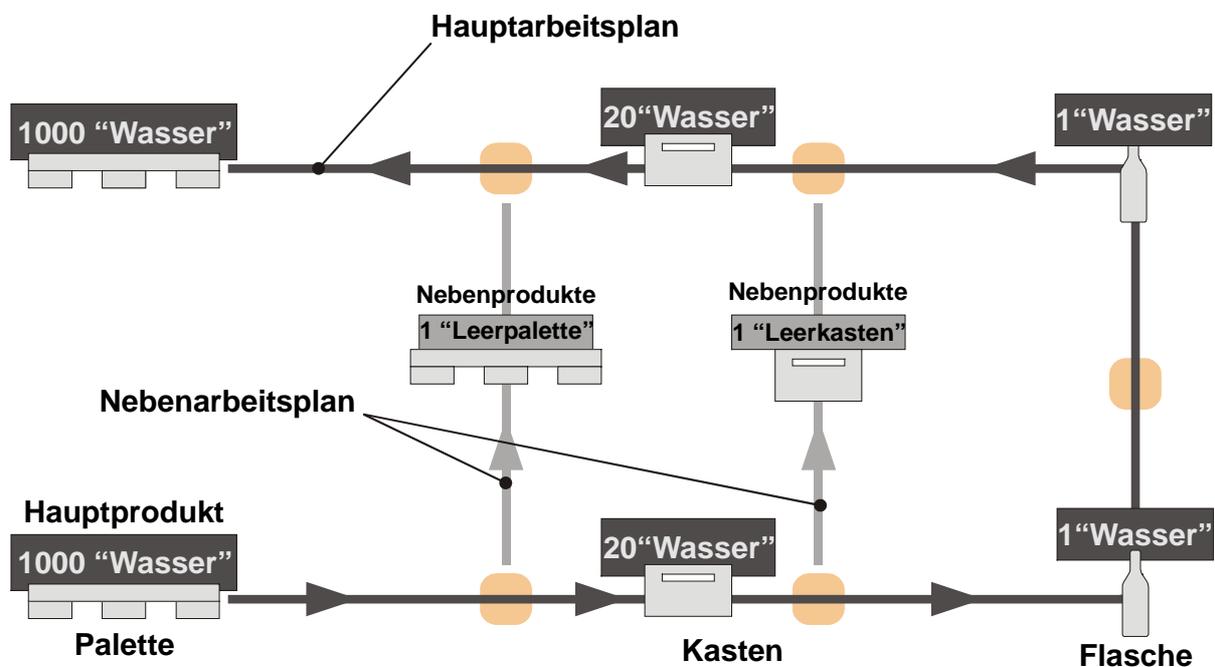


Abbildung 30: Produkt- und Behälterablauf

Zusätzlich zu dem Material und den Arbeitsfolgen wird ein Produktionsauftrag benötigt, in dem die herzustellende Menge an Produkten festgelegt ist. Die Aufgabe des „Verwalters“ besteht nun darin, diesen Auftrag zu übernehmen und in Informationen umzuwandeln. Diese werden nach vordefinierten Strategien zu den untergeordneten Ebenen weitergeleitet. Da die Informationen den Materialfluss steuern, werden sie deshalb weitergegeben, bis sie zu einer Hierarchieebene gelangen, die aus Materialflusselementen besteht.

## 5.4 Klassifizierung der Aggregate

Da der Ablauf des Materialflusses innerhalb einer Abfüllanlage einer Fließfertigung entspricht, durchlaufen alle Behälter sequentiell jedes Aggregat in einer starr festgelegten Reihenfolge. Wird der interne physische Aufbau der im vorherigen Kapitel beschriebenen Aggregate außer Acht gelassen und sie als geschlossene Einheiten betrachtet, so weisen sie untereinander große Ähnlichkeiten auf. Obwohl die Aufgabe des Füllers von der des Abschraubers sich unterscheidet, haben sie im Sinne der Simulationsabbildung die gleiche Funktionalität. Sie werden mit Behälter bzw. Gebinde bestückt, die dort eine gewisse Dauer verweilen, bis sie zum nächsten Aggregat transportiert werden. Die Komponenten Entpalettierer und Auspacker verhalten sich zueinander ähnlich, aber verschieden zu Füller oder Abschrauber. Hier entstehen während des Bearbeitungsprozesses aus den beladenen Paletten bzw. Gebinde zwei neue Behälterarten. Zum Beispiel werden am Entpalettierer aus den Vollpaletten Gebinde und Leerpaletten abgezogen.

Die verschiedenen Aggregate können im Hinblick auf den Ablauf des Materialflusses in vier Kategorien unterteilt werden:

- Einzelstation
- Montagestation
- Demontagestation
- Sortierstation

Die letzte kann als Kombination von Einzel- und Demontagestation angesehen werden. Die angelieferten und die entnommenen Behälter sind in ihrer Bezeichnung und Funktion gleich, haben aber nach Verlassen des Aggregats zwei verschiedene Produkte und somit unterschiedliche Prozessreihenfolgen. In solchen Aggregaten werden Qualitätskontrollen durchgeführt und daher wird ein Anteil der Paletten, Gebinde oder Behälter aus der Abfüllanlage endgültig entnommen. So werden beispielsweise an der Kastenerkennungsmaschine Gebinde überprüft. Die fremden Kästen müssen dann entfernt werden.

In der nachfolgenden Tabelle ist die oben beschriebene Klassifizierung mit Beispielen auf die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Aggregate veranschaulicht.

Tabelle 4: Klassifizierung der Aggregate

	Bearbeitungsstation	Montagestation
Symbole	<p>Vollpalette → [Symbol] → Vollpalette</p> <p>Kasten → [Symbol] → Kasten</p> <p>Flaschen → [Symbol] → Flaschen</p>	<p>Leerpalette + Voller Kasten → [Symbol] → Vollpalette</p> <p>Flaschen + Leerer Kasten → [Symbol] → Voller Kasten</p>
Beispiele	<p>Entbinder</p> <p>Kastenreinigung</p> <p>Füller</p>	<p>Bepalettierer</p> <p>Einpacker</p>

	Demontagestation	Sortierstation
Symbole	<p>Vollpalette → Leerpalette, Kasten</p> <p>Kasten → Leerer Kasten, Flaschen</p>	<p>Leerpalette → Defekte Palette, Leerpalette</p> <p>Kasten → Falscher Kasten, Kasten</p> <p>Flaschen → Falsche Flaschen, Flaschen</p>
Beispiele	Entpalettierer Auspacker	Inspektionsmaschine Kastenerkennung

## 5.5 Vorgehensweise bei der Abbildung der Aggregate

Mehrere Gründe sprechen dafür, verschiedene Aggregate als Blackbox anzusehen. Die vorangegangene Klassifizierung hat deutlich gemacht, dass beispielsweise der Füller und der Entbinder unterschiedliche Aufgaben haben, aber den gleichen Aufgabeninhalt. Alle angelieferten Behälter verweilen in einem Aggregat eine bestimmte Zeitdauer, bevor sie weiter transportiert werden. Daher ist es nicht erforderlich, die Zusammensetzungen der einzelnen Aggregate abzubilden. Außerdem bestehen die Aggregate aus mehreren Einzelkomponenten, deren Abbildungen sich als sehr zeitaufwendig und im Hinblick auf die Zielsetzung überflüssig erweisen. So ist zum Beispiel ausreichend, die Anzahl der tatsächlich abgefüllten Flaschen zu erfassen, um den Wirkungsgrad eines Aggregat ermitteln zu können. Weiterhin ist die von einem Aggregat zu erfüllenden Aufgabe aus Sicht der

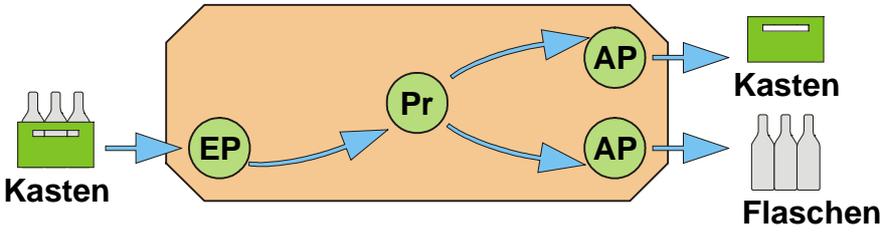
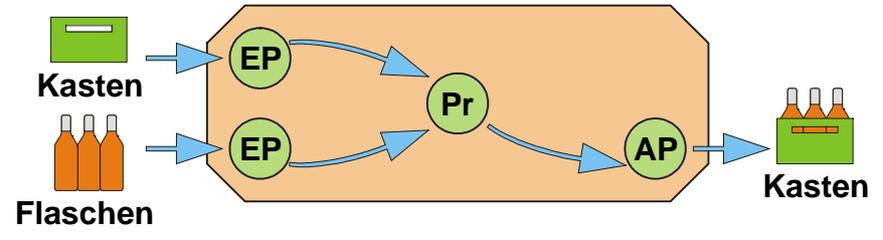
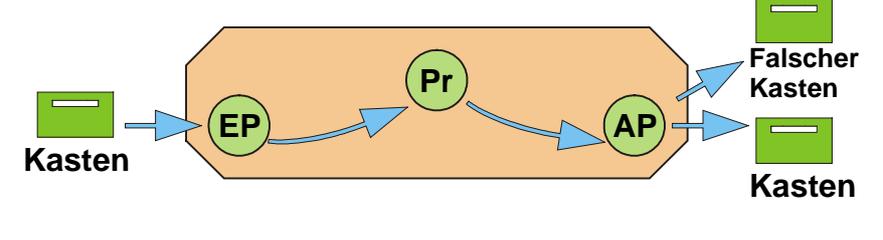
Prozesstechnik, nicht sehr anspruchsvoll und kann daher als mathematische Formel abgebildet werden. Die Einstellausbringung eines Aggregats macht deutlich, wie lange die Verweildauer der Produkte sein soll.

Die Aggregate, die als Untersysteme bzw. Teilmodelle im Gesamtsystem gelten, werden nun als Blackbox abgebildet. Diese Modelle bestehen aus mehreren Schnittstellen und einem Bearbeitungsprozess. Die Schnittstellen sorgen dafür, dass die einzelnen Aggregate miteinander verknüpft werden und untereinander Materialfluss- und Informationsflussdaten austauschen können. Sie dienen als externe Verbindungspunkte und werden hier als Puffer abgebildet. Sie sind dafür zuständig, dass Behälter aufgenommen und nach Ablauf des Prozesses weitergegeben werden. Die Aufgabe des Prozesses besteht darin, die Logik festzulegen, nach der die eingegangenen Behälter bearbeitet werden. Handelt es sich um eine Bearbeitungs- oder Sortierstation, werden die gleichen Behälter nach einem zeitlichen Verzug im Prozess vom Eingangspuffer in den Ausgangspuffer umgelagert. Im Fall einer Demontage- und Montagestation findet ein Umfüllvorgang des Inhalts vom eingegangenen Behälter in neue Behälter statt.

Die in der Klassifizierung entstandene Gliederung kann bei der Abbildung der Aggregate beibehalten werden. Die Unterschiede der Modelle liegen in der Anzahl der Verbindungspuffer und in der Art des Prozesses. In der folgenden Tabelle werden die verschiedenen Abbildungen und deren Unterschiede veranschaulicht.

Tabelle 5: Abbildung der Aggregate

<p><b>Bearbeitungsstation</b></p> <p style="text-align: center;">bzw.</p> <p><b>Durchlaufstation</b></p>	<div style="text-align: center;"> <p>The diagram shows a central orange rounded rectangle labeled 'Blackbox-Aggregat'. Inside it are three green circles: 'EP' (Eingangspuffer) on the left, 'Pr' (Prozess) in the middle, and 'AP' (Ausgangspuffer) on the right. Blue arrows show the flow from 'EP' to 'Pr' and from 'Pr' to 'AP'. Outside the rectangle, two green boxes labeled 'Kasten' are shown. A blue arrow points from the left 'Kasten' to 'EP', and another blue arrow points from 'AP' to the right 'Kasten'. Labels 'Blackbox-Aggregat' and 'Element' with leader lines point to the rectangle and the 'Pr' circle respectively.</p> </div> <p><b>Prozessbeschreibung:</b></p> <p>Das am Eingangspuffer angelieferte Material wird vom Prozess übernommen und dem Ausgangspuffer übergeben.</p>
--	--

<p><b>Demontagestation</b></p> <p>bzw.</p> <p><b>Vereinzelungsstation</b></p>	 <p><b>Prozessbeschreibung:</b></p> <p>Das am Eingangspuffer angelieferte Material wird vom Prozess übernommen, auseinander getrennt und den beiden Ausgangspuffer übergeben.</p>
<p><b>Montagestation</b></p> <p>Bzw.</p> <p><b>Zusammenführungsstation</b></p>	 <p><b>Prozessbeschreibung:</b></p> <p>Das am Eingangspuffer angelieferte Material wird vom Prozess übernommen, zusammengefasst und dem Ausgangspuffer übergeben.</p>
<p><b>Sortierstation</b></p>	 <p><b>Prozessbeschreibung:</b></p> <p>Das am Eingangspuffer angelieferte Material wird vom Prozess übernommen und dem Ausgangspuffer übergeben. Danach kann das Material auf unterschiedlichen Wegen transportiert werden.</p>

### 5.5.1 Kennzeichnung der Elemente der Aggregate

Um ihr dynamisches Verhalten simulieren zu können, werden die benötigten Grundelemente, Prozess und Puffer, mit Informationen und Daten vervollständigt. Die Aufnahmekapazitäten des Puffers und des Prozesses sowie eine eindeutige Zuordnung der Behälter muss festgelegt werden.

In dem Prozess wird bei der Bearbeitungslogik des Aggregats zwischen einem Durchlauf-, einem Montage- und einem Demontageprozess unterschieden. Wie im Fall einer Reinigungsmaschine soll beim Einstellen des Prozesses die Möglichkeit geboten werden, die Anzahl an Behälter festzulegen, die gleichzeitig bearbeitet werden können. Weiterhin sollen hier die Eingangs- und Ausgangspuffer der Haupt- und Nebenprodukte spezifiziert werden, damit der Prozess erkennen kann, aus welchem Puffer die Behälter zu entnehmen sind und in welchen Puffer diese zurückgegeben werden müssen.

Die folgende Abbildung fasst die notwendigen Daten für einen logischen Aufbau der Modellelemente zusammen.

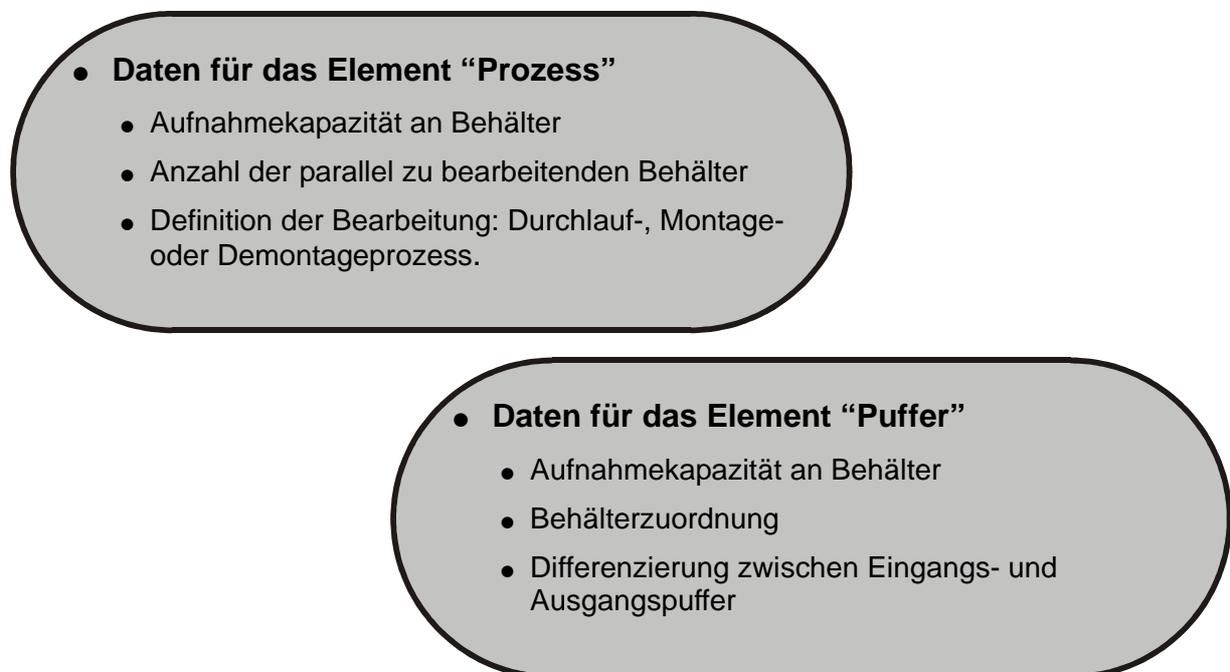


Abbildung 31: Spezifikationsdaten für die Elemente Prozess und Puffer

### 5.5.2 Kennzeichnung eines Aggregats

Nachdem der physische Aufbau und die Aufstellung der internen Ablauflogik abgeschlossen ist, fehlt noch die Abbildung des zeitlichen Verlaufs. Da bisher ein Aggregat als Blackbox abgebildet wurde, ist hier eine zu den Grundelementen übergeordnete Informationsebene notwendig, die diesen Baustein mit Eingangsdaten versorgt und Rückmeldungen entgegennimmt. An erster Stelle soll der Prozess spezifiziert und eindeutig bezeichnet werden. In Anlehnung zur Aggregatsklassifikation und dem Arbeitsplan muss festgelegt werden, welche Behälter in das entsprechende Aggregat eingehen und welche nach Beendigung des Prozesses es verlassen. Da die Möglichkeit besteht, dass ein Aggregat mehrere Arten von Behälter bearbeiten kann, wie z.B. PET-Flaschen oder Glasflaschen, muss es auf verschiedene Leistungen eingestellt werden. Diese Eigenschaften werden bei der Spezifikation des Prozesses dadurch miteinbezogen, indem Prozessfähigkeiten des Aggregates definiert werden. Um das reale zeitliche Verhalten nachzuahmen, werden hier nicht nur die Einstelleleistungen eingetragen, sondern auch die maschinenbedingten Störzeiten. Weiterhin können dem Aggregat Rüstzustände oder Betriebsschichtenzustände (1-, 2-, oder 3-Schichtbetrieb) zugeordnet werden.

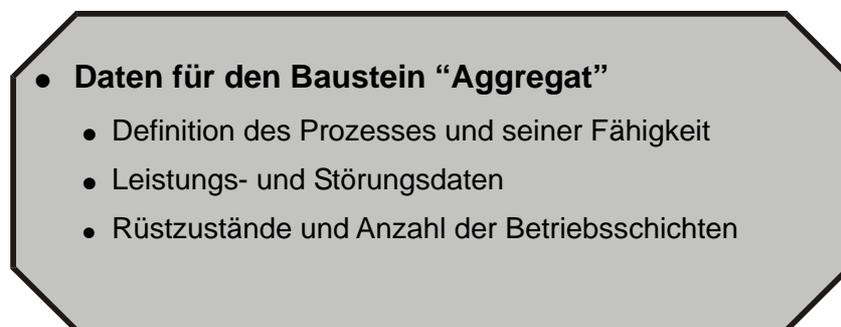
- 
- **Daten für den Baustein „Aggregat“**
    - Definition des Prozesses und seiner Fähigkeit
    - Leistungs- und Störungsdaten
    - Rüstzustände und Anzahl der Betriebsschichten

Abbildung 32: Spezifikationsdaten für den Baustein „Aggregat“

### 5.5.3 Hierarchische Untergliederung im Gesamtsystem

Nach den Erläuterungen des Abschnitts 3.1 ist nun die Grenze eines Aggregates und seiner Schnittstellen definiert. Die Aufbau- sowie die Ablaufstruktur wurden beschrieben und festgelegt. Die oben abgebildeten Aggregate können daher direkt in dem Bereich „Abfüllanlage“ eingesetzt und durch Fördererlemente miteinander verknüpft werden. Der Verwalter dieses übergeordneten Bereichs steuert diese

Komponenten und stellt die informationstechnischen Verbindungen her. Dies hat den Nachteil, dass die notwendigen Informationen auf einer einzigen Ebene verarbeitet werden. Um die Menge und die Vielfalt zu reduzieren und zu strukturieren, sollte ein Aggregat selbst einen Bereich bilden. Diese weitere Detaillierung der Hierarchie führt dazu, dass Aggregate in Bezug auf den Informationsfluss voneinander entkoppelt werden können. Außerdem verfügen sie über einen eigenen Verwalter, der sie als unabhängige Bereiche agieren lässt. In der folgenden Darstellung wird nun die Untergliederung der Aggregate in der gesamten hierarchischen Struktur des Systems „Abfüllanlage“ veranschaulicht.

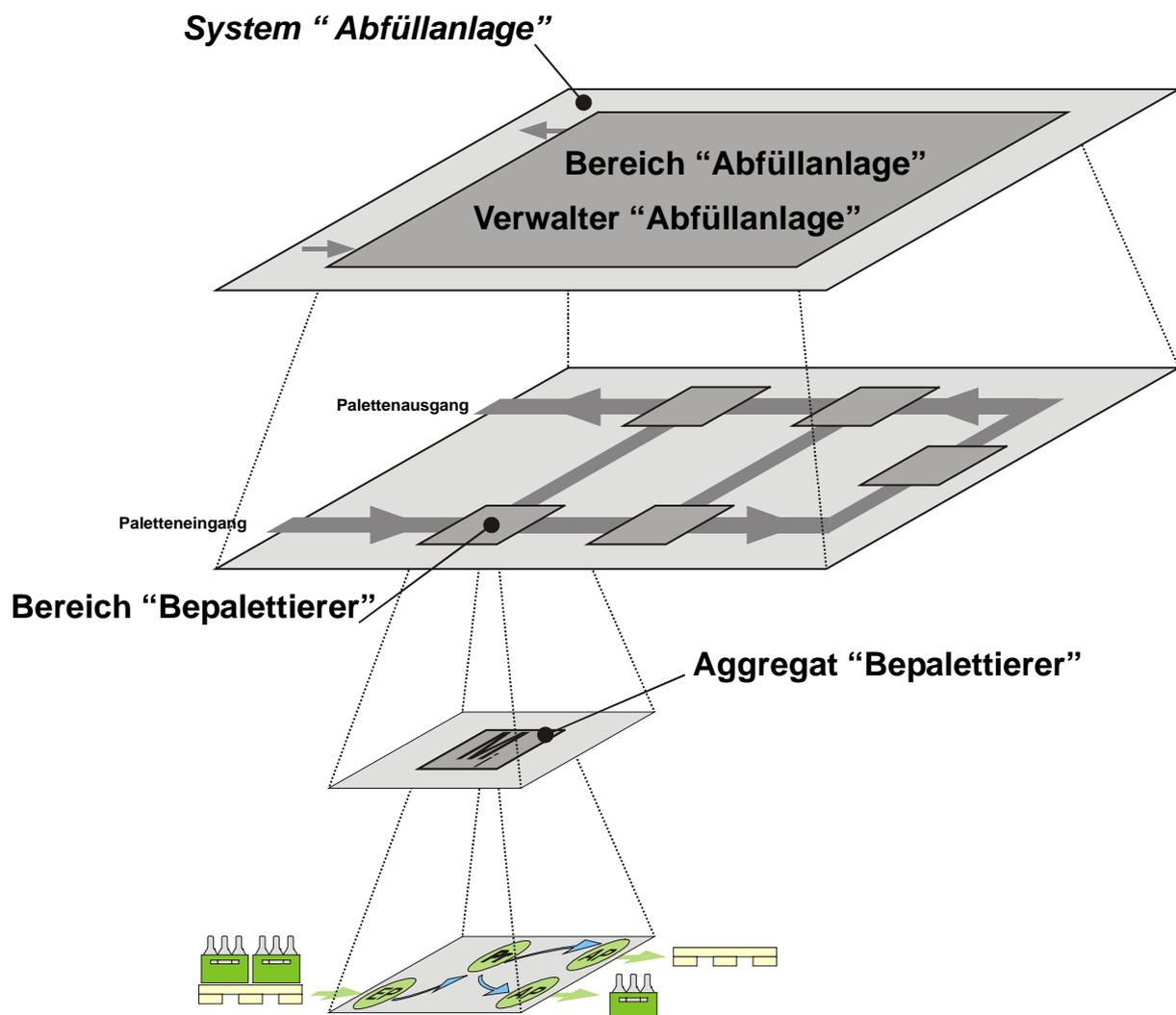


Abbildung 33: Untergliederung der Aggregate im Gesamtsystem

## 5.6 Abbildung der fördertechnischen Anbindungen

Im Kapitel 3 „Stand der Technik der Getränke-Abfüllanlagen“ wurde auf die verschiedenen Transportmöglichkeiten in einer Abfüllanlage eingegangen. Bei einer konventionellen Anlage zum Abfüllen von Mehrwegbehältern werden drei verschiedenen Objekte innerbetrieblich befördert: Paletten, Kästen und Flaschen. Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmekapazitäten dieser Behälter verändert sich sehr stark der Durchsatz der Förderstrecken nach den Demontage- und Montagestationen.

Wird zum Beispiel jede Minute am Paletteneingang eine Palette mit einer Kapazität von 50 Kästen à 20 Flaschen abgegeben, so müssen nach dem Entpalettierer 20 Kästen/min zum Auspacker und 1000 Flaschen/min zum Füller transportiert werden.

Die Abbildung des Transports von Paletten und Kästen bereitet keine großen Schwierigkeiten und kann mit einfachen Methoden realisiert werden. Dagegen kann das Befördern von Flaschen aufgrund der großen Transportmengen zu komplexen Abbildungsmodellen führen. Die hohe Anzahl an beweglichen Elementen bedeutet für die Simulation eine Vielzahl an Ereignissen, die überwacht und ausgeführt werden müssen. Dies kann zum einem zu einer Beeinträchtigung der Simulationsgeschwindigkeit und zum anderen zur einer Vergrößerung der Verwaltungstätigkeiten und EDV-Speicherung der Ergebnisdaten führen. Daher wurden verschiedene Konzepte durchdacht und auf ihre Umsetzung überprüft, um eine einheitliche Lösung zu finden und um den Abbildungsaufwand dieser komplexen Transporttechniken zu minimieren. Dabei soll die Benutzerfreundlichkeit und die Anforderung an ein schnelles Verständnis der Simulation ebenfalls berücksichtigt werden.

### 5.6.1 Abbildung der Transportverbindung im Trockenbereich

Im Modell besteht die Hauptaufgabe eines Transporteurs darin, die Schnittstellen der Aggregate miteinander zu verbinden. In der Regel entnimmt eine Förderstrecke aus dem Ausgangspuffer die Behälter und gibt sie nach einer bestimmten Verzögerung am Eingangspuffer des nachfolgenden Aggregates wieder ab. Dieses Verhalten lässt sich mit dem eines Puffers vergleichen, der eine maximale Anzahl hintereinander gelegenen Stellplätze hat. In einer Vorwärtsbewegung wechseln die Behälter nach

einer konstanten Verweildauer ihre Position. Sobald ein Behälter den letzten Stellplatz erreicht hat, kann eine Übergabe an das Aggregat stattfinden. Diese Zeitdauer lässt sich aus der Länge, der Geschwindigkeit und der maximalen Kapazität der Transportstrecke ermitteln.

Unter dem Begriff „Kapazität einer Förderstrecke“ wird die Anzahl an Gütern verstanden, die gleichzeitig auf dieser Strecke sein können [VDI-3978] und wird wiederum aus der Förderlänge und der Abmessungen des Behälters berechnet. Falls in einem Aggregat eine Störung auftritt, übernimmt auf diese Weise der Transporteur nicht nur die Funktion des Förderns sondern auch des Pufferns. Diese Erklärung entspricht aber nur einem ersten gedanklichen Modell. In einer weiteren Überlegung sollen diese beiden Funktionen gesteuert werden können.

### 5.6.1.1 Aufbau einer Transportverbindung

Zuerst wird nur die erst genannte Funktion betrachtet. Eine reale Transportstrecke wird aus mehreren Fördereinheiten gebaut, die unterschiedliche Geschwindigkeiten haben können. Die einfachste Abbildungsmöglichkeit ist, diese Einheiten zu einem einzigen Transportsystem zusammenzufassen, dessen Gesamtgeschwindigkeit und Gesamtkapazität sich aus dem Mittelwert bzw. aus der Summe der einzelnen Geschwindigkeiten und Kapazitäten ergeben.

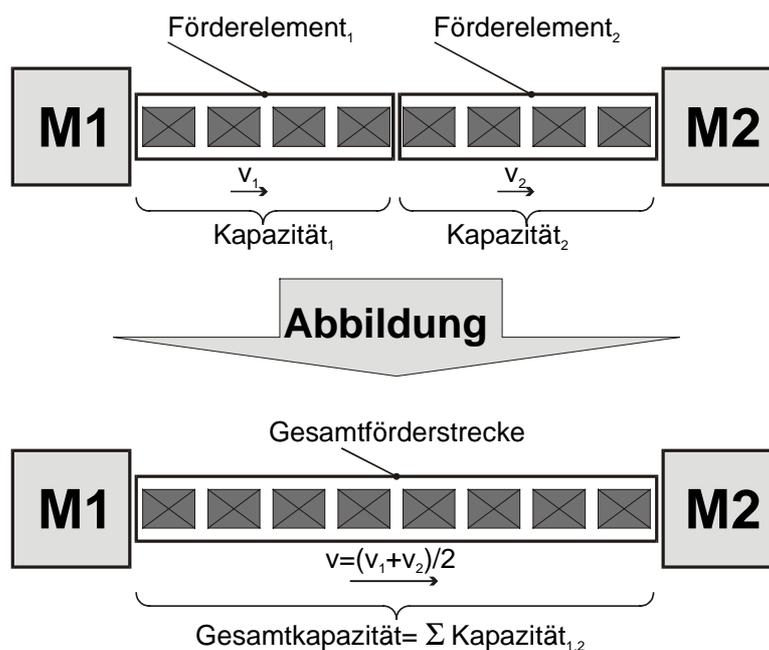


Abbildung 34: Eine Abbildungsmöglichkeit einer Transportstrecke

Auf diese Weise bleibt die reale gesamte Transportzeit vom Eingang der Förderstrecke bis zu ihrem Ausgang im Modell erhalten. Die richtige Abbildung des dynamischen Verhaltens des gesamten Transportsystems ist somit gesichert.

### 5.6.1.2 Kenngrößen eines Transportsystems und dessen Elemente

In der Regel ist jedoch die tatsächliche Aufnahmekapazität einer Förderstrecke zwischen zwei Aggregaten kleiner als diejenige, die aus den Dimensionen des Transporteurs und der Behälter ermittelt wird. Als Beispiel kann die Abbildung 24 genommen werden. Um ein Anhalten des Aggregats zu verhindern, wird die Gesamtlänge der Transportstrecke nicht komplett zum Puffern der Behälter ausgeschöpft. Dieses Verhalten lässt sich dadurch abbilden, dass das Transportsystem die übergeordnete Funktion des Steuerns übernimmt. Wie in der Realität besteht es aus mehreren Elementen, die einzeln durch ihre eigene Kapazität und Geschwindigkeit spezifiziert werden können. Weiterhin kann die Staufähigkeit der Förderstrecke auf die einzelnen Elemente übertragen werden. Neben der Kapazität der Einheiten verfügt das Transportsystem über eine eigene Kapazität, die die tatsächlich maximale Aufnahmekapazität festlegt. Außerdem übernimmt das Transportsystem die Aufgabe, das gesamte Störungsverhalten zu regeln. Eine derartige Abbildung erhöht somit die Genauigkeit des Transportsystems sowie die Detaillierungstiefe. In der folgenden Abbildung ist die allgemeine Struktur des Transportsystems und der dazugehörigen Parameter dargestellt.

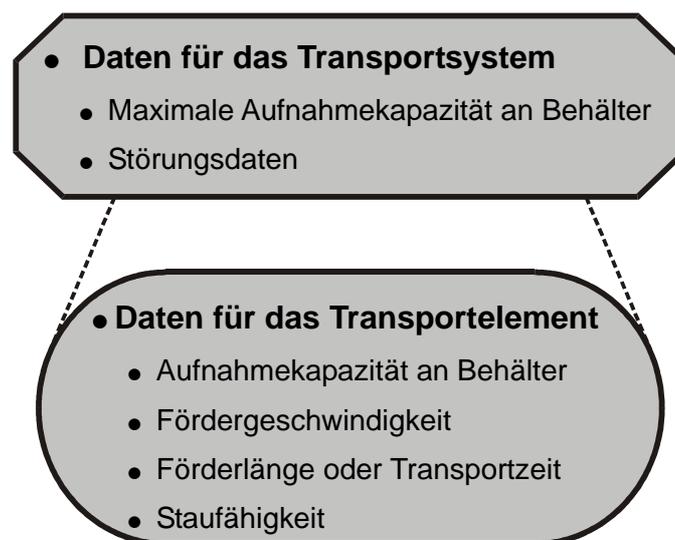


Abbildung 35: Struktur und Spezifikationsdaten für den Transport

### 5.6.1.3 Hierarchische Gliederung eines Transportsystems im Gesamtsystem

Offen bleibt, welcher Hierarchieebene der Modellstruktur das Transportsystem zugefügt wird. Um die Transportaufträge durchführen zu können, wird hier ein dem Transportsystem übergeordneter Verwalter benötigt. Zwei Möglichkeiten stehen zu Verfügung:

- Das Transportsystem verfügt über einen eigenen Bereich.
- Das Transportsystem gehört zu einem anderen Bereich, z.B. dem Bereich „Abfüllanlage“.

Wird das Transportsystem wie die Aggregate in einen eigenen Bereich eingebettet, so wird diese Anforderung erfüllt. Dabei wird die Hierarchie aufgrund der weiteren Vertiefung benachteiligt. Die Modellstruktur wird somit sehr detailliert und schwer überschaubar. Ausreichend ist, wenn das Transportsystem direkt in den Bereich „Abfüllanlage“ integriert wird und dessen Verwalter die Transportaufträge zwischen den Aggregaten steuert.

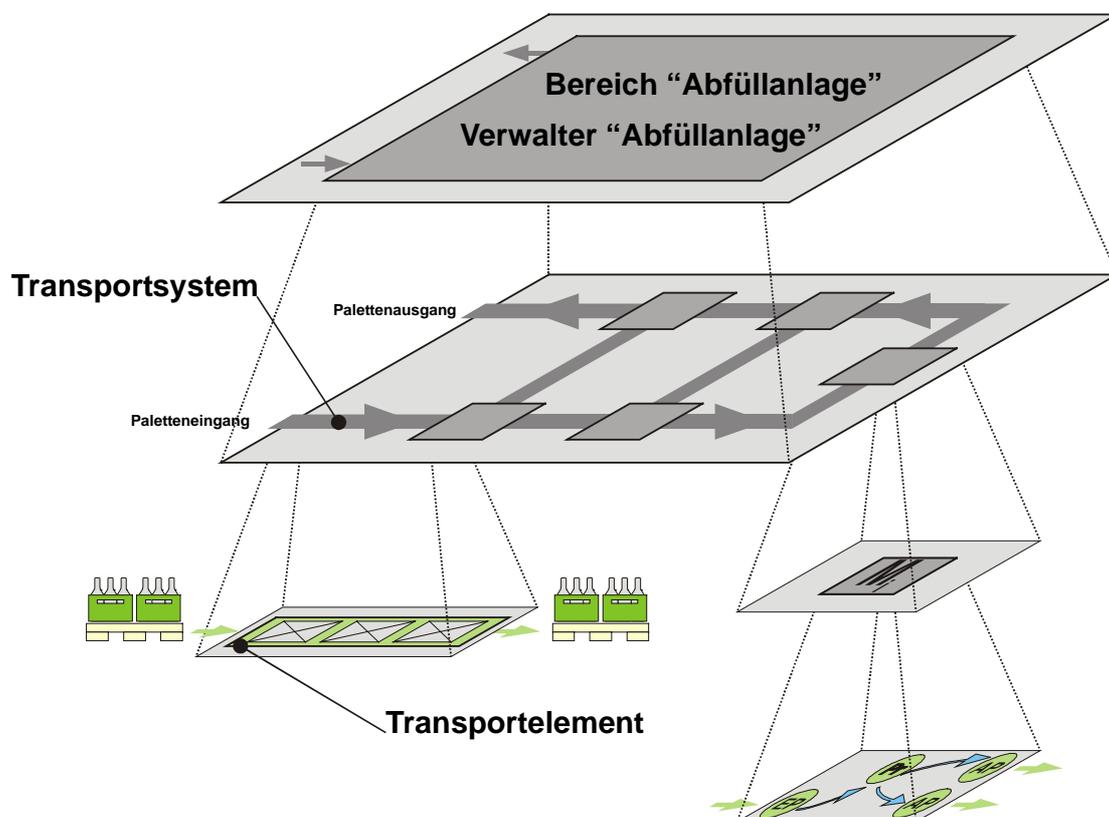


Abbildung 36: Hierarchiestruktur des Transportsystems

### 5.6.1.4 Abbildung des Regelverhaltens

Die Funktion eines Transportsystems in einer Abfüllanlage besteht nicht nur in Fördern und Puffern, sondern auch im Regeln der Aggregate. Nach den Erläuterungen im vorherigen Kapitel können in erster Linie die Regelungsstrategien in zwei Gruppen unterteilt werden: Regelung vor oder nach dem Aggregat.

Damit das Aggregat in Betrieb geht oder mit maximaler Leistung betrieben wird, müssen davor genügend Behälter aufgestaut sein. Dieser Abschnitt der Förderstrecke wird in diesem Fall als Reglerpuffer abgebildet. Er dient dazu, die Behälter zu lagern und sie nach dem Erreichen einer bestimmten Losgröße dem Aggregat zu übergeben.

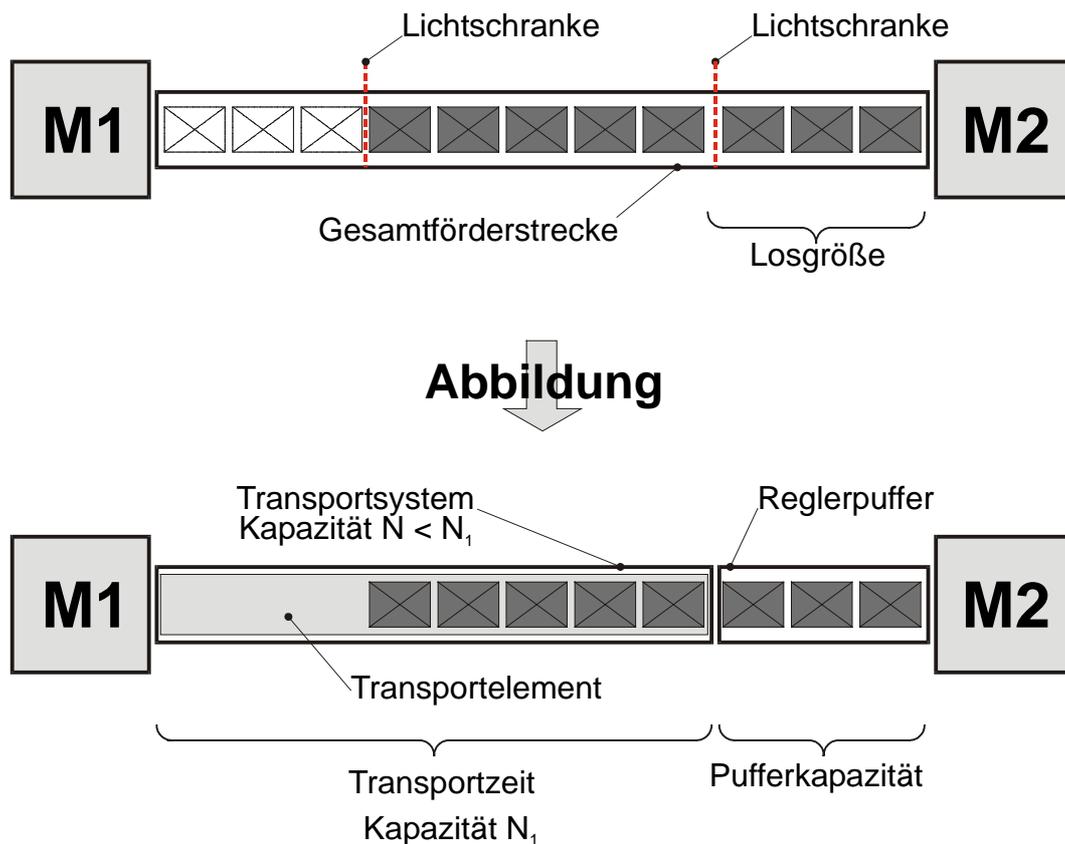


Abbildung 37: Abbildung der Regelung vor und nach dem Aggregat

Im Gegensatz zur Realität handelt es sich bei dieser Abbildung um einen stationären Puffer, in dem die Behälter ruhen. Wie es in der vorherigen, schematischen Darstellung zu sehen ist, wurde die Gesamtförderstrecke um die Pufferkapazität abgekürzt. Die Behälter werden nicht bis zum Aggregat transportiert, sondern werden nach Verlassen des Transportsystems in den Puffer umgelagert. Dort werden sie nach dem FIFO-Prinzip aufgestaut. Sobald die erforderliche Losgröße erreicht wurde, kann der erste Behälter dem Aggregat übergeben werden. Die Wartezeit gleicht der Transportzeit von der Lichtschranke bis zum Eingang des Aggregates. Diese Transportstrecke wurde nicht in allen Einzelheiten abgebildet, sondern nur ihr gesamtes dynamisches Verhalten.

Die zweite Regelungsstrategie verhindert, dass ein Rückstau sich bis zum Ausgang des Aggregates ausbreitet und es somit angehalten werden muss. Diese Regelung wurde bereits mit der Abbildung des Transporteurs realisiert, indem eine maximale Aufnahmekapazität des Transportsystems und die Staufähigkeit der Elemente festgelegt wurde.

Der hier angewendete Puffer unterscheidet sich geringfügig von dem des Aggregates. Es wird lediglich ein weiterer Parameter, die Losgröße, benötigt, um das oben beschriebene Verhalten simulieren zu können. Dieser Puffer stellt nur ein Modellelement dar und soll ähnlich der Abbildung der Aggregate oder Transportsysteme einem Baustein oder einem Bereich untergliedert werden. Um den Detaillierungsgrad und die Systemhierarchie nicht weiter zu vertiefen, wird das Element „Puffer“ direkt dem Bereich „Abfüllanlage“ zugefügt, der dann seine Steuerung übernimmt. Die nachfolgende Abbildung zeigt nun die komplette hierarchische Systemstruktur auf.

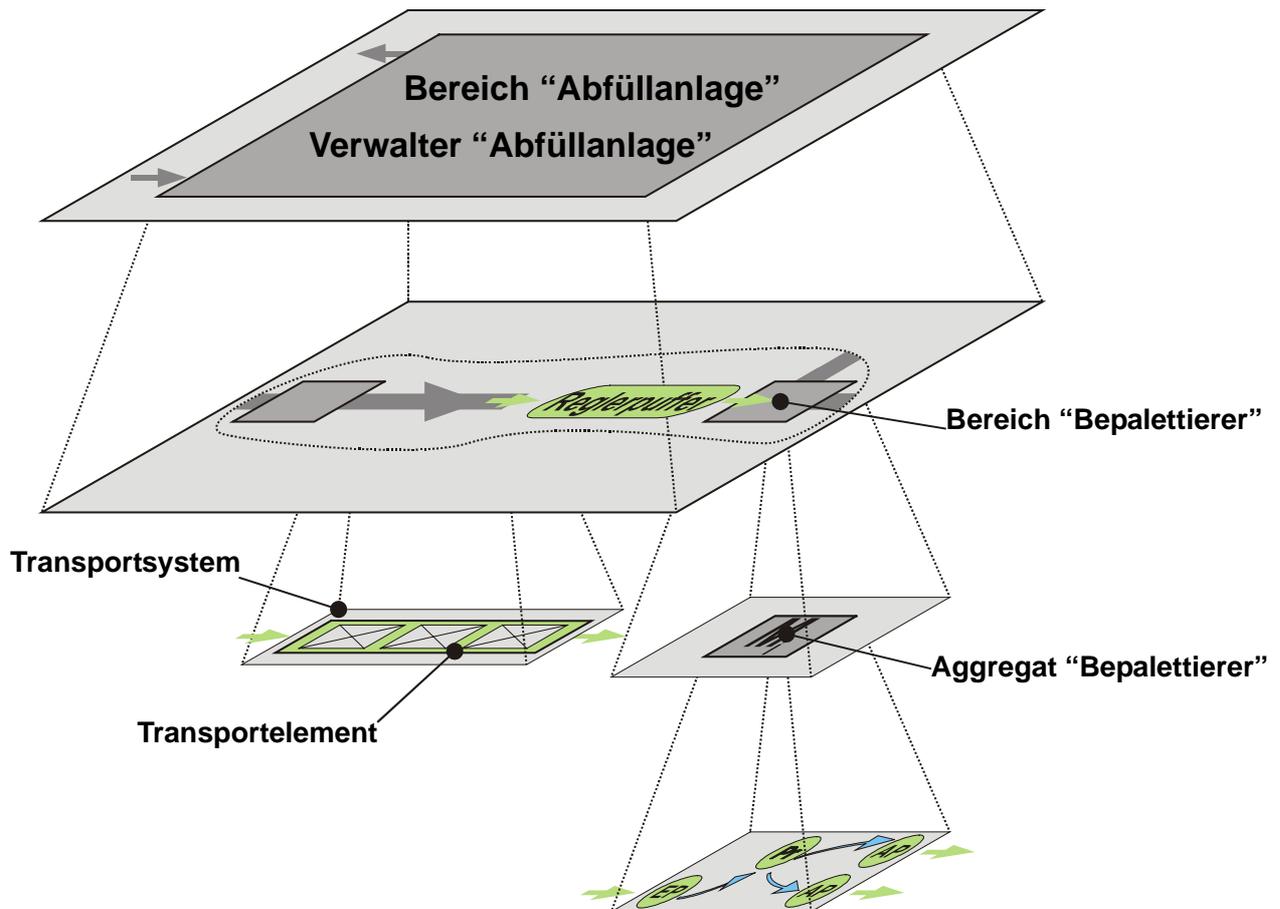


Abbildung 38: Hierarchische Struktur des gesamten Systems

### 5.6.1.5 Fazit

Neben den Aggregaten wurden nun die Transportverbindungen im Trockenbereich aufgrund der vorgenommenen Analyse abstrahiert und abgebildet. Die Verknüpfung zweier Aggregate wurde mit Hilfe eines Transportsystems realisiert, das mindestens aus einem Transportelement besteht. Die einzelne Dimensionierung dieser Transportelemente legt die Fördergeschwindigkeit bzw. die Förderdauer sowie die Kapazität auf dem Transportsystem fest. Diese Kapazität kann außerdem direkt am Transportsystem eingestellt werden, um eine Bildung eines bis zum Aggregat reichenden Rückstau zu verhindern.

Weiterhin wird dem Transportsystem ein externer Puffer zugeordnet. Dieser Puffer übernimmt die Aufgabe des Regelns. Die Paletten und die Gebinde werden nur dem Aggregat übergeben, wenn die gewünschte Menge sich davor gestaut hat.

## 5.6.2 Abbildung der Transportverbindung im Nassbereich

### 5.6.2.1 Problemstellung des Transports im Nassbereich

Die oben beschriebene Abbildung der Transportverbindungen eignet sich zur Simulation von Materialflusssystemen für Stückgüter. Durch ihre Fortbewegung lässt sich der Ablauf in klar definierten Ereignisse beschreiben, die die Zustandsänderungen der einzelnen Bausteine und Elemente bewirken. Beispielsweise kann der Ablauf einer Palette zum Zeitpunkt Null vom Paletteneingang bis zum Bepalettierer folgendermaßen beschrieben werden:

- Die Palette wird einem Transportsystem übergeben, das dadurch den Zustand „belegt“ annimmt. Nach Verstreichen der Transportzeit gelangt die Palette an ihr Zielaggregat, den Bepalettierer.

Anhand dieses einfachen Beispiel wird deutlich, dass die Menge an Ereignissen und somit die notwendige Rechenzeit von der Anzahl der beweglichen physischen und informationstechnischen Objekte abhängig ist. Um die benötigte Dauer eines Simulationslaufs nicht zu stark zu erhöhen, sollen diese Ereignisse und somit die beweglichen Objekte in ihrer Anzahl begrenzt werden. Im Nassbereich einer Abfüllanlage werden enorme Mengen an Behälter bzw. Flaschen transportiert und bearbeitet. Beispielsweise hat eine Anlage mit einer Füllleistung von 20.000 Flaschen in der Stunde die Ankunftsrate am Transportsystem nach dem Füller den Wert 5,5 Flaschen in der Sekunde.

Die Abbildung jedes einzelnen Behälters, Flasche oder Dose, als solches ist daher ungeeignet und führt zu einer starken Reduzierung der Simulationsgeschwindigkeit und zum anderen zu einer Vervielfachung der aus dem Modell gewonnenen Daten. Daher muss eine Lösung gefunden werden, um den Materialfluss in diesem Bereich auf einfacher Weise und ohne Verfälschung des realen dynamischen Verhaltens abbilden zu können. Vielversprechend ist das Zusammenfassen einer bestimmten Anzahl an Behälter, d.h. an Flaschen oder Dosen, in sogenannten Sammelbehälter, die im Modell transportiert und bearbeitet werden. Diese Lösung und ihre Wirkung auf die Abbildung der Aggregate muss weiter untersucht und analysiert werden.

### 5.6.2.2 Verwendung von Sammelbehältern bei einsträngigen Transporteure

Es stellt sich nun die Frage, ob angesichts der hohen Anzahl an beweglichen Objekten die Notwendigkeit besteht, den Ablauf jedes einzelnen Behälters oder jeder Flasche zu beobachten. Es muss überprüft werden, wie sich das statische und dynamische Verhalten beeinflussen lässt, falls mehrere Behälter simulations-technisch zu einem einzigen zusammengefasst werden. Dieser Sammelbehälter wird dann an Stelle der einzelnen Behälter zwischen den Aggregaten transportiert und dort zur Bearbeitung abgegeben. Somit verringert sich die Anzahl der auftretenden Ereignisse. Diese Abbildungsalternative soll vorerst an einem einsträngigen Transporteur verdeutlicht werden.

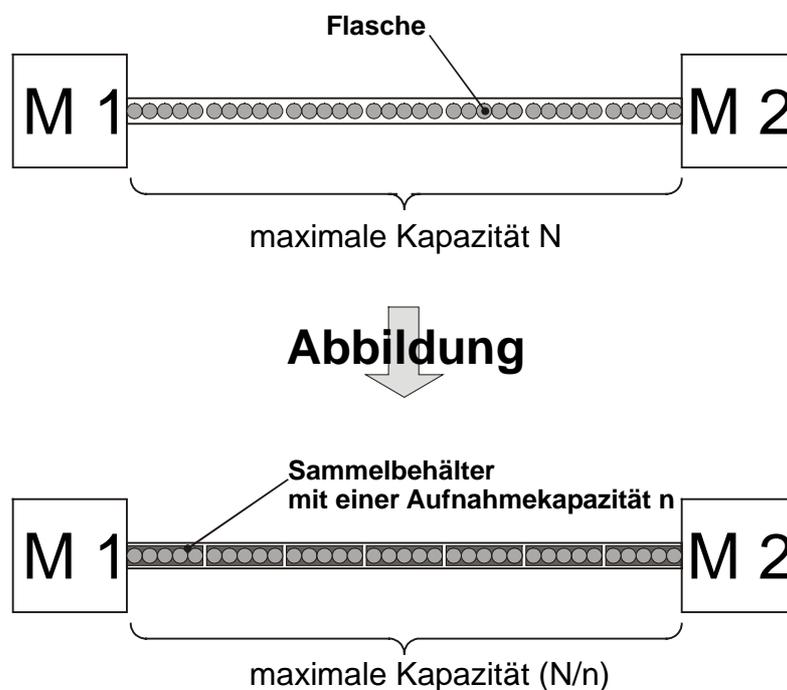


Abbildung 39: Verwendung der Sammelbehälter zur Abbildung von einsträngigen Transporteure

Aus dieser Abbildung kann entnommen werden, dass die Aufnahmekapazität der Förderstrecke dem realen Wert nicht mehr entspricht. Sie lässt sich neu mit Hilfe der Kapazität des neuen Behälters ermitteln. D.h. falls 100 Flaschen sich auf der Förderstrecke aufstauen können und der Sammelbehälter 10 Flaschen aufnehmen kann, hat dieser Transporteur eine neue Kapazität von 10 Behältern.

### 5.6.2.3 Überprüfung von Sammelbehältern für die einsträngigen Transporteure

Offen bleibt, ob der zeitliche Verlauf des Transports auf dieser Förderstrecke dem realen Verhalten gleicht. Bei einem störungsfreien Betrieb benötigt ein einzelner Behälter zum Erreichen des nachfolgenden Aggregates eine bestimmte Transportzeit. Diese Eigenschaft muss bei der beschriebenen Abbildung erhalten bleiben. Wird nun die Bewegung eines Sammelbehälters, wie es in der oberen Darstellung zu sehen ist, betrachtet, so muss dessen erstes Objekt genau die gleiche Transportzeit beanspruchen. Daraus ergibt sich, dass die Förderzeit bzw. die Fördergeschwindigkeit gegenüber der Realität unverändert bleibt. Bei dieser Abbildung der Transportvorgänge liegen die Objekte in dem Sammelbehälter nicht räumlich hintereinander, wie es in der schematischen Darstellung aufgezeigt wurde, sondern haben alle zusammen die gleiche Position auf der Förderstrecke, um eine Reduzierung der Ereignisse zu erreichen. Folglich erreichen die anderen Objekte des Sammelbehälters zum gleichen Zeitpunkt das Aggregat.

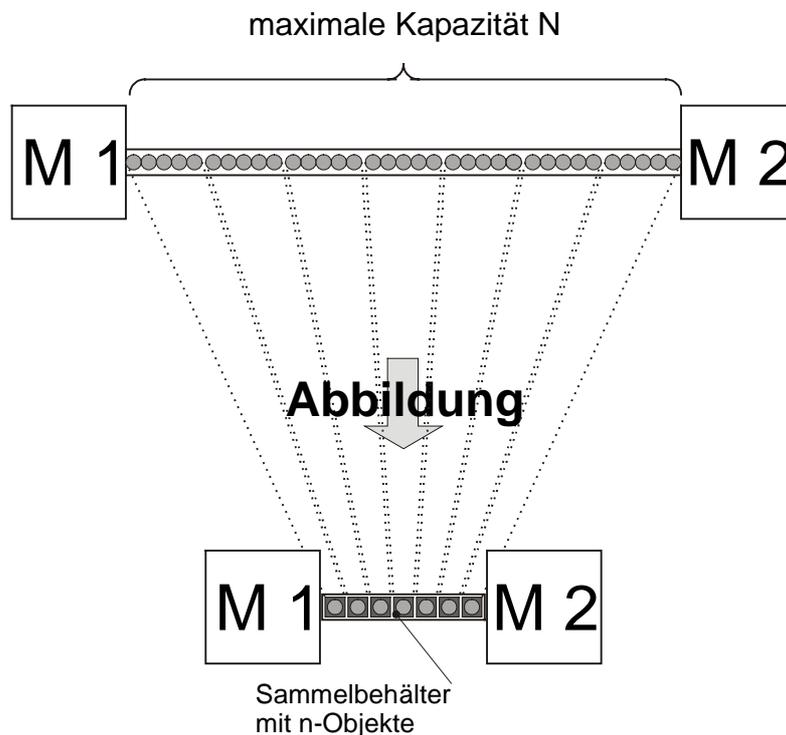


Abbildung 40: Abbildung eines einsträngigen Transporteurs

Dies steht aber im Gegensatz zu dem realen Verhalten der Förderstrecke, da die Objekte, Flaschen oder Dosen, sequentiell vom Aggregat abgenommen und abgegeben werden. In dem abgebildeten Modell wird dagegen ein Sammelbehälter mit einer bestimmten Anzahl an Objekten komplett dem Aggregat übergeben. Anhand dieser Abbildungsalternative wurde einerseits eine mögliche Reduzierung der Ereignisse und eventuell eine akzeptable Simulationsgeschwindigkeit erreicht, aber andererseits ein Realitätsverlust des Modells in Kauf genommen. Beide Tatsachen sind für einen erfolgreichen und sinnvollen Einsatz der Simulation von großer Bedeutung. Zum einen sind die Simulationsergebnisse eines falsch abgebildeten Systems unbrauchbar und zum anderen ist ein sehr langsamer Simulationslauf ineffektiv. Eine weitere Frage muss nun untersucht werden: wie sieht der zeitliche Verlauf über eine längere Simulationsdauer aus und wie groß ist die verursachte Abbildungsfehler.

Das dynamische Verhalten eines Fördersystems lässt sich mit Hilfe zweier Kennzahlen, der **Durchlaufzeit** und dem **Durchsatz**, untersuchen. Um ein Urteil über eine erfolgreiche Abbildung dieses Systems in seiner Dynamik fällen zu können, soll die Übereinstimmung der aus der Simulation gewonnenen Durchlaufzeiten und des Durchsatzes mit dem erwarteten Verlauf überprüft werden. Dies soll zuerst anhand eines exemplarischen Durchlaufzeitdiagramms für einen einsträngigen Transporteur verdeutlicht werden.

#### **A) Durchlaufzeit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Sammelbehältern**

In dem nachfolgenden Durchlaufdiagramm sind die Zeitpunkte eingetragen, an denen die Behälter das Transportsystem betreten oder verlassen. Dabei wurden drei Sammelbehälter mit unterschiedlichen Aufnahmekapazitäten verwendet. Die Transportzeit bzw. die Verweildauer bleibt aber bei allen drei gleich.

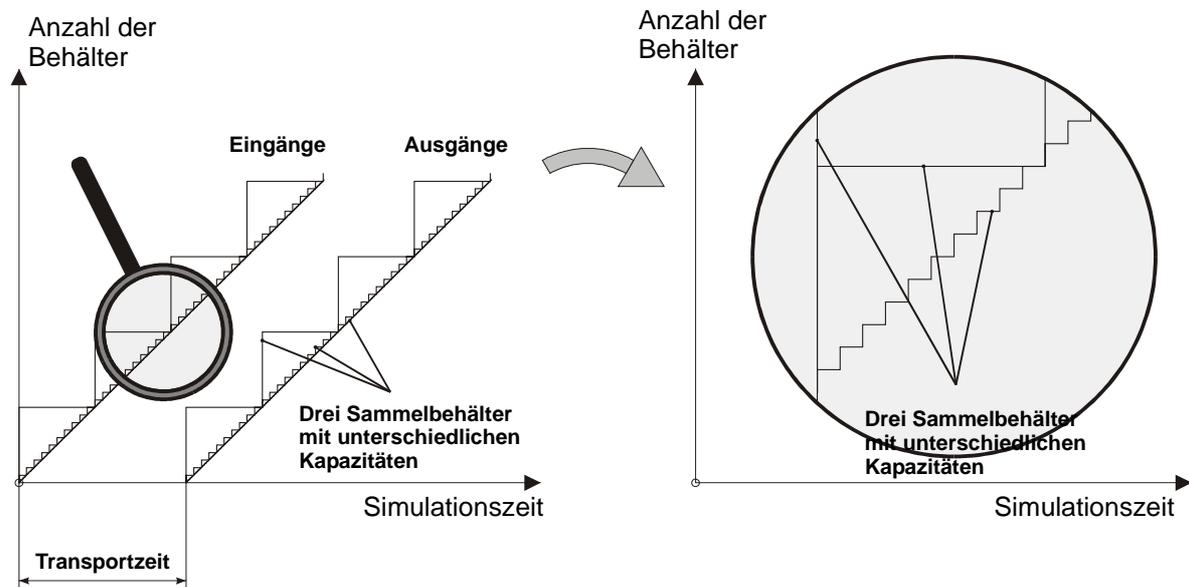


Abbildung 41: Durchlaufdiagramm bei unterschiedlichen Sammelbehältern

Es ist deutlich geworden, dass nach dieser Abbildungsmethodik nicht die Bewegung jedes einzelnen Objekts, sondern einer bestimmten Losgröße an Objekten beobachtet wird. Diese Betrachtungsweise führt dazu, dass beispielsweise 100 Objekte genauso wie 10 Objekte zusammen zum gleichen Zeitpunkt das Transportsystem betreten und verlassen. Dies soll nicht bedeuten, dass das Fördern der Objekte im Modell gegenüber der Realität etwas schneller verläuft. Sondern dieses Fördern findet früher statt, da die Transportzeit unabhängig von der Losgröße ist. Betritt der Behälter früher als in der Realität das Transportsystem, so verlässt er ihn auch frühzeitiger.

Weiterhin kann aus dem oben aufgestellten Diagramm entnommen werden, dass die Steigerungen der Eingangs- und Ausgangskurven unverändert bleiben. Somit kann angenommen werden, dass die Verwendung unterschiedlicher Sammelbehälter keinen Einfluss auf die Durchlaufzeit des Transportsystems hat. Eine solche Abbildung setzt aber voraus, dass die Betrachtungsdauer des Systems sehr lang und dass die Anzahl der beweglichen Objekte sehr hoch ist.

Aus der Anzahl der aus dem Transportsystem abgegebenen Objekte kann der Durchsatz errechnet werden. Er bildet den Mittelwert, der über die Simulationszeit transportierten Elemente, und wird in der Regel in Stück pro Zeiteinheit wiedergegeben, z.B. Paletten/h oder Flaschen/h. Bei der Abbildung des Transports

im Nassbereich wurden die Objekte, Flaschen oder Dosen, in Sammelbehälter zusammengefasst, deren Anzahl aus der Simulation gewonnen wird. Um den Durchsatz richtig ermitteln zu können, muss die Anzahl an Sammelbehälter mit Hilfe der Aufnahmekapazität in Objekte umgerechnet werden.

## B ) Durchsatz in Abhängigkeit von unterschiedlichen Sammelbehältern

In einem weiteren Schritt soll überprüft werden, wie durch die Verwendung der Sammelbehälter der errechnete Durchsatz sich vom realen Wert unterscheidet. Hier spielt nicht nur die Größe des Sammelbehälters eine Rolle, sondern auch der Zeitpunkt, an dem die Simulation unterbrochen bzw. beendet und an dem die zur Auswertung benötigten Daten gespeichert werden. Das nachfolgende Diagramm stellt die Ausgangsdaten zweier Simulationsläufe mit jeweils einem anderen Sammelbehälter dar und soll diese Abhängigkeit aufzeigen. Außerdem sind dort zwei Zeitpunkte zur Beendigung des Simulationslaufs sowie die dazu gehörigen Anzahl an abgegebenen Behälter eingetragen.

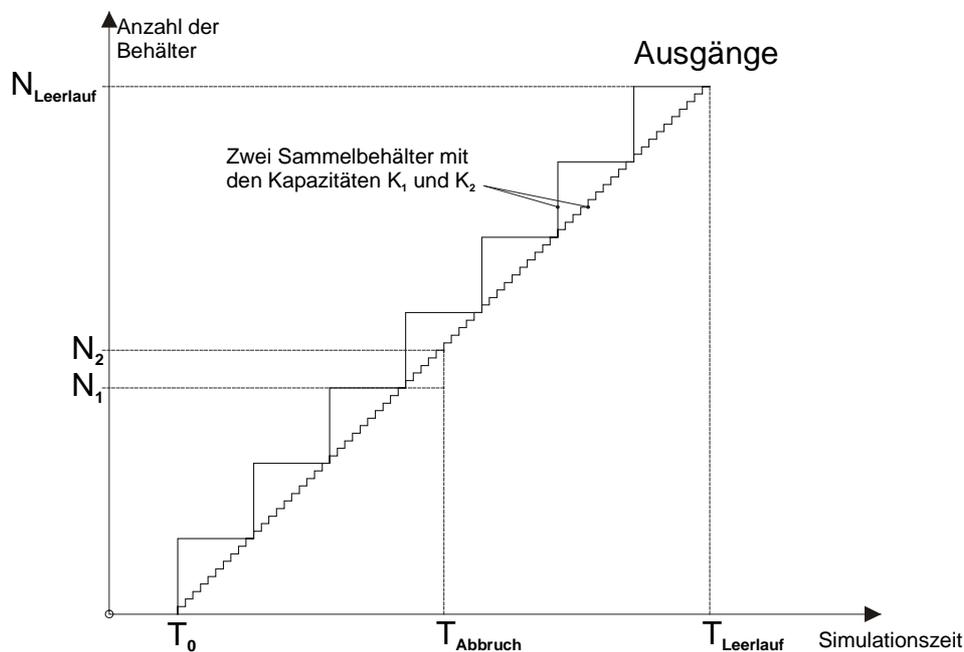


Abbildung 42: Durchsatzberechnung mit unterschiedlichen Sammelbehältern

Der mittlere Durchsatz lässt sich nach diesem Diagramm folgendermaßen ermitteln:

$$\text{Durchsatz} = \frac{N \cdot K}{T_{\text{Abbruch}} - T_0}$$

Es ist erkennbar, dass bei einem Abbruch der Simulationsläufe verschiedene Durchsätze errechnet werden können. Wie in dem Diagramm dargestellt, unterscheiden sich am Ende der Simulation die erfassten Anzahl an Behälter  $N_1$  und  $N_2$  und somit auch die Durchsätze. Dies ist dadurch entstanden, dass beim Abbruch eines der Simulationsläufe der Behälter mit der größeren Kapazität das Transportsystem noch nicht verlassen hat und somit nicht bei den Ausgangsdaten erfasst und gespeichert werden konnte. Daher können die beiden Werte bei einer schlechten Auswahl des Zeitpunkts zur Beendigung der Simulation sich von einander unterscheiden.

Dieser Nachteil kann nur beseitigt werden, wenn gewährleistet ist, dass beim Speichern der gesammelten Daten das Transportsystem keine Objekte mehr beinhaltet. Dies ist nur nach der Leerlaufphase des Systems bzw. der Anlage möglich. Dabei ist unter Leerlaufphase zu verstehen, dass das Gesamtsystem an seinem Eingang nicht mehr mit neuem Material bzw. neuen Aufträgen versorgt wird. Während dieser Phase verlässt lediglich das Material, d.h. die Paletten mit befüllten Flaschen, das System.

Wird dann der Simulationslauf beendet, so ist das gesamte System leer. In diesem Fall bleibt der mittlere Durchsatz für die beiden Simulationsläufe unverändert, da die gesamte Anzahl der transportierten Objekte bei allen möglichen Größen von Sammelbehältern gleich ist. Damit das System aber über eine Leerlaufphase verfügt, muss das Erzeugen von neuen Behälter zeitlich abgegrenzt werden. Dies bedeutet, dass an der Quelle des Systems genauso viele Eingangsmaterialien, z.B. Paletten, generiert werden, wie notwendig sind. Dies kann dadurch realisiert werden, indem das Erzeugen dieser Behälter durch einen Auftrag ausgelöst wird. Wenn beispielsweise ein Auftrag von 50.000 Flaschen simuliert wird, so werden am Systemeingang nur 50 Paletten à 1000 Flaschen definiert. Weiterhin wird der Simulationslauf und das Erfassen der Daten solange fortgeführt, bis das letzte Objekt das System an der Senke verlassen hat. Auf diese Weise kann gewährleistet

werden, dass die unterschiedlichen Kapazitäten der Sammelbehälter keinen Einfluss auf die gewonnenen Ergebnisse bezüglich der Durchsätze haben.

#### **5.6.2.4 Fazit**

Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung der Sammelbehälter zur Abbildung der einsträngigen Transporteure keinen Einfluss auf ihr dynamisches Verhalten hat. Vorausgesetzt dass der Beobachtungszeitraum sehr lang ist und der Zeitpunkt zur Beendigung der Simulationsläufe genau ausgewählt ist, bleiben die relevanten Kenngrößen dieses Transportsystems, d.h. die Durchlaufzeit und der Durchsatz unverändert.

#### **5.6.2.5 Verwendung von Sammelbehältern bei Massentransporteure**

Es hat sich gezeigt, dass sich diese Methodik für die Abbildung von einsträngigen Transporteure unter Einhaltung einiger Voraussetzungen eignet, ohne dabei das dynamische Verhalten zu beeinträchtigen. Nun soll sie weiterhin auf ihre Umsetzung zur Abbildung von Massentransporteuren überprüft werden.

Um eine solche Transporttechnik abbilden zu können, wird zuerst untersucht, wie der Zeitverbrauch eines Objekts auf einem Transporteur zustande kommt. Im letzten Abschnitt „3.5.2 Pufferauslegung im Nassbereich“ wurde erwähnt, dass die Massentransporteure zwei Funktionen, das Fördern und das Puffern, vereinigen. Wird ein solches System abstrahiert und die Fortbewegung eines Objekts einzelnen untersucht, so können zwei Fälle aufgestellt werden: Entweder bewegt sich das Objekt oder es ruht.

Die Zeit, in der sich ein Objekt bewegt, kann entweder aus den technischen Daten entnommen werden oder muss durch Versuche ermittelt werden. In beiden Fällen ist sie eine unabhängige Variable und muss vor dem Start der Simulationsläufe festgelegt werden. Diese Zeit ist die mindestens benötigte Dauer, um das Objekt vom Eingang bis zum Ausgang des jeweiligen Transporteurs zu befördern. Jedes der zu transportierenden Objekte muss diese Zeit verbrauchen, bis es zu den benachbarten Komponenten weitergeleitet werden kann. Diese Eigenschaft führt dazu, dass die Funktionalität des Massentransporteurs die Merkmale eines einsträngigen Transporteurs besitzt. Somit kann ein solcher Massentransporteur

bezüglich seiner ersten Funktion, dem Fördern, genauso wie ein einsträngiger Transporteur betrachtet und abgebildet werden. Zur Simulation der Funktion des Fördern können daher Sammelbehälter verwendet werden. Zur Begründung der realitätstreuen Abbildung gelten die Erläuterungen des vorherigen Abschnitts über die Verwendung der Sammelbehälter für einsträngige Transporteure. Die Transportzeit wird aus der Fördergeschwindigkeit und der Länge des Transporteurs errechnet.

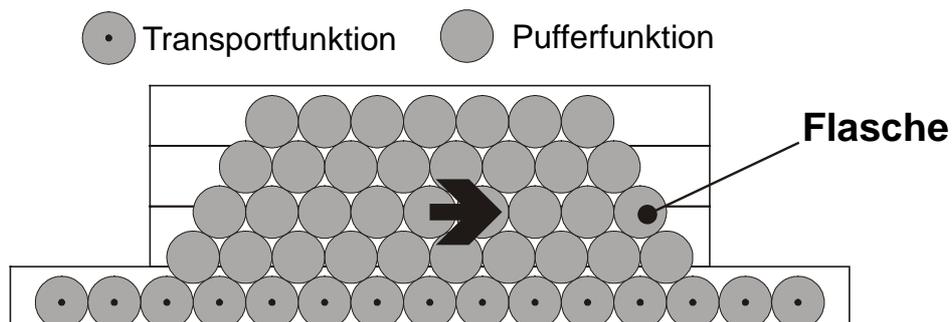


Abbildung 43: Beide Funktionen eines Massentransporteurs

Aus diesen Erkenntnissen kann ein Massentransporteur als eine Zusammensetzung einsträngiger Transporteure mit einem Puffer neu beschrieben werden. Nun stellt sich die Frage, ob die Funktion des Pufferns in diesem Transportsystem integriert oder als ein unabhängiges Element abgebildet werden soll.

Um diese Frage beantworten zu können, sind Überlegungen anzustellen, wie einerseits das Puffern der Objekte zustande kommt und andererseits welcher Wert der Aufnahmekapazität eines solchen Transportsystems im Simulationsmodell zugewiesen wird. Dafür stehen zwei Abbildungsmöglichkeiten zu Verfügung, die nun genauer untersucht werden.

Wie bereits aufgezeigt wurde, werden benachbarte Aggregate mit unterschiedlichen Leistungen betrieben, entweder um genügend Objekte vorzustauen oder einen Rückstau zu verhindern. Beide Maßnahmen dienen dazu, einen kontinuierlichen Betrieb zu sichern. Wie lang das Objekt im Wartezustand bleibt, ist an erster Stelle abhängig von der Leistung des Aggregates und seiner Aufnahmebereitschaft. Der Transporteur hat insofern einen Einfluss auf die Dauer dieses Zustandes, weil die Transportzeit von seiner Geschwindigkeit und die Puffergröße von seinen Abmessungen abhängt.

Die **erste Abbildungsmöglichkeit** ist die Trennung der beiden Funktionen in zwei unterschiedliche Komponenten.

Es wird ein einsträngiger Transporteur verwendet, der nur die Funktion des Förderns übernimmt. Dabei wird seine Kapazität aus der Länge der Förderstrecke, der Kapazität eines Sammelbehälters und der Abmessung eines Objekts, i.d.R. des Durchmessers, ermittelt.

Weiterhin wird er mit einem Puffer verknüpft, in dem die Sammelbehälter solange ruhen, bis sie von der nachfolgenden Komponente übernommen werden können. Die Kapazität des Puffers entspricht dem Unterschied zwischen der Kapazität des einsträngigen Transporteurs und der des Massentransporteurs.

Wird nun bei derartiger Abbildung der Ablauf eines Behälters untersucht, so stellt sich heraus, dass eine klare zeitliche Entkopplung zwischen den beiden Funktionen des Massentransporteurs vorliegen. Wird die Bewegung des Objektes auf einer Zeitachse dargestellt, dann ist erkennbar, dass das Objekt den Puffer nur erreichen kann, wenn die Transportzeit komplett und ohne Unterbrechung verstrichen ist.

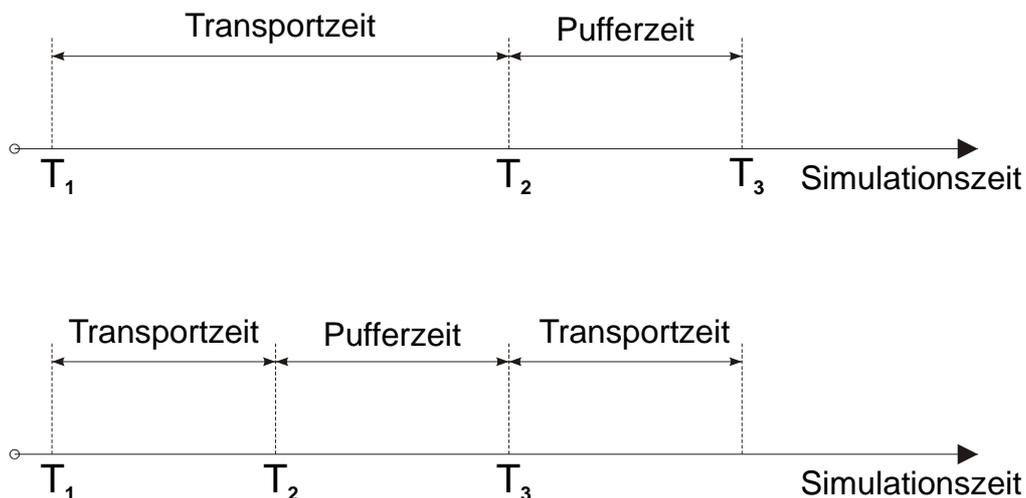


Abbildung 44: Zeitlicher Ablauf eines Objektes auf einem Transporteur

Das Kombinieren der Förderzeit mit der Pufferzeit ist hier nicht möglich. Diese Abbildungsmethode berücksichtigt nicht, dass in der Realität die Objekte sukzessiv auf dem Transporteur aufrücken und sich aufstauen können. Dies bedeutet, dass die Verweildauer auf dem Transportsystem nicht nur aus der Transportzeit besteht, sondern einen Anteil von der Pufferzeit beinhaltet. Vorherige Darstellung stellt exemplarisch den zeitlichen Ablauf eines Objekts auf dem Transportsystem dar. Dabei wird unterschieden zwischen dem Ablauf nach der oben beschriebenen Abbildung und dem in der Realität.

Das Transportieren eines Objekts soll so gestaltet werden, dass die dafür benötigte Zeit nicht auf einmal verbraucht wird, sondern aufgeteilt und nachgeholt werden kann. Daher ist die erst genannte Abbildungsalternative hier ungeeignet.

Die **zweite Abbildungsmöglichkeit** besteht darin, die beiden Funktionen des Massentransporteurs durch ein einziges Simulationselement abzubilden, mit dem die zeitliche Entkopplung des Förderns und des Puffern verhindert wird. Im Abschnitt 5.1.1. wurde bereits erwähnt, dass aufgrund der herrschenden Hierarchie zwischen den drei Grundelementen eines Simulationsmodells das Transportelement die Aufgabe eines Puffers übernehmen kann. Weiterhin wurde die Abbildung eines solchen Element im Abschnitt 5.6.1 näher erläutert. Ein solches Transportsystem erfüllt die oben genannten Anforderung und verschmelzt somit die beiden Funktionen zeitlich miteinander. Offen bleibt, wie dieses Transportsystem, d.h. seine Aufnahmekapazität und seine Transportzeit parametrisiert werden muss.

Es wurde bereits erwähnt, dass ein Massentransporteur als eine Zusammensetzung eines einsträngigen Transporteurs und eines Puffers gilt. Diese Definition bleibt weiterhin gültig. Somit bleibt die Transportzeit dieses abgebildeten Transportsystems im Vergleich zu der am Anfang dieses Abschnitt angegebenen Erklärung unverändert.

Die Kapazität eines Massentransporteurs legt fest, wie viele Objekte, Flaschen oder Dosen, insgesamt sich dort gleichzeitig aufhalten können. Ihr Wert kann aus den geometrischen Daten errechnet werden (siehe Abschnitt 3.5.2). Da aber in der Simulation die Objekte in Sammelbehälter zusammengefasst werden, muss der Wert dieser Kapazität neu berechnet werden. Das dadurch abgebildete dynamische Verhalten ist dem von einsträngigen Transporteur ähnlich.

### 5.6.2.6 Fazit

Eine starke Abstraktion eines Massentransporteurs hat dazu geführt, dass die Methode für die Abbildung des einsträngigen Transporteurs für diese Massentransporteur weiter verwendet werden kann. Diese Abstraktion soll aber nicht bedeuten, dass das Verhalten realitätsfern abgebildet wurde. Es hat sich herausgestellt, dass eine solche Abbildung im Sinne der Funktionalität der Transportstrecke ausreichend ist.

### 5.6.3 Einfluss der Sammelbehälter auf die Abbildung der Aggregate im Nassbereich

Wie bei der Abbildung der Transporteur im Nassbereich werden ebenfalls die Aggregate - im Gegensatz zur Realität - nicht mit den einzelnen Behältern, sondern mit den Sammelbehältern versorgt. D.h. dass Flaschen oder Dosen nicht mehr sequentiell in den Füller eingehen, sondern gleichzeitig eine bestimmte Anzahl davon übergeben wird. Es müssen die bereits erwähnten Abbildungen der Aggregate auf ihr dynamisches Verhalten bei der Verwendungen von Sammelbehältern überprüft werden. Eventuell müssen Maßnahmen getroffen werden, die dazu führen, dass bei Einhaltung der gleichen Art von Abbildungen das Verhalten richtig abgebildet werden kann.

Hier stellt sich wieder die Frage, ob sich bei der Verwendung von Sammelbehältern anstelle von Einzelbehältern ein anderer Durchsatz ergibt. Zu diesem Zweck soll zuerst der Zeitverbrauch eines Aggregats untersucht werden. Im Abschnitt 5.5 „Vorgehensweise bei der Abbildung der Aggregate“ wurde eine Klassifizierung erstellt, bei der alle Aggregate des Nassbereichs, außer der Ein- und der Auspacker, als Bearbeitungsstationen mit einem Durchlaufprozess definiert wurden. Dort verweilt der Einzelbehälter eine bestimmte Dauer, bevor er weiter transportiert werden kann. Im Gegensatz zur Realität wird bei der bereits beschriebenen Abbildung über das Transportsystem dem Aggregat ein Sammelbehälter zugeführt. Somit gelangen an seinem Eingang zum gleichen Zeitpunkt eine bestimmte Anzahl an Einzelbehälter. Nach Verstreichen der festgelegten Verweildauer verlassen diese das Aggregat wiederum gleichzeitig. An dieser Stelle wird die Abbildungsähnlichkeit zwischen dem Verhalten des Aggregats und der Transporteur deutlich. Daher finden hier die für

die Abbildung der Fördertechnik aufgestellten Erklärungen Geltung, um die bereits vorgenommene Abbildung der Aggregate zu verwenden.

Trotzdem kann bei derartigen Abbildungen ein Fehler entstehen, der sich nicht durch die Dynamik im gesamten System aufheben lässt. Dieser Fehler kommt durch den Zusammenhang zwischen der Aufnahmebereitschaft des Aggregats und der Kapazität der Sammelbehälter zustande. Dies wird im folgenden Fall offensichtlich deutlich:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Anzahl der zusammengebündelten Einzelbehälter} \\ \text{bzw.} \\ \text{Größe des Sammelbehälters} \end{array} \right) > \left( \begin{array}{c} \text{Aufnahmebereitschaft} \\ \text{des} \\ \text{Aggregats} \end{array} \right)$$

In diesem Fall werden sowohl diesem Aggregat als auch dem Transportsystem nach Verstreichung der Bearbeitungszeit mehr Einzelbehälter übergeben als erlaubt.

Um dieses Fehlverhalten trotz Verwendung von Sammelbehältern nachträglich zu korrigieren und somit die bereits beschriebene Abbildung der Aggregate beizubehalten, soll der Einfluss der Aufnahmebereitschaft eines Aggregats in die Simulation integriert werden.

Bereits im Abschnitt 5.5 „Vorgehensweise bei der Abbildung der Aggregate“ wurden neben dem Bearbeitungs- bzw. dem Durchlaufprozess zwei andere vorgestellt: der De- und der Montageprozess. Werden diese beiden genau untersucht, so kann festgestellt werden, dass es sich um einen Umfüllprozess handelt. Mit dessen Hilfe kann der Inhalt des am Eingangspuffer eingetroffenen Behälters in einen anderen umgelagert werden, der sich bereits auf dem Ausgangspuffer des Aggregats im Wartezustand befindet. Dabei besitzt dieser neue Behälter eine andere Kapazität.

Beispiel: Beträgt die Aufnahmegröße eines Aggregats 70 Flaschen und wird ein Sammelbehälter mit einer Kapazität von 100 Flaschen verwendet, so kann am Ausgangspuffer ein neuer Behälter generiert werden, der nur so viel Flaschen beinhalten kann, wie das Aggregat aufnehmen und bearbeiten darf. Dies bedeutet, dass nur Sammelbehälter mit jeweils 70 Flaschen das Aggregat verlassen können.

Diese Abbildungsmethode ermöglicht somit eine genaueres Nachahmen des dynamischen Verhaltens der Aggregate und einen besseren Detaillierungsgrad im Nassbereich zu erreichen. Anzumerken ist, dass die Abbildungsart auch verwendet werden kann, falls die Größe des Sammelbehälters kleiner als die Aufnahmebereitschaft des Aggregats ist. Um eine einheitliche Abbildungsmethode aufstellen zu können, wird diese bei allen Aggregaten des Nassbereichs angewendet.

## **5.7 Zusammenfassung**

Basierend auf der durchgeführten Systemanalyse wurde in diesem Abschnitt der erste Schritt zur Modellierung und somit zur Erstellung einer Gerätebibliothek unternommen.

Zuerst wurde eine kurze Einführung in der Abbildungsmethodik vorgestellt, die dabei behilflich war, die für die Simulation notwendige abstrakte Denkweise zu verstehen. Es wurde die allgemeine Struktur eines Simulationsmodells sowie die zum Modellaufbau notwendigen Grundelemente vorgestellt.

In einem weiteren Schritt wurden alle Komponenten, Aggregate, Transporteure und Puffer, gedanklich abstrahiert und abgebildet. Anschließend wurden die Komponenten einer Abfüllanlage zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt. Dabei wurde besonders auf eine sinnvolle hierarchische Struktur geachtet. Weiterhin wurden die notwendigen Kenngrößen aufgestellt, die in der Simulation für das dynamische Verhalten aller Bestandteile verantwortlich sind.

Besondere Untersuchungen wurden für die Komponenten des Nassbereichs durchgeführt, um den Materialfluss ohne negative Einflüsse auf die Simulationstiefe abbilden zu können. Dabei wurde das Verhalten der Fördertechnik bei der Verwendung von Sammelbehältern und ihre Auswirkung auf die bereits abgebildeten Aggregate untersucht. Es hat sich gezeigt, dass unter bestimmten Voraussetzungen, wie z.B. einer langen Betrachtungsdauer, der Einsatz von Sammelbehältern keinen Einfluss auf das dynamische Verhalten der Anlage hat.

## 6 Modellierung und Implementierung

Nachdem alle Komponenten einer Abfüllanlage gedanklich abstrahiert und abgebildet wurden, kann nun in diesem Abschnitt ihre Modellierung und Implementierung im Rahmen einer Bausteinbibliothek beschrieben werden. Außerdem soll in diesem Abschnitt die Vorgehensweise zum Modellieren und zum Aufbau einer gesamten Abfüllanlage erläutert werden.

### 6.1 Die Bausteinbibliothek

Eine Bausteinbibliothek ist eine Ansammlung von Teilmodellen der abgebildeten Aggregate, Transportsysteme und Puffer. Sie soll dem Anwender helfen, auf einfache Weise und ohne Vorkenntnisse über die Simulationstechnik eine gesamte Abfüllanlage aufzubauen.

#### 6.1.1 Das Modellieren der Aggregate

Die Grundvoraussetzung zum Aufbau einer Bausteinbibliothek wurde bereits im vorherigen Abschnitt mit Hilfe der Klassifizierung der Aggregate und der Abbildungen der verschiedenen Komponenten realisiert. Daraus ergibt sich, dass zur Simulation der prozesstechnischen Produktion die Bausteinbibliothek aus vier grundsätzlichen Aggregaten bestehen kann:

- Bearbeitungs- bzw. Durchlaufbaustein
- Demontagebaustein
- Montagebaustein
- Baustein für die Aggregate im Nassbereich

Sie unterscheiden sich an erster Stelle durch ihre Prozessfähigkeit sowie der Anzahl und der Art ihrer internen Puffer.

In den folgenden beiden Abbildungen ist die Bausteinbibliothek mit den vier Grundaggregate bzw. Grundbausteine sowie beispielhaft der interne Aufbau einer Bearbeitungsstation dargestellt. Weiterhin ist dort einen ersten Überblick über die Parametrierungsmöglichkeiten eines Aggregats aufgestellt. Zu erkennen sind die Eingangs- und Ausgangspuffer, die entweder dem Aggregat Behälter einfügen oder entnehmen. Außerdem dienen sie dazu, ihn mit anderen Bausteinen zu verknüpfen. Weiterhin ist der Prozess abgebildet, der die Bearbeitungsart des Aggregats festlegt und die Verbindung zwischen Eingangs- und Ausgangspuffer herstellt.



Abbildung 45: Die Bausteinbibliothek mit den vier Grundbausteine

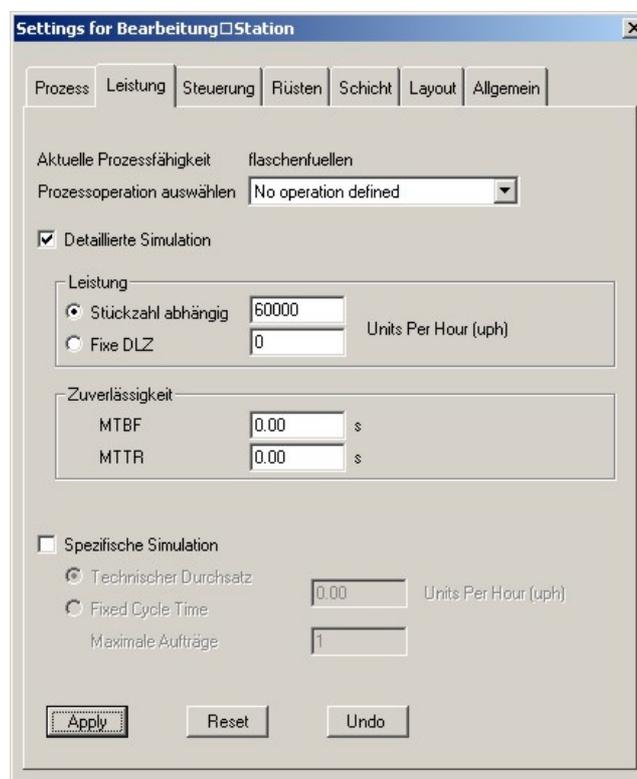


Abbildung 46: Parametrierungsfenster eines Aggregates

Mit Hilfe der oben dargestellten Parametrierungsfenster können die Eigenschaften des als Blackbox abgebildeten Aggregats festgelegt werden. Dort kann zum Beispiel seine Leistung bzw. die benötigten Bearbeitungszeiten eingestellt werden. Dafür stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Entweder wird eine von der Stückzahl abhängige Größe, z.B. Flaschen/h, oder eine feste Verweildauer eingegeben. Weiterhin wird unter dem Punkt „Steuerung“ die Pufferfunktion eingetragen, in dem die Behälter bis zum nächsten Bearbeitungsschritt gelagert werden.

Da die Aggregate allerdings selbst aus weiteren Elementen bestehen, müssen sie sich auch einzeln parametrieren lassen. Für diese Aufgabe stehen weitere ähnliche Konfigurationsfenster zur Verfügung, die in der folgenden Abbildung dargestellt sind.

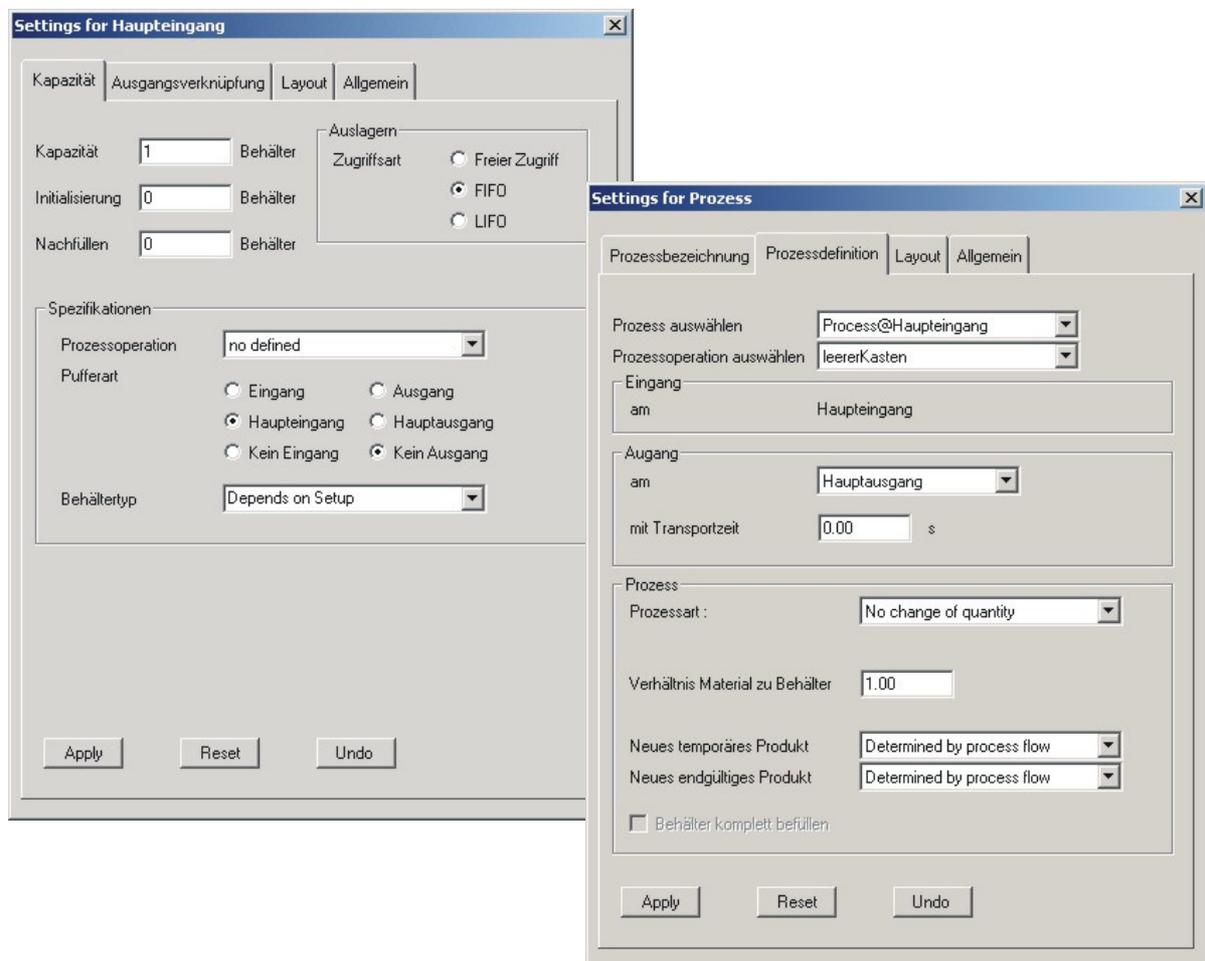


Abbildung 47: Parametrierungsfenster für den Puffer und den Prozess

Zur Einstellung der Verknüpfungspuffer eines Aggregats werden Informationen über die Kapazität, die Strategie des Auslagerns und die Inhaltsbezeichnung benötigt. Weiterhin soll seine Funktion im Sinne von Eingangs- oder Ausgangspuffer festgelegt werden. Dabei soll unterschieden werden, ob es sich um einen Haupteingang bzw. Hauptausgang handelt. Dies spielt eine wichtige Rolle für eine eindeutige Zuordnung eines Aggregats zu einer Arbeitsreihenfolge. Bei der Parametrierung des Prozesses wird entsprechend der Funktion und in Anlehnung an Abbildungsalternativen zuerst entschieden, ob es sich um einen Durchlauf- oder Umfüllprozess handelt. Dafür muss definiert werden, aus welchem Puffer das Material abgenommen und in welchem dieses abgegeben wird.

Weiterhin kann eine interne Transportzeit eingestellt werden, die das Bearbeiten der Behälter um diese Dauer verzögert. Diese Eigenschaft findet Verwendung bei taktgesteuerten Aggregaten, z.B. dem Auspacker. Die in solchen Maschinen integrierten Förderstrecken sorgen dafür, dass die Behälter zuerst transportiert, dann in der Bearbeitungsposition angehalten und zum Schluss abtransportiert werden. Die Einstellung der internen Transportzeit zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangspuffer übernimmt im Simulationsmodell die Aufgabe dieser Förderstrecke.

Im Abschnitt „5.5 Vorgehensweise bei der Abbildung der Aggregate“ wurden die Vorteile aufgezeigt, die durch das Abbilden der Aggregate als eigenständige Bereiche erzielt werden können. Dies bedeutet, dass beim Modellieren die hierarchische Struktur der Grundbausteine und der Bibliothek weiter vertieft und somit eine zusätzliche Parametrierungsalternative geschaffen werden sollte. Die auf diese Weise abgebildeten Aggregate und die dazugehörigen Parametrierungsfenster des Bereichs sind in den nächsten Abbildungen dargestellt.

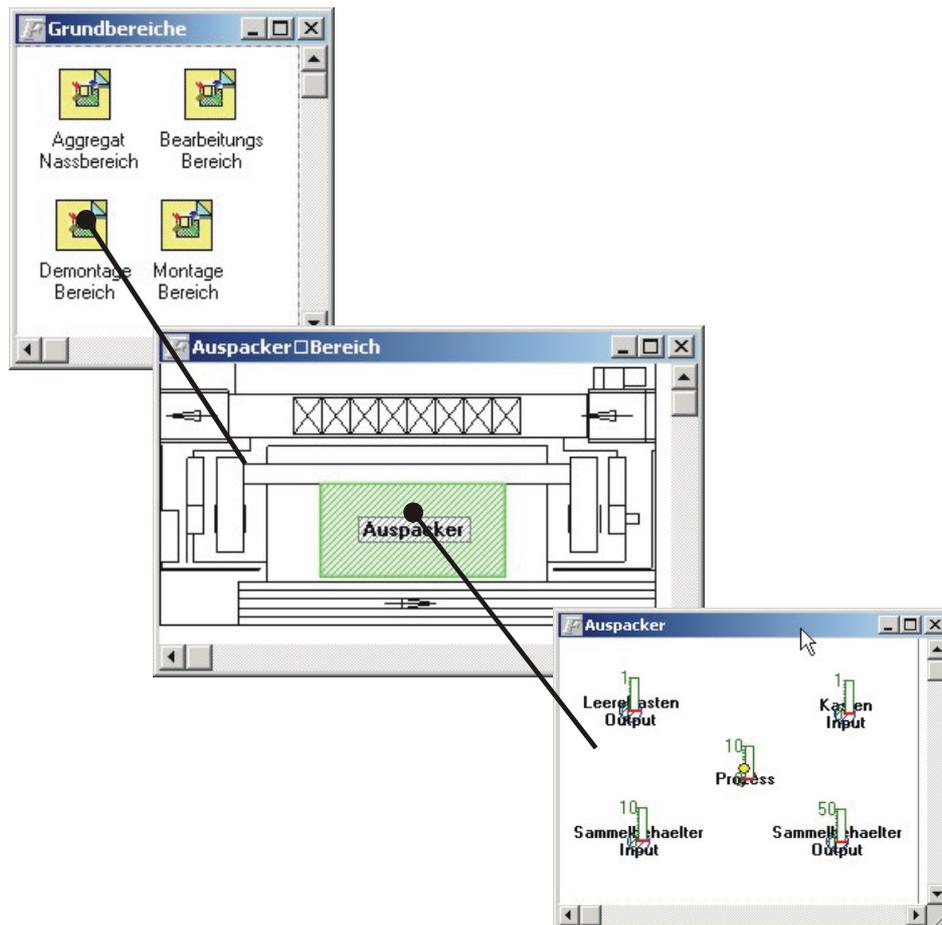


Abbildung 48: Erweiterte Bausteinbibliothek für die Grundbausteine

Zu den wichtigsten Einstellgrößen eines Bereichs gehören die Informationen und Strategien, die für das Steuern der Bearbeitungsaufträge bzw. der Behälter zuständig sind. Dabei wird zwischen Regeln

- zur Einschleusung,
- zum Weiterreichen und
- zum Ausschleusung

unterschieden. Zur Modellierung einer Abfüllanlage findet in den meisten Fällen das Einschleusen bzw. das Annehmen der Behälter ohne zeitliche Verzögerung statt.

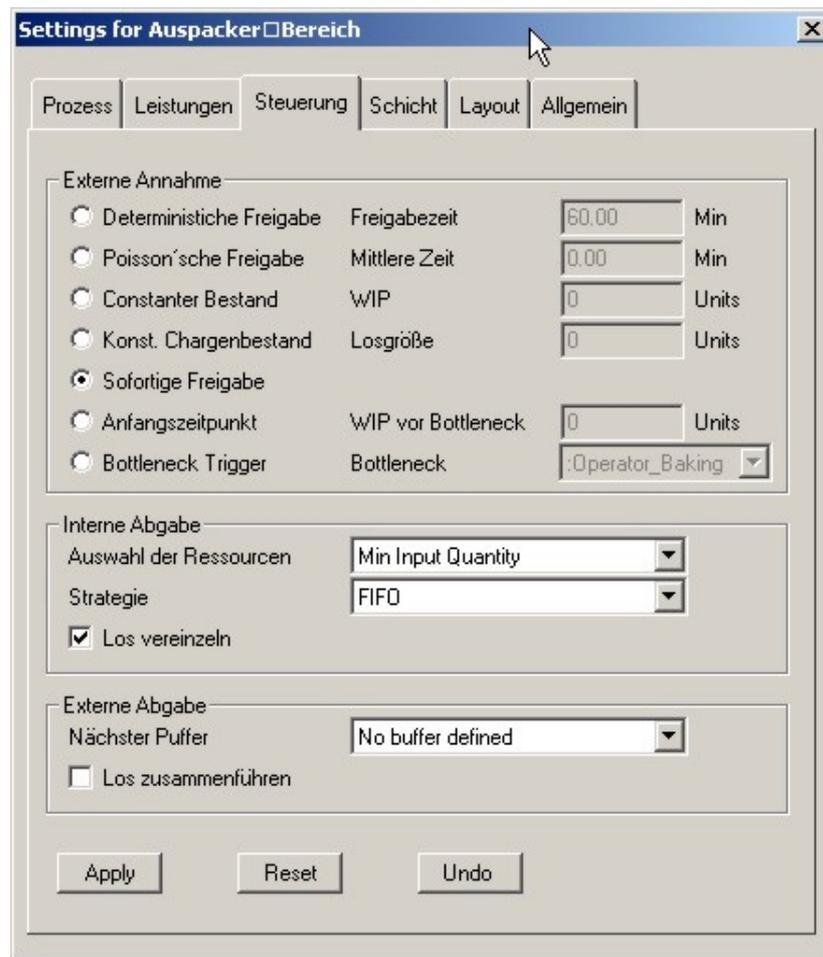


Abbildung 49: Parametrierungsfenster des Bereichs „Auspacker“

Aus dieser vorgestellten Grundbibliothek kann eine weitere anwenderspezifische Bibliothek erstellt werden. Diese zweite Bibliothek enthält nicht die vier Grundbausteine, sondern alle Aggregate, die in der Abfüllanlage Verwendung finden. Diese Aggregate können dann jeweils anlagenspezifisch einzeln parametriert werden.

Somit stehen dem Anwender zwei Anwendungsmöglichkeiten der Grundbausteine zur Verfügung:

- Entweder werden sie direkt in dem Modell eingesetzt und dort mit den verschiedenen Größe und Daten parametriert oder
- es wird eine neue ausführlichere Bibliothek mit allen Aggregaten aufgebaut, die dann einzeln im Modell eingefügt werden können.

### 6.1.2 Das Modellieren der Transportsysteme

Neben den beschriebenen Aggregatbausteinen werden für die Simulation Teilmodelle für die Transportsysteme benötigt, um daraus ein Gesamtmodell einer Abfüllanlage aufbauen und eine Verknüpfung zwischen den Aggregaten herstellen zu können. Transportsysteme werden entsprechend der bereits erläuterten Abbildungen im Abschnitt „5.6 Abbildung der fördertechnischen Anbindungen“ modelliert und parametrieren. Folgende Abbildung zeigt ein solches Transportsystem sowie sein Parametrierungsfenster, mit dessen Hilfe nicht nur Störungsdaten, MTBF und MTTR, eingegeben werden können, sondern auch die im letzten Kapitel angesprochene Kapazität des Transportsystems.

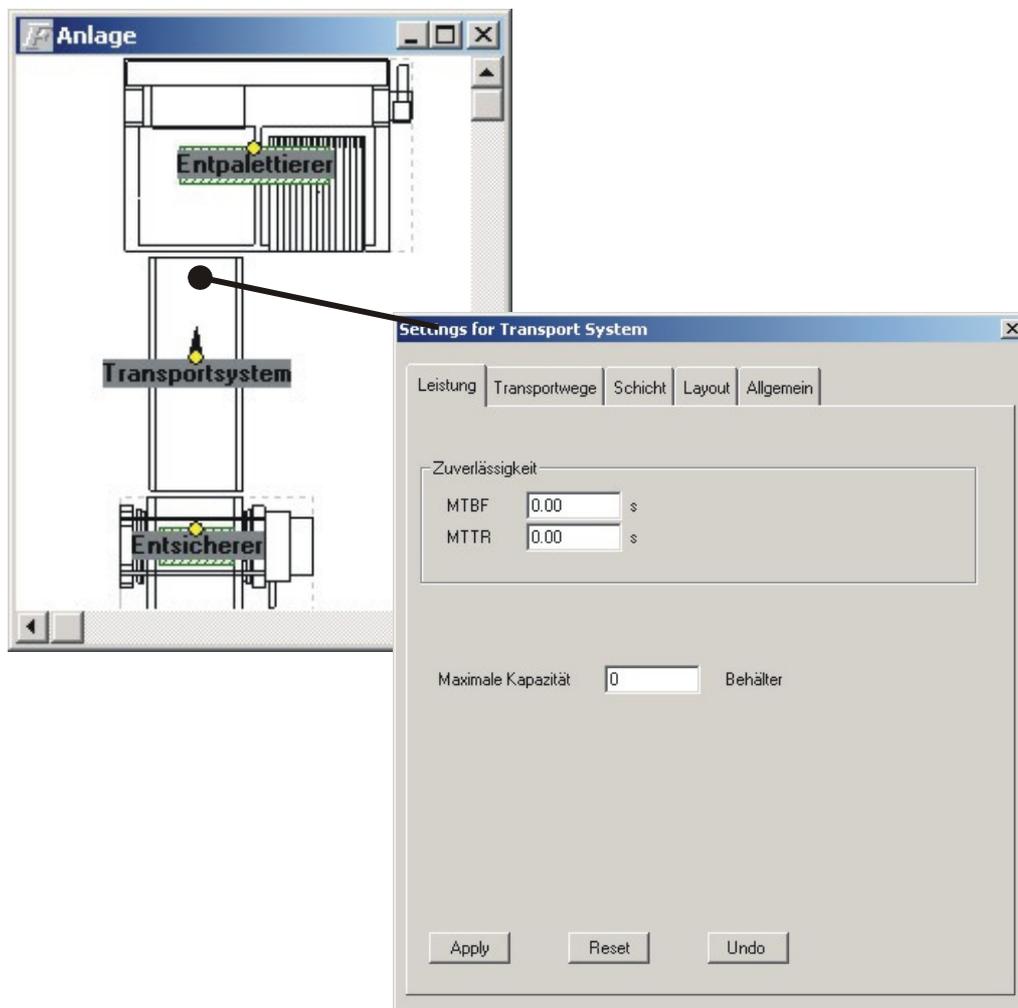


Abbildung 50: Transportsystem mit Parametrierungsfenster

Ein Transportsystem besteht aus einem oder mehreren Förderelementen (vgl. Abschnitt „5.6 Abbildung der fördertechnischen Anbindungen“). Sie übernehmen die Aufgabe des Transportierens und „verbrauchen“ dabei Zeit. Die nächste Darstellung zeigt den internen Aufbau dieses Systems. In dieser Abbildung wurden zwei Transportelemente eingefügt und miteinander verbunden. Mit dem Dimensionieren der Transportelemente wird das Gesamtverhalten dieses Systems festgelegt. Mit Hilfe des Parametrierungsfensters können die notwendigen Größen und Informationen eingetragen werden. Neben der Aufnahmekapazität an Behältern können Fördergeschwindigkeit und -länge eingegeben werden. Aus diesen beiden Werten wird dann die Transportzeit des Behälters ermittelt. Es besteht auch die Möglichkeit, diese Zeit direkt in das vorgesehene Fenster einzutragen.

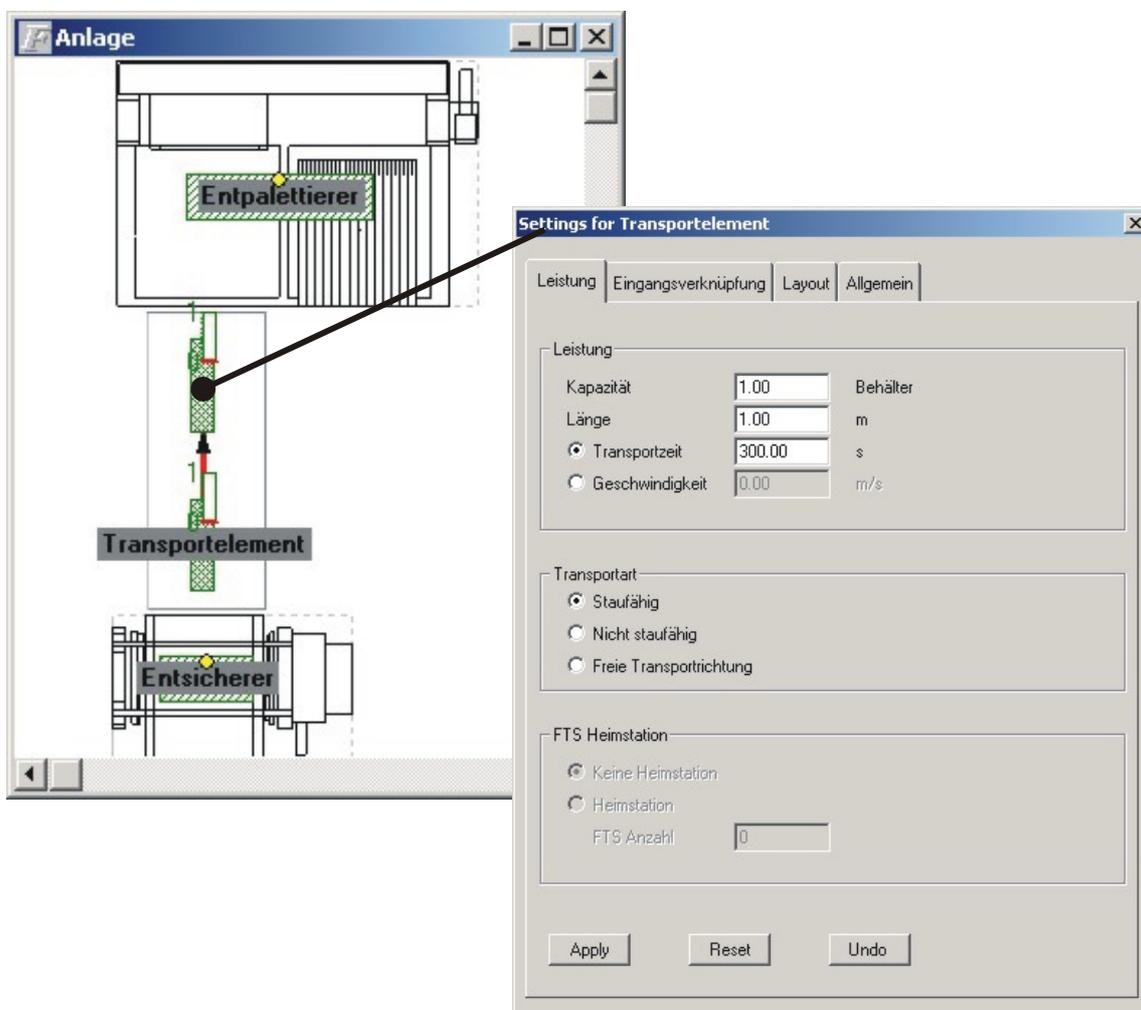


Abbildung 51: Das Transportelement und sein Parametrierungsfenster

Weiterhin soll hier die Funktionsweise des Transportelements festgelegt werden:

- Ist das Stauen auf diesem Förderabschnitt nicht möglich, so werden die Behälter in festen Abständen über die gesamte Strecke transportiert.
- Wird das Element als staufähig eingestellt, so können die Behälter bei Entstehung eines Engpasses aufeinander auffahren.

An dieser Stelle soll näher auf dem Zusammenhang zwischen der Kapazität der Elemente und der des Transportsystems eingegangen werden. Die Summe der Kapazität aller Einzelelemente ergibt die Kapazität des gesamten Transportsystems, nur für den Fall dass im Eingabefeld „Maximale Kapazität“ des Parametrierungsfenster dieses Transportsystems (siehe Abbildung 50) der Wert Null eingetragen wurde.

Wird dort ein anderer Wert eingegeben, der mindestens gleich groß wie die Summe der Einzelkapazitäten sein soll, so gilt dieser Wert als die gesamte Kapazität des Transportsystems, obwohl die Transportelemente aufgrund ihrer Dimensionierung noch aufnahmefähiger sind. D.h. es werden so lange Behälter aufgestaut, bis ihre Anzahl den Wert der maximalen Kapazität erreicht. Diese Methode verhindert, dass ein Rückstau sich bis zum Aggregat bildet. Somit ist die Anforderung über die Regelung des Stauverhaltens nach den Aggregaten erfüllt.

### **6.1.3 Das Modellieren eines externen Puffers**

Neben den Aggregaten und den Transportsystemen werden externe Puffer, Reglerpuffer, benötigt. Sie sorgen dafür, das Stauverhalten vor den Aggregate abzubilden und somit simulieren zu können. Auf die dazu notwendigen Daten und Informationen und auf seine Platzierung in der hierarchische Struktur des Gesamtmodells wurde bereits im Abschnitt 5.6.1.4 „Abbildung des Regelverhaltens“ angegangen.

Weiterhin werden solche Puffer im Modell als sogenannten Quellen und Senken eingesetzt:

- Die Quelle dient dazu, Material, d.h. Paletten, Gebinde oder Behälter im System bzw. im Modell zu generieren.
- Die Senke ist dafür zuständig, das Material aus dem System bzw. aus dem Modell endgültig zu entnehmen.

Das Modellieren dieser Merkmale und Eigenschaften wird mit Hilfe eines Parametrierungsfensters (vgl. Abbildung 52) vorgenommen.

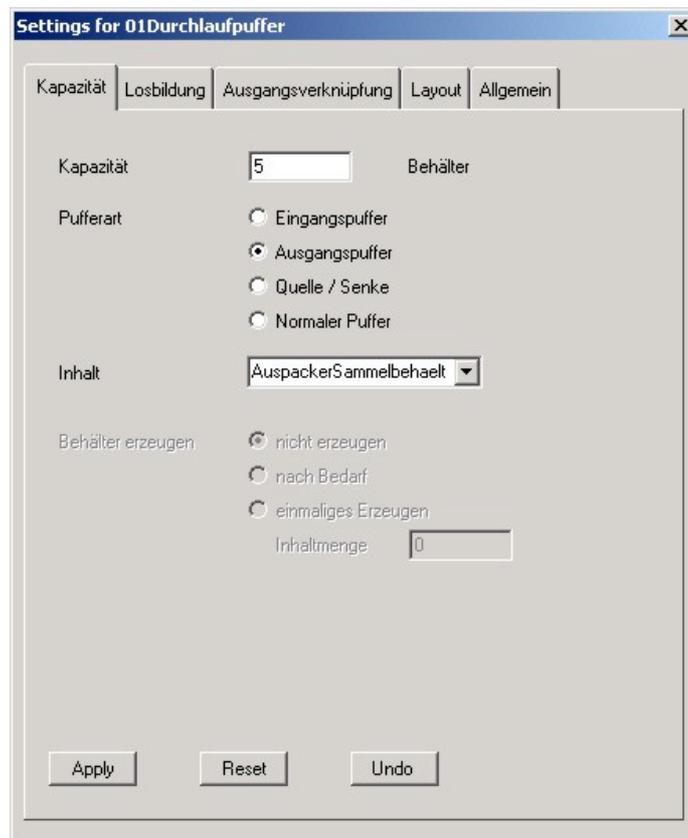


Abbildung 52: Externer Puffer mit Parametrierungsfenster

Neben der Kapazität und dem Inhalt kann im Parametrierungsfenster eingestellt werden, um welche Pufferart es sich handelt. Bei der Einstellung „Quelle / Senke“ kann festgelegt werden, wie die Behälter erzeugt werden:

- Nicht erzeugen: es werden keine Behälter erzeugt. Der Puffer hat dann nur seine ursprüngliche Funktion des Lagerns.

- Nach Bedarf: sobald ein neuer Behälter im Modell benötigt wird, generiert der Puffer diesen.
- Einmaliges Erzeugen: Am Simulationsstart wird nur eine bestimmte Menge an Behältern erzeugt, die in dem Modell bearbeitet und transportiert werden.

Weiterhin kann unter dem Punkt „Losbildung“ die Größe eines Loses festgelegt werden. Dies ist für die Regelung der Aggregate notwendig, die nur bei dem Vorhandensein einer bestimmten Anzahl an Material, d.h. an Flaschen oder Dosen, in Betrieb gehen dürfen.

#### **6.1.4 Hilfsbausteine und Hilfsbereiche**

Beim Modellieren hat es sich als notwendig erwiesen, weitere Bausteine bzw. Bereiche als Hilfsmittel zum Aufbau des Gesamtmodells mit einzubeziehen, um einen fehlerfreien Simulationslauf zu sichern:

- Bereiche „Los-Aufbau-Bereich“ und „Los-Abbau-Bereich“
- Baustein „Transporteur“
- Bereich „Ein- und Ausgangsbereich“

Diese Hilfsbausteine haben keinen Einfluss auf das dynamischen Verhalten, da die dort verbrauchte Zeit entweder gleich null ist oder sie dem Ablauf des Materialflusses automatisch angepasst wird.

##### **6.1.4.1 Hilfsbereiche „Los-Aufbau-Bereich“ und „Los-Abbau-Bereich“**

Die Hilfsbereiche „Los-Aufbau-Bereich“ und „Los-Abbau-Bereich“ dienen dazu, aus mehreren Behältern einen einzigen bzw. aus einen einzigen Behälter mehrere zu bilden. Sie werden vor bzw. nach einem Aggregat eingesetzt, das taktgesteuert betrieben werden. Die Prozessfähigkeiten dieser Hilfsbereiche entsprechen dem bereits beschriebenen Montage- bzw. Demontageprozess. Deshalb stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit ihrer Verwendung.

Zur besseren Erläuterung soll der Auspacker als Beispiel genommen werden. Ein taktgesteuerter Auspacker erhält eine bestimmte Anzahl an Behälter, d.h. Kästen.

Nachdem diese Behälter zum Stillstand gekommen sind, entnimmt der Auspacker gleichzeitig deren Inhalt (d.h. die Flaschen). Dies bedeutet, dass der Auspacker nur in Betrieb geht, wenn die genaue Menge an Behältern sich dort aufhalten.

Um diese Bearbeitungsart modellieren zu können, wird daher aus diesen Behältern unmittelbar vor dem Aggregat in dem „Los-Aufbau-Bereich“ ein einziger generiert. Nach dem Auspacker wird dieser neue Behälter im „Los-Abbau-Bereich“ zu den ursprünglichen Behältern wieder vereinzelt.

### **6.1.4.2 Hilfsbaustein „Transporteur“**

Der Baustein „Transporteur“ wird dazu benötigt, um die Bildung eines Loses an einem externen Puffer realisieren zu können. Er wird direkt nach dem Bereich eines Aggregats und vor dem Transportsystem eingebaut. Die Notwendigkeit ist durch die hierarchische Struktur des gesamten Modells und somit die unterschiedlichen Prioritäten bei der durch den Verwalter erteilten Bearbeitungsaufträge gegeben. Dieser Baustein hat lediglich die Aufgabe, die Funktion des externen Puffer richtig zu steuern, ohne dabei den hierarchischen Aufbau des Modells weiter zu vertiefen und somit zu erschweren.

### **6.1.4.3 Hilfsbereich „Ein- und Ausgangsbereich“**

In diesem Bereich wird das benötigte Anfangsmaterial hergestellt und das fertige Endmaterial gelagert. Dies bedeutet, dass die Quelle und die Senke des Gesamtsystems „Abfüllanlage“ sich in diesem Bereich befinden (vgl. Abbildung 29: System „Abfüllanlage“). Beispielsweise werden in diesem Bereich die mit leeren Flaschen beladenen Paletten generiert. Nach Ablauf aller Bearbeitungsschritte werden die mit vollen Flaschen beladenen Paletten in diesen Bereich wieder zurückgeführt.

Dieser Hilfsbereich wird außerhalb des Bereichs „Abfüllanlage“ platziert, um eine Eingangs- bzw. Ausgangsschnittstelle in diesem Bereich aufzubauen. Auf diese Weise können basierend auf den eingegangenen und den ausgegangenen Paletten Daten über die Durchlaufzeit und den Durchsatz der Anlage gesammelt werden.

### **6.1.5 Zusammenfassung**

Im Abschnitt „5 Abbildung einer Abfüllanlage“ wurden alle Komponenten einer Abfüllanlage gedanklich abstrahiert und symbolisch abgebildet. Basierend auf dieser Vorarbeit wurden in diesem Abschnitt die Aggregate, die Transportsysteme und die Puffer modelliert und in einem Rechnermodell implementiert.

Es wurde eine Bibliothek aufgebaut, die die Abbildungen der Grundkomponenten einer Abfüllanlage beinhaltet. Diese Bibliothek kann selbstständig durch den Anwender erweitert werden, indem diese Grundbausteine anlagenspezifisch vervielfältigt werden.

## **6.2 Vorgehensweise bei Modellaufbau**

Nach dem Aufbau der Bausteinbibliothek muss die Vorgehensweise zum Aufbau eines kompletten Modells festgelegt werden. Zur Vereinfachung wird als Beispiel eine Anlage zum Abfüllen von Flaschen verwendet, die in Kästen und Paletten beladen werden.

### **6.2.1 Das Definieren der Behälter**

Zu Beginn des Modellaufbaus müssen die notwendigen Produkte und Behälter mit ihren Inhalten definiert werden. Dem Anlagenbeispiel entsprechend müssen drei Produkte generiert werden:

- Flasche,
- Leerpalette und
- Leerkasten

Diese werden in mehrere Behälter mit verschiedenen Größen zusammengefasst. Dazu zählen:

- eine Palette,
- ein Kasten und

- mehrerer Sammelbehälter.

Weiterhin müssen weitere Behälter definiert werden, die zur Bildung eines Loses an den bereits erwähnten Hilfsbereichen „Los-Aufbau-Bereich“ und „Los-Abbau-Bereich“ verwendet werden.

Mit Hilfe des am Lehrstuhl entwickelten Simulationswerkzeugs können diese Schritte auf einfache Weise durchgeführt werden. Ein sogenannter Materialverwalter ermöglicht das Definieren einer beliebigen Anzahl an Produkten und Behälter. Die nächste Darstellung bietet einen Überblick über diesen Materialverwalter.

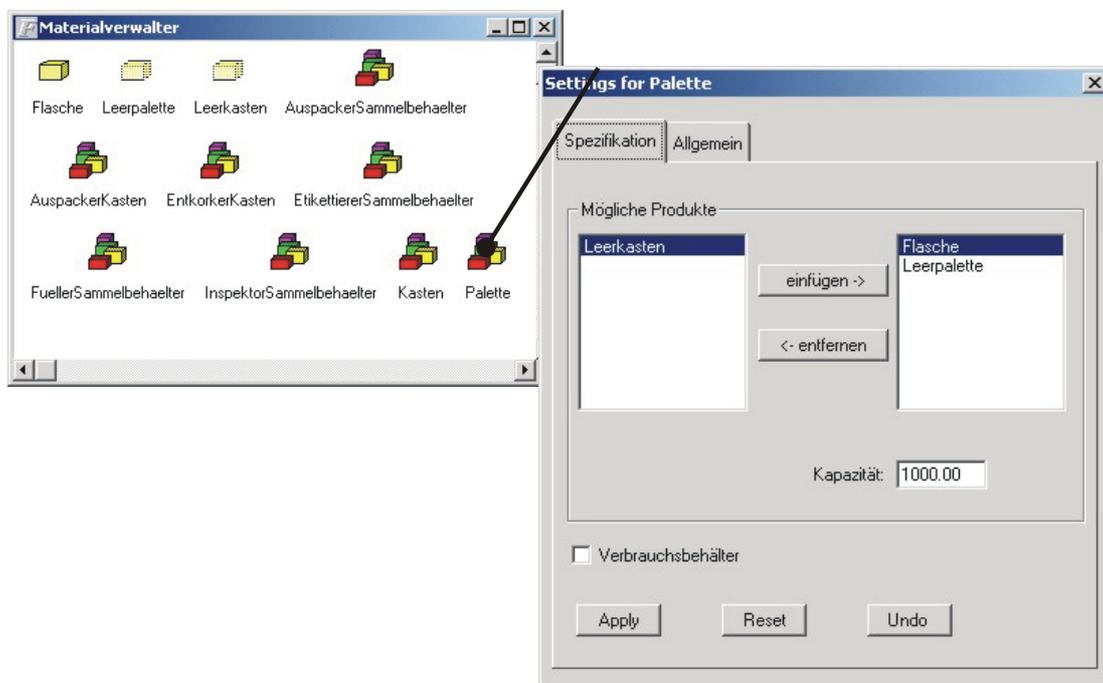


Abbildung 53: Der Materialverwalter

Mit Hilfe der Parametrierungsfenster können die einzelnen Elemente des Materialverwalters gekennzeichnet und festgelegt werden. Die Abbildung 53: Der Materialverwalter zeigt eine Eingabemaske zum Definieren einer Palette. Sie kann zwei verschiedene Produkte, Flasche und Leerpalette, aufnehmen. Anzumerken ist, dass die Kapazität nicht in Kästen, sondern in Flaschen eingestellt wird.

Wird die Option „Verbrauchsbehälter“ gewählt, so wird dieser Behälter nach dem Bearbeitungsschritt aus dem Modell endgültig entfernt. Diese Einstellung kommt bei

den beiden Produkten „Leerpalette“ und „Leerkasten“ zum Einsatz, da sie nur zwischen Ent- und Bepalettierer bzw. Aus- und Einpacker gebraucht werden.

## 6.2.2 Das Definieren der Prozessfähigkeiten

Nach der Definition der Produkte und Behälter werden die Prozesse spezifiziert. Dabei kann für jede Komponente, die ein Prozesselement beinhaltet, nur eine einzige Fähigkeit spezifiziert werden. Sie wird eindeutig durch eine Kennzeichnung sowie den Eingangs- und den Ausgangsbehälter definiert. Da eine Komponente bei gleichbleibender Bearbeitungsart verschiedene Behälter aufnehmen kann, wird die Prozessfähigkeit mehreren Operationen zugeordnet.

Zum Beispiel wird für den Hilfsbaustein „Transporteur“ die Prozessfähigkeit „flaschentransportieren“ definiert. Da er aber mehrmals in dem Modell eingesetzt wird und somit verschiedenen Behälter bearbeiten kann, müssen hier in Abhängigkeit der Behälter verschiedene Operationen eingestellt werden. Für diese Aufgaben steht der in Abbildung 54: Das Definieren von Prozessfähigkeiten und Prozessoperationen unter dargestellte Prozessverwalter zur Verfügung.

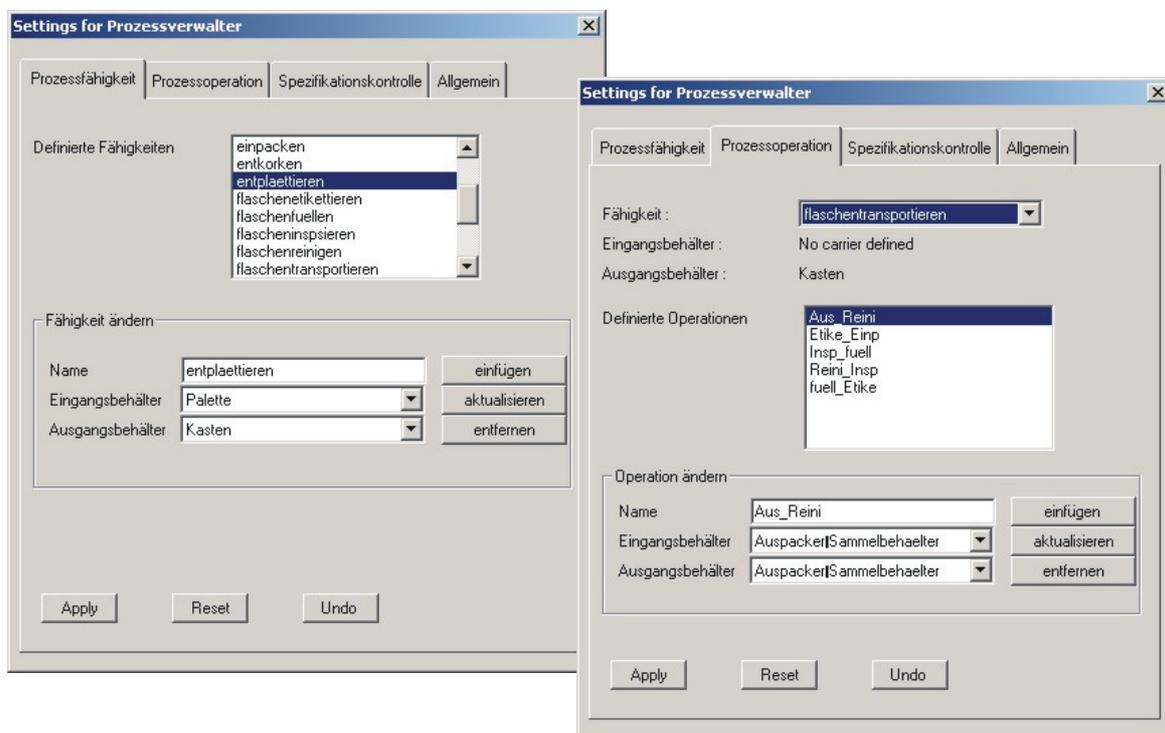


Abbildung 54: Das Definieren von Prozessfähigkeiten und Prozessoperationen

Im linken Parametrierungsfenster werden die Prozessfähigkeiten der Bausteine definiert. Die Kennzeichnung des Prozesses und das Auswählen des Eingangs- und Ausgangsbehälter können individuell eingestellt und jederzeit aktualisiert werden.

Im rechten Parametrierungsfenster werden die der Prozessfähigkeit zugeordneten Operationen definiert. Beispielsweise wurde für den Hilfsbaustein „Transportieren“ ein Prozess mit mehreren Operationen definiert. Die Kennzeichnung der Operation „Aus\_Reini“ weist darauf hin, dass dieser Hilfsbaustein sich zwischen dem Auspacker und der Reinigungsmaschine befindet und dass der zu bearbeitende Behälter „AuspackerSammelbehälter“ heißt. Für eine andere Operation, z.B. „Insp\_Fuell“, wird entsprechend der Arbeitsreihenfolge ein anderer Behälter ausgewählt.

### 6.2.3 Das Definieren des Arbeitsplans

Durch das Definieren der Arbeitspläne werden die Prozessreihenfolgen festgelegt, die die Behälter zur Herstellung der Produkte durchlaufen müssen.

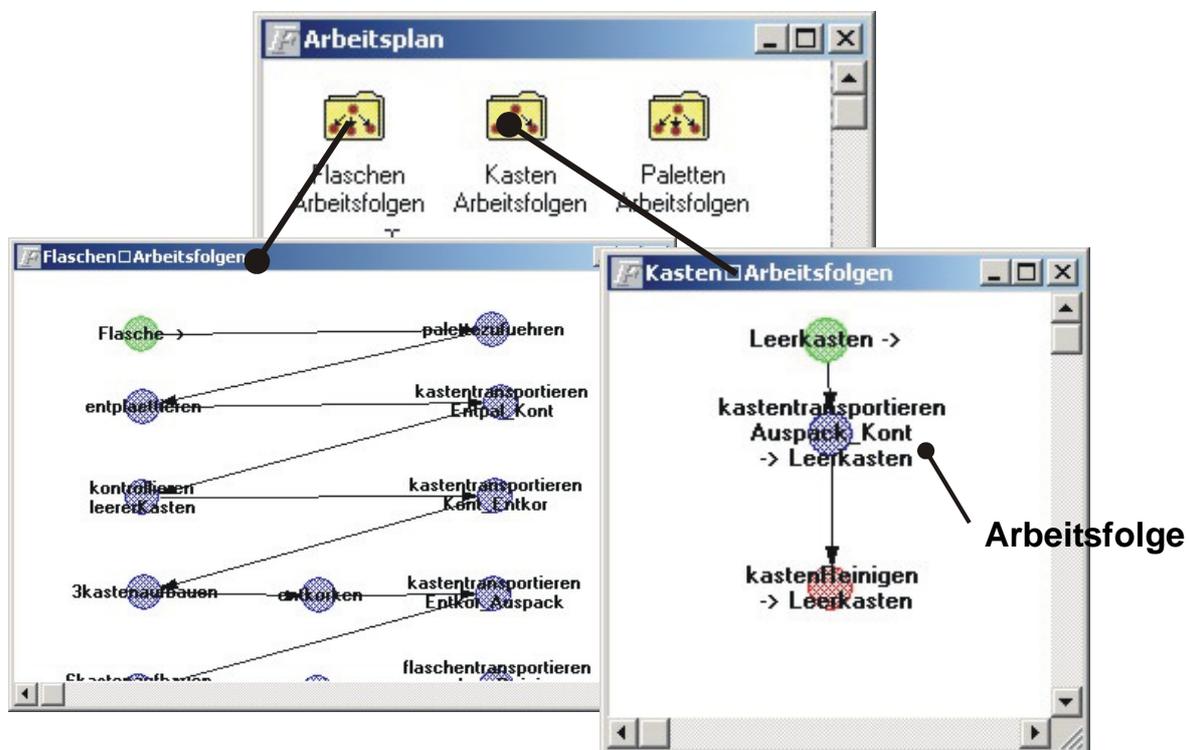


Abbildung 55: das Definieren des Arbeitsplans



In der Abbildung 56: Ausschnitt einer symbolisch aufgebauten Anlage sind die verschiedenen Komponenten als einfache Rechtecke visualisiert. Dies vereinfacht während der ersten Aufbauschritte das Modellieren und die Durchführung der Testläufe. Später können den Komponenten CAD-Grafiken zugeordnet werden, um ein komplettes Layout darstellen zu können.

Während der Modellierung können bereits erste Simulationsläufe durchgeführt werden, um mögliche Fehler rechtzeitig beheben zu können, wie z.B. fehlende Verknüpfungen oder falsch definierte Prozesse.

Bis jetzt wurden in dem Modell keine Daten über das Produktionsvorhaben mit einbezogen. In dem sogenannten Auftragsordner werden deshalb Listen verwaltet, die dem Produktionsprogramm entsprechen. Diese Auftragslisten beinhalten u.a. Informationen über das herzustellende Produkt sowie die Produktionsmenge. Diese Daten werden dann dem ersten Bereich des Modells zur Verfügung gestellt, der sie als Materialflussinformationen zu den anderen Komponenten weiterleitet.

## 7 Experimentieren und Auswerten

Das Experimentieren mit dem aufgebauten Modell ermöglicht es, detaillierte Aufschlüsse über das dynamische Verhalten der Anlage und deren Komponenten zu erhalten. Darüber hinaus können Informationen, z.B. über das Durchsatzverhalten und die Auslastung der Aggregate und der Transporteure, gesammelt und statistisch ausgewertet werden. Mit Hilfe dieser Kennzahlen kann das Systemverhalten anschließend analysiert und daraus neue Erkenntnisse gewonnen werden.

### 7.1 Die Durchführung von Experimente

Unter Experimentieren wird das Simulieren des abgebildeten Systems und seiner Komponenten innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraums und mit vordefinierten Modellparametern verstanden. Hierzu werden in der VDI-Richtlinie [VDI 3633 Blatt 3] zwischen Simulationsläufen und Simulationsexperimenten folgendermaßen unterschieden:

- Ein Simulationslauf entspricht der Nachbildung des Verhaltens eines Systems mit einem spezifizierten ablauffähigen Modell über einen bestimmten Zeitraum.
- Ein Simulationsexperiment dient der gezielten empirischen Untersuchung des Modellverhaltens über einen bestimmten Zeithorizont durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischen Parametervariationen.

Um genauere Aussagen über das dynamische Verhalten des Systems zu erzielen, sind daher in der Regel mehrfache Simulationsläufe notwendig, bei denen verschiedene Einstellgrößen des Systems oder dessen Komponenten variiert werden. Daher kann ein Experiment aus einer Reihe von mehreren Simulationsläufen bestehen, wobei die Modellparameter von einem Simulationslauf zum anderen geändert werden.

#### 7.1.1 Der Experiment-Assistent

Mit Hilfe eines Assistenten können auf einfache Weise unterschiedliche Experimente definiert, durchgeführt und verwaltet werden. Dieser Assistent variiert eigenständig

entsprechend der vorgenommenen Definition die Modellparameter zwischen den einzelnen Simulationsläufen. Somit sorgt er selbsttätig für den Ablauf der Simulation. Weiterhin erzeugt er automatisch einen Ordner, in dem alle Einstellungen dieser Experimente sowie die gewonnenen Daten dokumentiert und gespeichert werden, um eine spätere Überprüfung und Nachvollziehbarkeit der Simulationsläufe zu ermöglichen.

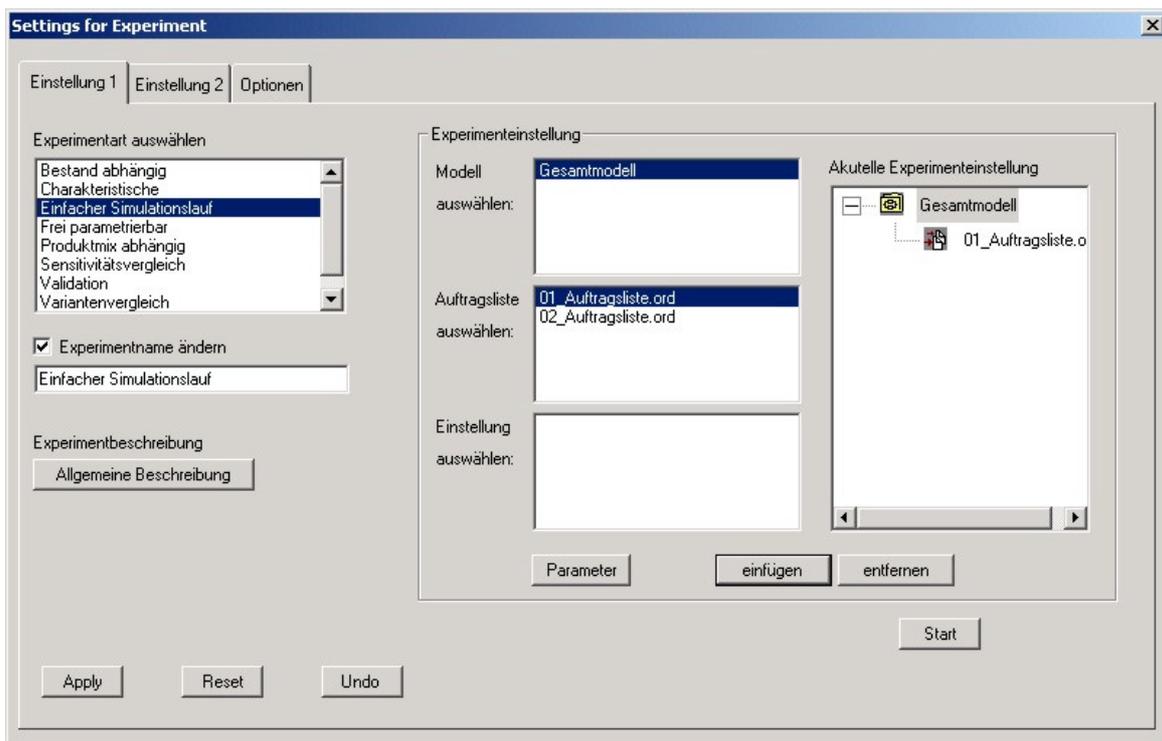


Abbildung 57: Der Experiment-Assistent

Zum Definieren eines Experiments müssen einige Festlegungen getroffen werden. Zuerst sind die zu simulierenden Modelle und die dazugehörigen Auftragslisten auszuwählen. Da sich ein Experiment aus mehreren Simulationsläufen zusammensetzen kann, bietet dieser Assistent die Möglichkeit, verschiedenen Parametern des Modells oder dessen Komponenten verschiedene Werte zuzuweisen, die nach jedem Lauf automatisch variiert werden.

Weiterhin wird die Dauer der Simulation sowie Informationen über die Anlaufphase konfiguriert. Mit dem Definieren des Anlaufverhaltens wird festgelegt, ab welchem Zeitpunkt die Simulationsdaten für die zu erstellende statistische Auswertung genutzt werden. Die Bedeutung dieser Festlegung liegt darin, dass die Simulation in der

Regel ohne Anfangsbestand startet. Erst nach einer gewissen Zeit erreicht die Anlage einen normalen Betriebszustand. Das Anlaufverhalten wird entweder durch eine feste Zeit oder durch das Erreichen einer bestimmten Stabilität der Durchlaufzeit, des Durchsatzes oder des Bestandes spezifiziert.

Für die ersten Tests eines neuen Modells werden in der Regel einfache Experimente mit einem einzigen Simulationslauf durchgeführt. Sie dienen dazu, das Modell auf einen vollständigen Aufbau sowie auf ein richtig abgebildetes Verhalten zu überprüfen. Komplexere Experimente können hingegen eine Vielzahl von Einstellungen und Läufe umfassen. Es kann zum Beispiel ein Experiment zum Variantenvergleich definiert werden, anhand dessen unterschiedlich parametrisierte Modelle mit dem gleichen Auftrag eingelastet werden, um ihr Verhalten miteinander zu vergleichen. Es kann aber auch ein Experiment definiert werden, um das Verhalten eines einzigen Modells bei Verwendung unterschiedlicher Auftragslisten analysieren zu können. Ein solches Experiment lässt sich zum Beispiel verwenden, um das Verhalten der Anlage in Abhängigkeit eines Produktmixes untersuchen zu können.

Während der Durchführung der Simulationsläufe speichert der Experiment-Assistent alle anfallenden Ereignisse über die Zustände aller im Modell eingesetzten Komponenten sowie über den Material- und Informationsfluss. All diese Daten stehen für eine Auswertung durch statistische Methoden bereit und können für eine mögliche Weiterverwendung dauerhaft aufgehoben werden.

### **7.1.2 Darstellung und Animation**

Das Modell lässt sich auf verschiedene Arten bearbeiten und darstellen. Zur Verfügung stehen drei Möglichkeiten, die sich beliebig kombinieren lassen:

- In der Symbol-Ansicht werden alle Komponenten symbolisch jeweils mit einem Icon angezeigt.
- Die Hierarchie-Ansicht zeigt die gesamte Organisation des Modells und erlaubt somit ein schnelles Bewegen in der Struktur des Systems.
- Mit der Layout-Ansicht werden die Komponenten durch eine CAD-Grafik dargestellt.

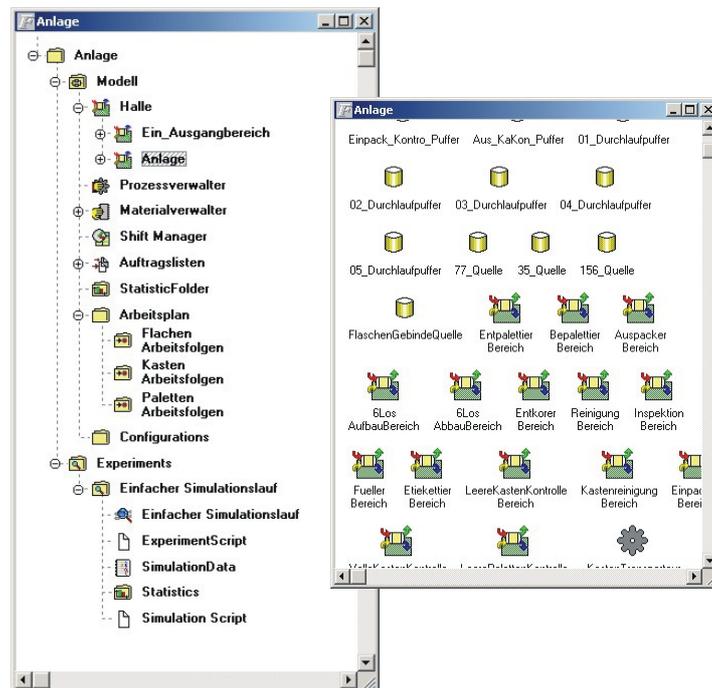


Abbildung 58: Hierarchie-Ansicht und Symbol-Ansicht eines Modells

Während der Simulation werden die Abläufe in der Layout-Ansicht animiert. Durch die Farbänderung einer Ampel werden die Zustände der Aggregate und Transportsysteme visualisiert. Darüber hinaus wird der aktuelle Befüllungsgrad der externen und internen Puffer sowie der Prozess- und Transportelemente jederzeit angezeigt.

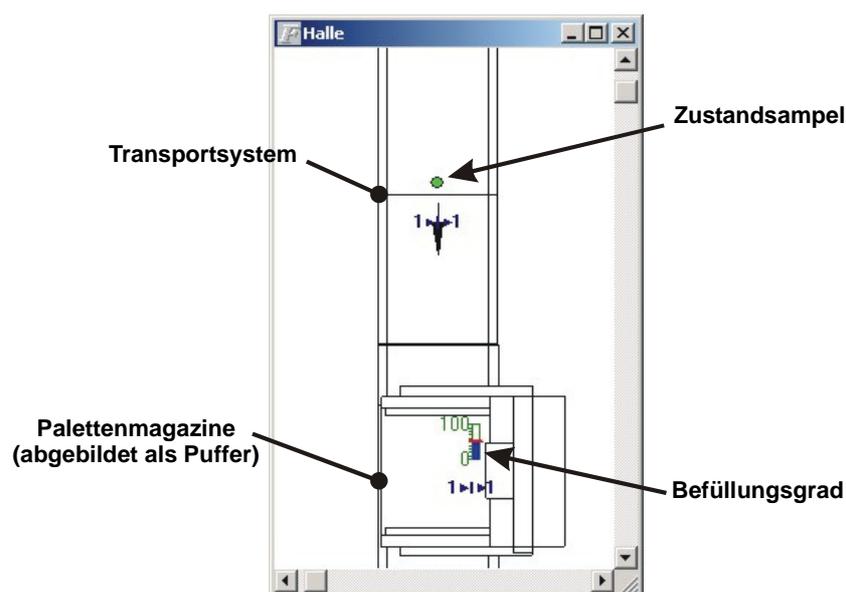


Abbildung 59: Animation eines Puffers und eines Transportsystems

In der folgenden Tabelle sind diese Zustände und die zugehörigen Farben eingetragen. Dabei besteht die Möglichkeit, die Zustände genauer zu beschreiben, falls die Gründe des Eintreffens vielfältig sein können.

Grober Zustand	Detaillierter Zustand	Farbe
Außer Betrieb	Außer Betrieb	Schwarz
In Betrieb	In Betrieb	Grün
In Bereitstellung	Fehlender Auftrag	Gelb
	Fehlendes Material	Orange
	Fehlender Transport	Hellbraun
Unplanmäßiger Wartezustand	Wartung	Rot
Planmäßiger Wartezustand	Rüsten	Dunkelblau

Wenn die Animation der Ereignisse im Modell nicht erforderlich ist, sollten während der Simulation möglichst wenige Fenster in der Layout-Ansicht geöffnet sein. Wegen der Belastung des Rechnerprozessors verlangsamt die Animation die Simulationsgeschwindigkeit erheblich. Ein schneller Zugriff auf die Animation einzelner Komponenten des Modells ist auch durch die Hierarchie-Ansicht möglich.

### 7.1.3 Statistische Auswertung

Um aus den durchgeführten Experimenten Rückschlüsse auf das Verhalten des abgebildeten Systems ziehen zu können, müssen alle Ereignisse, die während des Simulationslaufs anfallen, für eine statistische Auswertungen aufbereitet werden. Basierend auf verschiedene, graphische und textuelle Darstellungsformen werden das gegenseitige Zusammenwirken dieser Daten sowie deren Zusammenhänge aufgezeigt, wie zum Beispiel die zeitlichen Anteile der verschiedenen Betriebszustände und der Bestandsverlauf einer Komponente.

Die im Modell entstandenen Ereignisse lassen sich in zwei Darstellungskategorien untergliedern:

- **Zustandsereignisse** kennzeichnen den Zustandswechsel eines Aggregats oder eines Transportsystems. Die Zustandsdaten dienen elementbezogenen Auswertungen wie beispielsweise der Berechnung der Auslastung einer Komponente.
- **Materialflussereignisse** werden bei jeder Bewegung eines Behälters von einem Element zum nächsten vermerkt. Dadurch werden die wichtigen Verläufe des Eingangs und des Ausgangs an den Grenzen jedes Systems erfasst. Auf dieser Basis werden beispielsweise Durchlaufzeiten ermittelt.

Das Definieren und das Auswählen der statistischen Darstellungsformen werden durch einen **Statistik-Assistenten** unterstützt. Dieser Assistent bietet vordefinierte Statistiken an, die nach Beendigung eines Experiments für jeden Bereich, jedes Aggregat, jedes Transportsystem oder jeden Puffer ermittelt werden können. Er bietet außerdem die Möglichkeit, aus diesen vordefinierten Statistiken nur einige auszuwählen, die durch eine Referenz auf die jeweilige Komponente berechnet und dargestellt werden.

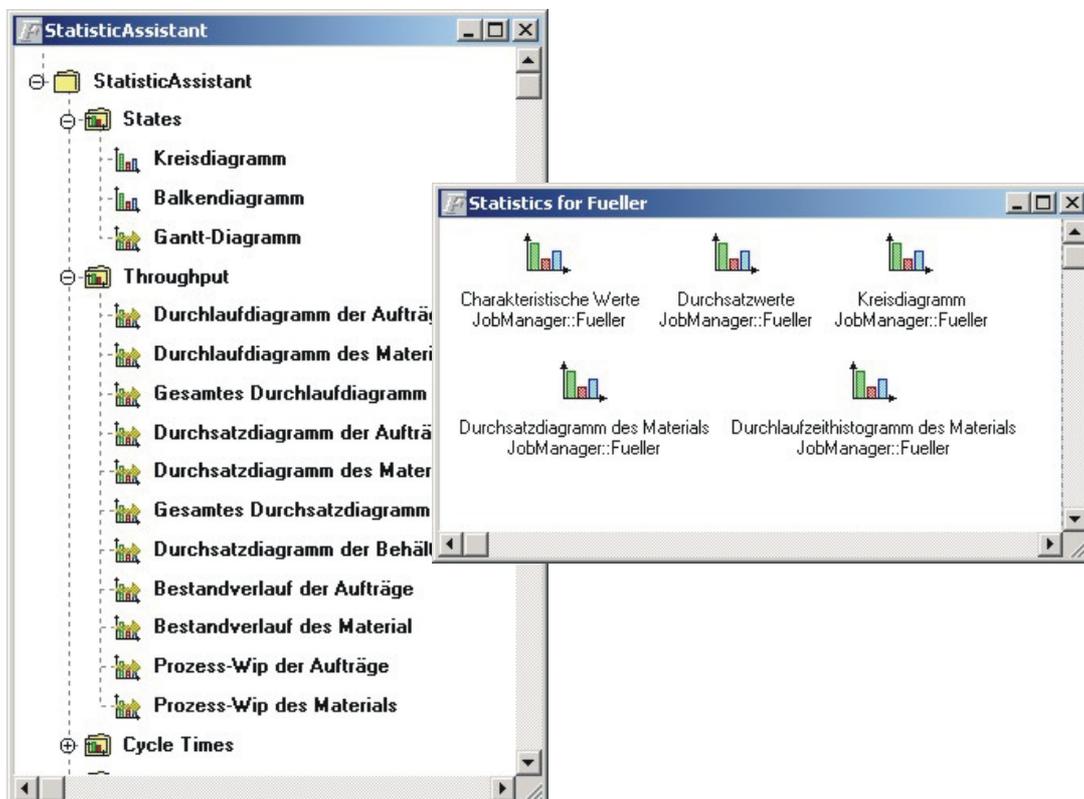


Abbildung 60: Der Statistik-Assistent mit einer Auswahl an Darstellungsformen

Tabelle 6: Auswahl an statistischen Darstellungen

Statistische Darstellungen	Beschreibung
<b>Kreisdiagramm</b>	Für Transportsysteme und Aggregate werden die Zeitanteile der angetroffenen Zustände prozentual graphisch angezeigt.
<b>Durchlaufzeitdiagramm</b>	In dieser Grafik werden die Zeitpunkte der eingegangenen und der ausgegangenen Behälter in einer Komponente dargestellt. Weiterhin wird der Bestandsverlauf über die Simulationszeit angezeigt.
<b>Histogramm der mittleren Durchlaufzeit</b>	In diesem Balkendiagramm wird die Differenz der maximalen und minimalen Durchlaufzeit in Intervalle unterteilt und anschließend die Anzahl der Durchlaufzeiten ermittelt, die in die einzelnen Intervalle fallen.
<b>Diagramm des mittleren Durchsatzes</b>	Hier wird der mittlere Durchsatz eines Aggregates oder Transportsystems errechnet und grafisch dargestellt.
<b>Charakteristische Eigenschaften</b>	In tabellarischer Form werden die Kennwerte über die Auslastung und die Verfügbarkeit eines Aggregats oder eines Transportsystems aufgelistet.
<b>Kennwerte des Durchsatzes</b>	Tabellarisch werden die Kennwerte des Durchsatzes und des Bestandes eines Aggregats zusammengefasst.
<b>Nutzungskennwerte</b>	Mit Hilfe dieser Grafiken können die Auslastungen eines Aggregats oder Bereichs beim Variieren einiger Parameter dargestellt werden.

### 7.1.4 Verwendung der Simulationsergebnisse

Nachdem das Modell aufgebaut und die Simulationsexperimente definiert und durchgeführt wurden, sind die gewonnenen, statistischen Daten zu analysieren. Daraus können neue Erkenntnisse über die statische Dimensionierung und das dynamische Verhalten des Modells gesammelt werden, um sie zurück auf das reale System zu übertragen.

Das Kreisdiagramm oder die Tabelle der charakteristischen Eigenschaften in der nachfolgenden Abbildung zeigt exemplarisch die verschiedenen Zustände des Aggregats an. Mit deren Hilfe kann herausgestellt werden, wie hoch die über die Simulationszeit erreichte Auslastung des Aggregats liegt und welche anderen Zustände die Komponenten angenommen haben.

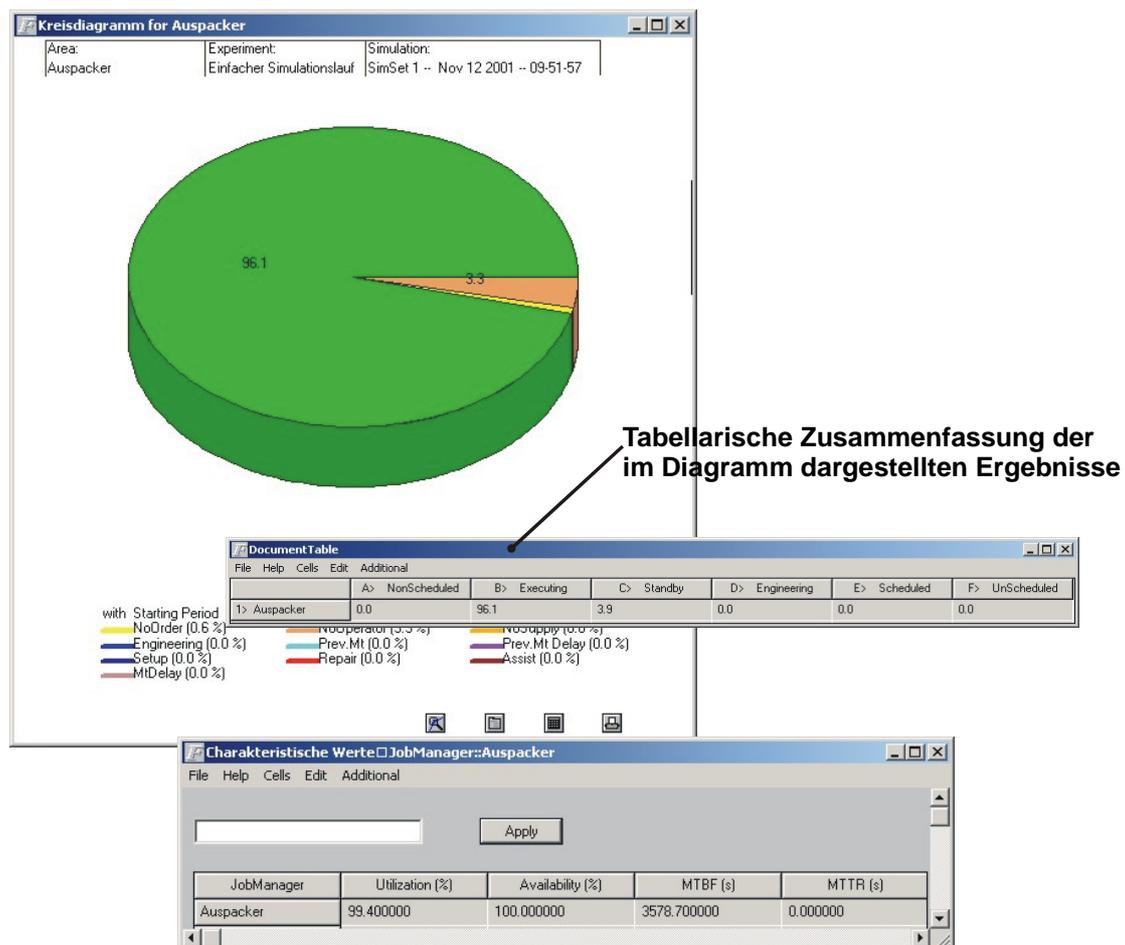


Abbildung 61: Kreisdiagramm und Tabelle der charakteristische Werte

Falls der Zustand „Materialmangel“ nur selten vorliegt, aber dagegen der Zustand „in Betrieb“ auf unerklärliche Weise ebenfalls selten ist, dann kann es z.B. daran liegen, dass das Aggregat aufgrund seiner niedrig eingestellten Leistung die Behälter nicht schnell genug abgibt. Daher muss seine Leistung bei den nächsten Simulationsexperimenten neu parametrisiert werden.

Ein wichtiges Kriterium bei der Realisierung und Nutzung von Abfüllanlagen ist das Erreichen des geplanten Durchsatzes. Mit Hilfe der Simulationsexperimente können die Werte der mittleren Durchsätze Aufschluss darüber geben, ob diese Anforderungen durch die vorgenommene Parametrierung im Simulationsmodell erfüllt wurden. Dabei haben mehrere Größen gleichzeitig Einfluss auf den Durchsatz eines Aggregats. Dazu gehören die eingestellte Leistung des Aggregats selber sowie die Parameter der vor- und nachgeschalteten Komponenten, wie z.B. die Aufnahmekapazität des nachfolgenden Transporteurs.

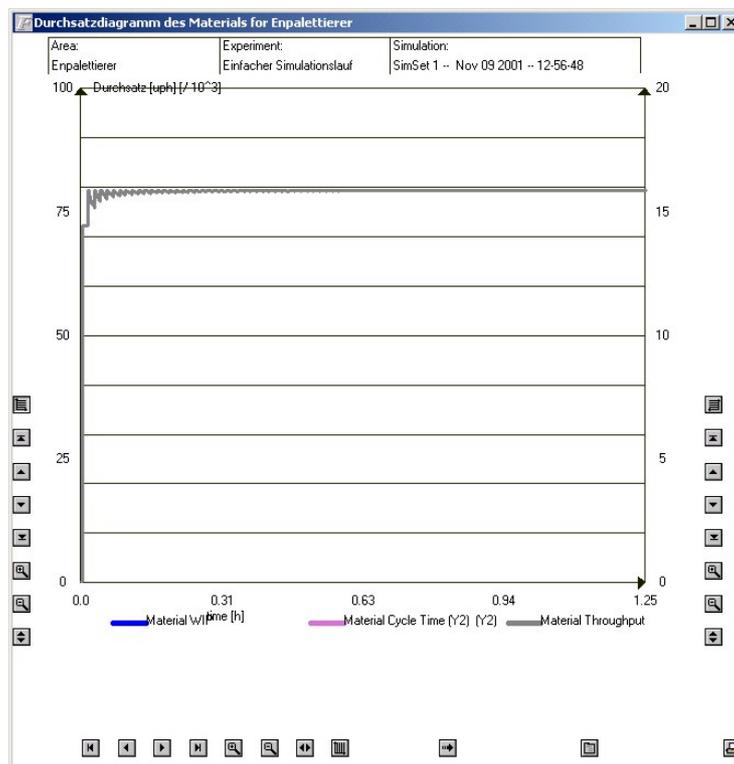


Abbildung 62: Diagramm des mittleren Durchsatzes

Falls die Aggregate so dimensioniert wurden, dass sie die gewünschte Ausbringung erreichen können, müssen die Ursachen des niedrigen Durchsatzes bei den

benachbarten Komponenten liegen. In einem störungsfreien Betrieb eines Aggregats kann das Verfehlen des gewünschten Durchsatzes in der Regel zwei Gründe haben:

- Der Stau vor dem Aggregat hat sich so schnell aufgelöst, dass die nachkommenden Behälter ihn nicht mehr erreichen konnten. Der Grund dafür kann bei der Einstellgröße des Transportsystems, d.h. seiner Geschwindigkeit oder seiner Kapazität, liegen.
- Der Strom nach dem Aggregat hat so sich zurückgestaut, so dass dieser außer Betrieb gehen musste. Dieses Verhalten kann entweder durch eine falsche Parametrierung des nachgeschalteten Transportsystems oder des benachbarten Aggregats ausgelöst werden.

Daher dürfen die Untersuchungen nicht nur auf ein Aggregat beschränkt bleiben, sondern müssen auch auf die angrenzenden Transportsysteme miteinbeziehen. Dafür können die angebotenen statistischen Methoden behilflich sein. Anhand des Durchlaufzeitdiagramms kann die aus der Simulation gewonnene Verweildauer des Behälters mit dem Wert verglichen werden, der beim Parametrieren des Transportsystems eingegeben wurde. Somit kann die Entstehung eines Engpasses nachvollzogen werden.

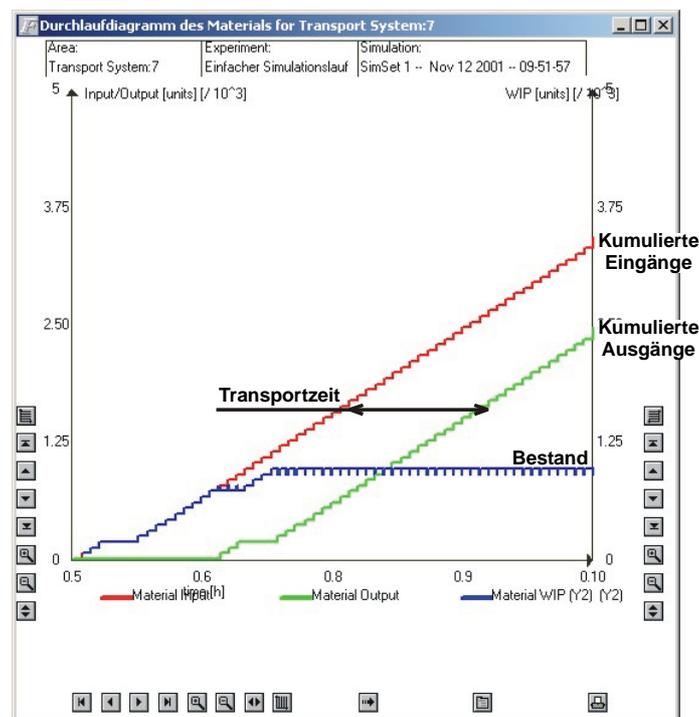


Abbildung 63: Durchlaufdiagramm eines Transportsystems

Weiterhin kann mit dem in der vorherigen Abbildung angezeigten Bestandsverlaufs überprüft werden, ob die eingestellte Aufnahmekapazität des Transportsystems über die Simulationszeit ausgeschöpft wurde oder ob diese zu groß ausgelegt wurde. Diese Erkenntnisse bieten die Möglichkeit, die durch die statische Methode errechneten Kenngrößen der Transporteure zu korrigieren.

Neben den Aggregaten und den Transportsystemen soll auch die Funktion der eingesetzten externen Puffer, wie die Reglerpuffer, analysiert werden, insbesondere die des Nassbereichs. Anhand des Durchlaufzeitdiagramms und des Histogramms der mittleren Durchlaufzeit kann der Bestandverlauf und die mittlere Verweildauer in diesem Puffer bzw. in dem Transportsystem gewonnen werden. Daraus kann das gesamte Verhalten analysiert und die Einstellgröße geändert werden, um neue Simulationsexperimente starten zu können.

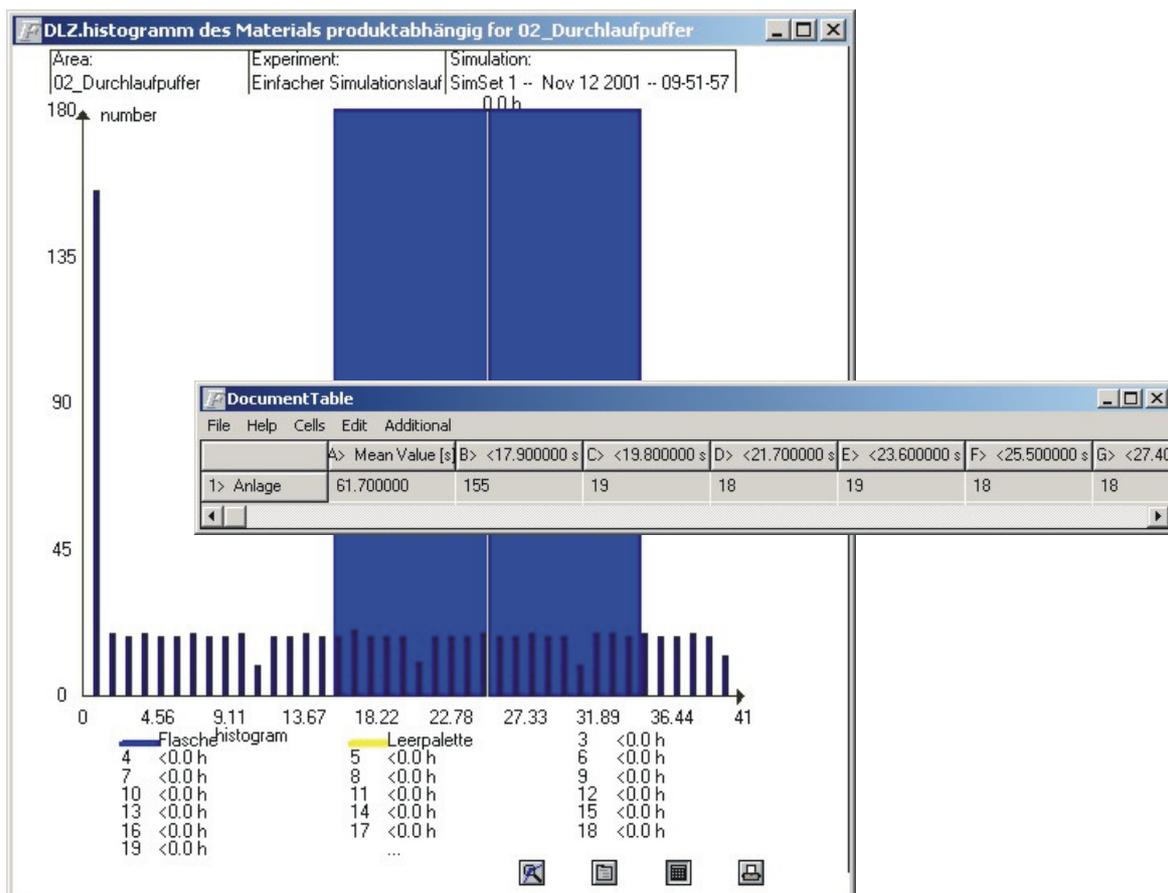


Abbildung 64: Histodiagramm eines Puffer

Wie bereits im Abschnitt 5.6 erwähnt wurde, sind die fördertechnischen Anbindungen zwischen den Aggregaten als eine Folge von Transportsystem und externem Puffer abgebildet. Aus den Histogrammen oder aus den Durchlaufdiagrammen kann jeweils die durchschnittliche Verweildauer eines Behälters auf dem Puffer und auf dem Transportsystem ermittelt werden. Die Summe dieser beiden Verweildauern entsprechen dann der auf der realen Transportstrecke. Wird von dieser Summe die Transportzeit abgezogen, so wird die erreichte Pufferzeit eines Behälters festgestellt.

Die aus der Simulation gewonnenen Werte für die Kapazität und die Verweildauer in den Transportsystemen und Puffern gehen in die zu Beginn der Arbeit in Tabelle 3 aufgelisteten Formeln ein. Die Simulationsergebnisse werden so über die statische Dimensionierung der Transporteure in die Fördergeschwindigkeiten oder in geometrische Größen umgerechnet und auf das reale System übertragen.

Dem Anwender steht eine weitere Möglichkeit zur Verfügung, die eingestellte Kapazität des Transportsystems und des Puffers zu überprüfen, ohne dabei einen Engpass während des Simulationslaufs zu verursachen. Es soll angenommen werden, dass die Transportstrecke zwischen zwei Aggregaten  $M_1$  und  $M_2$  falsch dimensioniert ist. D.h. dass entweder ihre Kapazität oder ihre Fördergeschwindigkeit nicht ausreichend ist, um die von dem Aggregat  $M_1$  abgegebenen Behälter aufzunehmen und zum zweiten Aggregat  $M_2$  rechtzeitig zu transportieren. Aufgrund der Überfüllung dieser Transportstrecke bildet sich ein Rückstau, der dazu führt, das erste Aggregat in einen gestörten Zustand zu versetzen. Nun stellt sich die Frage, wie groß oder wie schnell die Transportstrecke dimensioniert werden soll.

Um die Dimensionierung des Transportsystems und des Puffers auf ihre Richtigkeit zu untersuchen, wird die Aufnahmekapazität des Aggregats  $M_1$  bzw. des Ausgangspuffers erhöht (siehe Abschnitt 5.5). Beim Erreichen der maximalen Transport- und Pufferkapazität können die fertig bearbeiteten Behälter aufgrund der falschen Dimensionierung nicht auf das Transportsystem umgesetzt werden und bleiben somit im Ausgangspuffer des Aggregats. Somit wird der kontinuierliche Betrieb des Aggregats und die nachfolgenden Komponenten nicht unterbrochen. Mit Hilfe des Bestandsverlaufs des Ausgangspuffers kann die Anzahl an Behälter festgestellt werden, die auf das Freiwerden des Transportsystems im Ausgangspuffer gewartet haben. Weiterhin kann aus den im Histogramm dargestellten Daten die durchschnittliche Verweildauer ermittelt werden, während

dessen ein Behälter auf das Transportieren zum nächsten Aggregat im Wartezustand war.

Um diese Überprüfung durchführen zu können, war es notwendig, die Kapazität des Ausgangspuffers zu ändern. Dies bedeutet eine Spezifikationsänderung des Aggregats, die öfter unternommen werden kann. Um das häufige Eingreifen in die interne Struktur des Aggregats zu vermeiden, kann diese Änderung am Hilfsbaustein „Transporteur“ vorgenommen werden, der im Simulationsmodell direkt nach dem Aggregat eingebaut wird und keinen Einfluss auf das dynamische Verhalten hat. Diese Methode führt zum gleichen Ergebnis und verhindert eine eventuelle Verfälschung der Aggregatseinstellungen.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit besteht darin, nur bestimmte Aggregate auf ihr Verhalten zu untersuchen. Es wird dadurch erreicht, dass die nicht betroffenen Aggregate absichtlich außer Betrieb gesetzt werden. Diese Möglichkeit wird zuerst durch die vorgenommene Abbildung der Aggregate als eigenständige Bereiche erreicht. Wird weiterhin die Kapazität des zwischen zwei Aggregaten befindlichen Puffers vielfach bzw. unendlich eingestellt, kann somit die Bildung eines Rückstaus verhindert werden und somit der kontinuierlichen Betrieb der davor gelegenen Komponenten gesichert werden.

## 8 Zusammenfassung

Getränkeabfüllanlagen stellen den Kern jeder Getränkeherstellungsfabrik dar. Sie gehören heutzutage zu den höchst automatisierten Anlagen. Daher werden an sie sehr hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit gestellt. Diese Eigenschaften erschweren die Planung und die Nutzung solcher Anlagen. Ziel dieser Arbeit ist die Simulationstechnik dazu zu verwenden, diese Aufgaben durch ein Rechnermodell zu erleichtern.

In einem ersten Schritt wurde eine ausführliche Analyse solcher Anlage durchgeführt. Sie diente dazu, einen ersten Gesamtüberblick über den Aufbau und die Merkmale der Abfüllanlagen zu geben. In diesem Abschnitt wurden außerdem die möglichen Unterschiede deren Funktionen aufgezeigt. Um dann die Funktionalität und damit die verbundenen Problemfelder solcher Anlagen verstehen zu können, wurden verschiedene Aggregate und ihre fördertechnischen Anbindungen beschrieben sowie deren Zusammenhänge dargestellt. Abschließend wurden verschiedene Regelungsmöglichkeiten der Aggregate und der Transportstrecken erläutert.

Mit Hilfe der vorgenommenen Systemanalyse konnten dann mehrere Anforderungen gestellt werden, die der Einsatz der Simulation erfüllen soll. Dabei spielt nicht nur die Abbildungsart eine Rolle, sondern auch die Benutzerfreundlichkeit beim Aufbauen von Modellen und bei Auswerten der Ergebnisse.

Im Abschnitt „Abbildung einer Abfüllanlage“ wurde nach einer kurzen Einführung in der Abbildungsmethodik die ersten Schritte zur Modellbildung unternommen. Basierend auf Standardmethoden wurden die verschiedenen Komponenten einer Abfüllanlage gedanklich abstrahiert und abgebildet. Es wurde eine Gliederung der verschiedensten Aggregaten aufgestellt, um eine mögliche Standardisierung in ihrer Funktion und ihrem internen Aufbau zu finden. Dabei wurden die für die Simulation notwendigen Daten und Parameter aufgezeigt. Weiterhin wurden die abgebildeten Aggregate in die hierarchische Struktur des gesamten Modells eingefügt.

Die Abbildung der Fördertechnik wurde in zwei Phasen durchgeführt: die Fördertechnik im Trockenbereich und die im Nassbereich. Dies ist auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Transportstrecken und Fördergüter

zurückzuführen. Es wurde versucht, mit einfachen Methoden die Transportverbindung des Trockenbereichs und deren Regelungen abzubilden und diese weiter für den Nassbereich zu verwenden. Im Hinblick auf die hohe Menge an beweglichen Elementen war es notwendig, das Verhalten solcher Abbildungen zu untersuchen. Dabei ist das Konzept entstanden, die Flaschen nicht einzeln, sondern in sogenannten Sammelbehälter zu transportieren. Dies ist damit zu begründen, dass ihre große Anzahl die Simulationsgeschwindigkeit stark beeinträchtigen würde. Die unternommenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendungen der Sammelbehälter im Nassbereich keinen Einfluss auf das dynamische Verhalten hat.

Nach der Abbildung des gesamten Systems „Abfüllanlage“ und ihrer Komponenten konnte dann auf dem Rechner mit der Implementierung begonnen werden. Basierend auf der aufgestellten Klassifizierung der Aggregate und der Abbildungsweise der Transportstrecken wurde dann eine Bausteinbibliothek aufgebaut, die alle im Abschnitt 5 beschriebenen Eigenschaften der Aggregate beinhaltet. Diese Bibliothek kann auf einfache Weise durch einen Anwender zu einer spezifischen Bibliothek erweitert werden. Weiterhin wurde ausführlich beschrieben, wie diese Bibliothek dazu verwendet wird, eine komplette Anlage aufzubauen. Abschließend wurde die Vorgehensweise zum Erstellen eines lauffähigen Modells erläutert. Dazu gehört nicht nur das Einsetzen der Komponenten aus der vordefinierten Bibliothek sondern auch das Definieren der Produkte und der Behälter und das Spezifizieren der Arbeitsreihenfolgen.

Im letzten Abschnitt „Experimentieren und Auswerten“ wurde zwei Assistenten vorgestellt, die den Anwender behilflich sind, Experimente durchzuführen und Ergebnisse statistisch auswerten zu können. Zum Experimentieren können verschiedene Arten von Simulationsläufen definiert werden. Zum Beispiel können mehrere Modelle durch das Verwenden einer einzigen Auftragsliste miteinander verglichen werden. Der Statistik-Assistent stellt eine Auswahl an verschiedenen statistischen Darstellungsmethoden zu Verfügung, die dazu dienen, den Durchsatz, den Bestandverlauf oder die Auslastungen der Aggregate, der Transportstrecken und der Puffer zu erfassen. Anhand dieser Daten können dann Aussagen über die statische Dimensionierung sowie über das dynamische Verhalten der einzelnen Komponenten oder das gesamten Anlage getroffen werden.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Abbildung einer gesamten Abfüllanlage und deren Komponenten wurde ohne Bezug auf ein bestimmtes Simulationswerkzeug aufgestellt. Dies bedeutet, dass sie als Ausgangsbasis zur Modellierung mit jedem beliebigen Werkzeug verwendet werden kann. Solche Simulationswerkzeuge können aber untereinander mehrere Unterschiede aufweisen. Daher können verschiedenen Restriktionen entstehen oder es müssen mehrere Annahmen getroffen werden, die aber genau überprüft werden müssen, um eine Verfälschung des dynamischen Verhaltens zu vermeiden, wie z.B. die Abbildung der Transportverbindungen im Nassbereich und ihre Auswirkung auf die abgebildeten Aggregate.

Im Trockenbereich handelt sich um eine Standard-Materialflusstechnik, die mit herkömmlichen diskreten Simulationswerkzeugen modelliert werden können. Im Gegensatz dazu stehen die Transportstrecken im Nassbereich. Ein solcher Transport kann zum einen nicht mit der konventionellen Stückgut-Fördertechnik verglichen und zum anderen nicht ohne starke Abstraktion mit der diskreten Materialflusssimulation aufgebaut werden. Daher sollten neue Abbildungsmethoden entwickelt werden, um solche fördertechnische Verbindungen weiterhin auf eine einfache und zugängliche Art, aber auch ohne große Vereinfachungen realisieren zu können.

Eine Alternative besteht darin, den Flaschentransport nicht als Bewegung einzelner Behälter, sondern als die eines Pulks anzusehen. Die Flaschen bilden zwischen den Aggregaten immer einen beweglichen Pulk, der zwar eine feste Breite, aber eine variable Länge hat. Die Breite ist durch die Dimensionen einer Förderstrecke begrenzt. Die Länge ist aber von der Zustandsänderung der Komponenten abhängig. Somit ist ein Pulk durch zwei Parameter, die Breite und die Länge, klar definiert. Daher ist die Abbildung der beiden Enden eine sinnvolle Lösung für die Simulation des Nassbereichs. Bei jeder Zustandsänderung oder beim Eintreffen eines neuen Ereignisses wird ein neuer Pulk bzw. zwei neuen Enden definiert. Um die Anzahl der Flaschen in einem Pulk zu ermitteln, wird dann die Fläche zwischen den beiden Enden berechnet.

Weiterhin ist es zu überlegen, ob die diskrete Simulation zur Abbildung des Flaschentransport im Nassbereich sinnvoll ist. Die Art des Förderns in diesem Bereich gleicht stark einem Schüttguttransport oder einer Flüssigkeitsbewegung. Hier kommen kontinuierliche Simulationssysteme, die nicht die Bewegung der einzelnen Elemente, sondern nur die Zustandsänderungen abbilden, zum Einsatz.

## 9 Literaturverzeichnis

- [Capi-94] W. Capito: „Anlagenregelung und Datenerfassung bei komplexen Flaschenabfüllkolonnen“  
Zeitschriftenartikel: Brauindustrie 2/94, Seiten 107-113
- [DIN 8782] DIN 8782: „Begriffe für die Abfüllanlagen und einzelne Aggregate“  
Mai 1994
- [Foit-00] B. Foitzik: „Abfüllanlagen für die Getränkeindustrie“  
Verlag Moderne Industrie 2000
- [Gold-99] R. Goldbrunner: „Systemanalyse des Trocken- und Nassbereiches von Getränkeabfüllanlagen“  
München: Technische Universität, Diplomarbeit 1999]
- [Günth-97] W. A. Günthner, A. Kumpf, M. Haller: "Auswahl von Simulations-Software: Auf den Verwendungszweck kommt es an."  
Fördern und Heben 47 (1997), Nr. 3, Seiten 130-134
- [Günth-98] W. A. Günthner, M. Haller, F. Stegherr: „Simulation projektbegleitend nutzen“  
Zeitschriftenartikel: In Fördern und Heben 48 (1998), Nr. 1-2: Logistikspektrum 10 (1998), Nr. 1, Seiten L4 – L7
- [Ha-97] M. Haller, M. Nemmer: "Anforderungsgerechte Modellbildung zum projektbegleitenden Einsatz der dynamischen Materialfluß-Simulation"  
Tagungsbeitrag ASIM-Symposium 1997, erschienen in Fortschritte in der Simulationstechnik, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1997
- [Hard-95] K. Harder: „Simulation: Pro und Contra“  
Zeitschriftenartikel: F+H Fördern und Heben, Heft 45 Nr. 3, 1995, S.145-147
- [Knei-96] A. Kneißl: „Exakte Planung erforderlich“  
Zeitschriftenartikel: Getränkeindustrie 5/96, Seite 320-325
- [Knep-96] L. Knepper: „Simulation: Vom reinen Planungswerkzeug zum Betriebsführungs-Instrument“  
Zeitschriftenartikel: Fördern und Heben Heft 46, 1996, Seiten 158-159
- [Kost-95] J. Kosturiak, M. Gregor: „Simulation von Produktionssystemen“  
Springer-Verlag 1995

- [Krones] Krones: Prospekte und Informationsmaterial der Fa. Krones
- [Kuhn-96] A. Kuhn: „Simulationstechnik als Planungsinstrument“  
Zeitschriftenartikel: dhf 11/96, Seiten 41-42
- [Lück-97] Peter Lück: Praktikum Simulationstechnik  
München: Technische Universität, Diplomarbeit 1997
- [Pete-93] H. Petersen: „Brauereianlage“  
Verlag Hans Carl, Getränke-Fachverlage 1993
- [Prob-82] W. Probst: „Planung lärmarmen Transportsysteme für Flaschen und Gläser“  
Dortmund 1982: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Forschungsbericht Nr. 313
- [Rädl-99] T. Rädler: „Modellierung und Simulation von Abfülllinien“  
München : Technische Universität, Dissertation 1999
- [Rein-97] G. Reinhart, K. Feldmann: „Simulation – Schlüsseltechnologie der Zukunft ? Stand und Perspektiven“  
München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 1997
- [Saue-99] T. Sauerbier: „Theorie und Praxis von Simulationssystemen“  
Wiesbaden: Vieweg, 1999
- [Unte-96] K. Unterstein: „Kriterien bei der Konzeption einer Abfüllanlage“  
Zeitschriftenartikel: Brauwelt 12/1996, Seiten 546-549
- [VDI 3633  
Blatt 1] VDI-Richtlinien: „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen“  
Dezember 1997
- [VDI 3633  
Blatt 3] VDI-Richtlinien: „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Experimentplanung und -auswertung“  
Dezember 1997
- [VDI 3978] VDI-Richtlinien: „Durchsatz und Spielzeiten in Stückgut-Fördersystemen“  
August 1998