

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik

Fehlerlokalisierung in verketteten Produktionslinien
am Beispiel von Lebensmittelverpackungsanlagen

Axel E. H. Kather

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. K. Sommer

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. H.-Chr. Langowski
2. Univ.-Prof. Dr. A. Delgado
(Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg)
3. Univ.-Prof. Dr. J.-P. Majschak
(Technische Universität Dresden)

nur schriftliche Beurteilung

Diese Dissertation wurde am 09.03.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 21.04.2009 angenommen.

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (früher: Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik) des Wissenschaftszentrums Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München in der Zeit vom Juli 2003 bis März 2008.

Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dabei gilt mein Dank zunächst Prof. Dr.-Ing. Horst Weisser, der den Mut oder die Weitsicht hatte, mich im Juli 2003 als wissenschaftlichen Mitarbeiter des damaligen Lehrstuhls für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik einzustellen und der auch nach seiner Pensionierung meine Arbeit jederzeit mit großem Interesse verfolgt hat und für Fragen zur Verfügung stand. Sein Vertrauen und seine positive Grundhaltung waren für mich jederzeit motivierend und hilfreich.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Horst-Christian Langowski, der mir als neuer Ordinarius des in Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik umbenannten Instituts ermöglicht hat, diese Arbeit in einer einzigartigen Atmosphäre durchzuführen. Die von seinem Vertrauen zu den Mitarbeitern geprägte Freiheit zur Selbstorganisation in Arbeit und Forschung in einem abgesicherten Umfeld hat es mir ermöglicht, eigene Ideen und Vorstellungen zu verfolgen und umzusetzen. Seine Offenheit in Gesprächen, die Bereitschaft zur Diskussion über fachliche sowie gesellschaftliche Fragen, häufig auch noch spät am Abend, haben dazu beigetragen, dass mir die Zeit am Lehrstuhl auch menschlich in sehr positiver Erinnerung bleiben wird.

Auch meinen weiteren Prüfern Herrn Prof. Dr.-Ing. Antonio Delgado und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak sowie dem Prüfungsvorsitzenden Prof. Dr.-Ing. Karl Sommer danke ich für die Übernahme des jeweiligen Amts. Es freut mich dabei besonders, dass diese Ämter durch Personen bekleidet werden, die mich während meines Studiums und in der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter beeinflusst und geprägt haben.

Herrn Prof. Dr. Peter Struss und seinen Mitarbeitern der Gruppe Model-Based Systems & Qualitative Reasoning des Lehrstuhls für Informatik IX der TU München (MQM) sowie Herrn Christian Haufe vom Fraunhofer-Anwendungszentrum für Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik in Dresden danke ich für die Zusammenarbeit im Projekt LineMod, dessen Ergebnisse einen wesentlichen Teil der vorliegenden Arbeit ausmachen.

Außerdem möchte ich allen Studenten, die mich im Rahmen ihrer Studien- und Diplomarbeiten oder als Hiwi unterstützt haben, meinen Dank aussprechen. Ohne sie wäre die Anfertigung meiner Arbeit in der vorliegenden Form sicher nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt dabei meinen Diplomanden Georg Wenk für die engagierte Arbeit bei der Pilotanlagen- und Sensorentwicklung, Dominik Schneider für die Unterstützung bei der Modellerstellung und -validierung sowie Michael Weissgerber für die unermüdliche Arbeit bei der Beschreibung und Programmierung der entwickelten Algorithmen. Den damaligen Studenten Andreas Gaube, Stefan Heinrich und Stephan Eichhorn möchte ich für Ihren Beitrag zu dieser Arbeit

ebenso danken wie allen anderen Diplom- und Studienarbeitern, die mich bei anderen Projekten unterstützt haben. Hervorzuheben ist sicherlich noch das Engagement meines langjährigen Hiwis Matthias „Tissi“ Ebner, der in seiner unvergleichlichen Art auf das Leben am Lehrstuhl Einfluss genommen hat.

Ein großer Dank gilt den Mitarbeitern des Lehrstuhls für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung sowie für die familiäre Atmosphäre. Frau Birgit Piechotta danke ich dafür, dass sie dafür gesorgt hat, dass ich weitgehend von unangenehmer Verwaltungsarbeit verschont wurde. Herrn Rudolf Grabrucker und Prof. Dr.-Ing. Heiner Vogelpohl möchte ich dafür danken, dass sie mich an ihren umfassenden Erfahrungen aus allen Bereichen der Brauereianlagen teilhaben ließen und auch für Gespräche und Diskussionen jederzeit zur Verfügung standen. Bei Dr.-Ing. Tobias Voigt und den anderen Mitgliedern des IT-Teams des Lehrstuhls, André Sorgatz und Christoph Nophut sowie den „Neuen“ Stefan Flad und Sven Franke bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit, die konstruktive Kritik und die Unterstützung der Arbeit durch ihren unermüdlichen Einsatz bei der Simulation von Abfüllanlagen, Hilfe bei Datenbankproblemen und allen weiteren Bausteinen, die als Basis für das Gelingen einer wissenschaftlichen Arbeit unverzichtbar sind.

Eine besondere Rolle in meiner Zeit am Lehrstuhl spielten meine beiden „Leidensgenossen“, die Doktoranden Florian Loibl und Tobias Richter. Ihre Freundschaft und Unterstützung hat mich auch in erfolglosen Zeiten davor bewahrt, die Motivation zu verlieren. Ich möchte Euch an dieser Stelle für die schöne Zeit, die vielen diskussionsreichen Abende in einer Atmosphäre, die wohl nur unter Brauern und Lebensmitteltechnologern möglich ist, die zahlreichen gemeinsamen Feste und Aktionen mit unseren Studenten sowie die permanente Rückendeckung und Unterstützung von ganzem Herzen danken!

Auch meiner Familie möchte ich an dieser Stelle danken. Der unerschütterliche Glaube meiner Mutter Ingeborg daran, dass ich immer alles richtig mache, war für mich bei meinem bisherigen Lebensweg genauso prägend wie die bedingungslose Unterstützung durch meine Geschwister Insa, Lutz und Jochen.

Widmen möchte ich diese Arbeit meinem Vater Lutz, der mich wie kein Zweiter beeinflusst hat und leider viel zu früh verstorben ist.

Inhaltsverzeichnis

<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>VII</i>
<i>Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole</i>	<i>IX</i>
1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Theoretische Grundlagen, Stand der Technik und Methodenauswahl	5
2.1 Abfüll- und Verpackungsanlagen	5
2.1.1 Aufbau von Abfüll- und Verpackungsanlagen	5
2.1.2 Informationstechnologie (IT) in Lebensmittelverpackungsanlagen	10
2.2 Mathematische Modellierung verketteter Linien	20
2.3 Wissensbasierte Systeme	22
2.3.1 Definition und Aufbau wissensbasierter Systeme	22
2.3.2 Erfahrungswissensbasierte Methoden	23
2.3.3 Fallbasierte Methoden	29
2.3.4 Modellbasierte Methoden	33
2.3.5 Hybride Systeme	38
2.4 Methodenauswahl	39
3. Entwickelte Methoden zum Schaffen einer Datenbasis	41
3.1 Methodik und Standardisierung der Datenerfassung	41
3.1.1 Weihenstephaner Standards für die Betriebsdatenerfassung bei Getränkeabfüllanlagen (WS)	42
3.1.2 Erweiterung der Standardisierung auf Verarbeitungs- und Verpackungsmaschinen der Lebensmittelindustrie	46
3.1.3 Festlegen der Datenpunkte für die Diagnose	52
3.2 Verbreitung der standardisierten Datenerfassung	54
3.3 Statistische Untersuchungen zur Erfassung der Objektströme und Anlagenparameter	57
3.3.1 Direkte Messung der Objektströme	57
3.3.2 Parameterabschätzung für Transporteure	59
3.4 Sensorsysteme zur Verbesserung der Datenqualität	61
3.4.1 Beschreibung der Versuchsanlage zur Entwicklung von Sensoren und Sensorsystemen	61
3.4.2 Kombination von Einzelsensoren zu Sensorsystemen	62
3.4.1 Untersuchung komplexer Einzelsensoren	67
3.5 Testdatengenerierung	68

3.5.1	Datenerfassung an realen Beispielanlagen	68
3.5.2	Simulationsmodelle	70
4.	<i>Ergebnisse der Modellierung und Algorithmisierung</i>	72
4.1	Mathematisches Basismodell zur Stillstandsfortpflanzung	72
4.1.1	Einfache Störungen	72
4.1.2	Störungen an parallelen Maschinen	77
4.1.3	Weitere Aspekte	79
4.2	Modelle und Algorithmen für die Diagnose von Abfüll- und Verpackungsanlagen	81
4.2.1	Erfahrungswissenbasierter Ansatz	81
4.2.2	Modellbasierte Diagnose	100
5.	<i>Ergebnisse zur Methodvalidierung und Diskussion</i>	117
5.1	Sensorsystem zur Objektzählung	117
5.1.1	Ergebnisse und Bewertung	117
5.1.2	Diskussion zu 5.1	118
5.2	Simulationsstudien des Komponenten-orientierten Modells	120
5.2.1	Ergebnisse der Einzelkomponenten	120
5.2.2	Ergebnisse des komplexen Modells aus Einzelkomponenten	121
5.2.3	Bewertung des Komponenten-orientierten Modells auf Basis der Anforderungen aus Kapitel 2.2	127
5.2.4	Diskussion zu 5.2	130
5.3	Methoden zur Fehlerlokalisierung	131
5.3.1	Erfahrungswissenbasiertes System	132
5.3.2	Modellbasierte Diagnose	140
5.3.3	Vergleich der entwickelten Methoden zur Fehlerlokalisierung mit der KNN-Methode von VOIGT ET AL.	143
5.4	Vergleich der unterschiedlichen Stillstandsauswertungen und wirtschaftliches Potential der Diagnose zur Fehlerlokalisierung	146
5.4.1	Ergebnisse und Bewertung	146
5.4.2	Diskussion zu 5.4	150
6.	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	153
7.	<i>Literaturverzeichnis</i>	157
8.	<i>Anhang</i>	173
	<i>Lebenslauf</i>	241

Abkürzungsverzeichnis

BDE	Betriebsdatenerfassung
BDES	Betriebsdatenerfassungssystem
CAD	Computer Aided Design
CBR	Case-Based-Reasoning
CCD	Charge Coupled Device
CE	Komponente Combine Element
CPU	Central Processing Unit
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection
DAG	Directed Acyclic Graph, azyklischer gerichteter Graph
DDE	Default-based Diagnostic Engine
DIN	Deutsches Institut für Normung
E/A	Ein- / Ausgänge
EN	European standards for products and services bzw. Europäische Normen
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FIFO	First In First Out
GDE	General Diagnostic Engine
G ⁺ DE	Generalized Diagnosis Engine
ID	Identifikator bzw. Identifikationsnummer
ISO	International Standardisation Organisation
IT	Informationstechnologie
KNN	Künstliches Neuronales Netz
LIFO	Last in First Out
LIMS	Labor-Information-Management-System
LS_01	Lichtschranke 01
MDT	Mean Downtime
MES	Manufacturing Execution System
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Association
MT	Komponente Material Transporter
MTBF	Mean Time Between Failure
NRW	Nordrhein-Westfalen
OMAC	Open Modular Architecture Control
OSI	Open Systems Interconnection
PC	Personal Computer
PET	Polyethylenterephthalat
PLib	Abkürzung des Wortes Product Library und Synonym für die ISO 13584
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SBA	Structure Based Abduction
SE	Komponente Separate Element
SQL	Structured Query Language
TC	Komponente Transportation Connector

UML	Unified Modeling Language
WS	Weihenstephaner Standards für die Betriebsdatenerfassung bei Getränkeabfüllanlagen
WS_	Präfix eines Standarddatenpunkts nach WS
XML	Extensible Markup Language
Z_FP	Zähler Flaschenpulk

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Allgemeine Mathematik und Logik

$\exists x$		Existenzquantor (es existiert ein x (, für das gilt...))
	$\exists x \in A$	es existiert (mindestens) ein x, das Elemente von A ist (und für das gilt...)
$\forall x$		Allquantor (für alle x (gilt...))
	$\forall x \in A$	(für) alle x, die Elemente von A sind (, gilt...)
\perp		Widerspruch, Inkonsistenz
\vdash		impliziert, ergibt, leitet ab
$\vdash^?$		impliziert?, ergibt?, leitet ab?
\nvdash		impliziert nicht, ergibt nicht, leitet nicht ab
$A \cup B$		Vereinigungsmenge: A vereinigt mit B (oder: Die Vereinigung von A und B) ist die Menge aller Elemente, die in A oder in B enthalten sind
$\neg A$		Negation (nicht A)
$A \wedge B$		Konjunktion (A und B)
$A \vee B$		Disjunktion (A oder B)
$A \rightarrow B$		Implikation (aus A folgt B)
if A then B		Regel: wenn A gilt, gilt auch B
$\min(x, y, \dots, z)$		Minimum der Werte x, y, ..., z
$\max(x, y, \dots, z)$		Maximum der Werte x, y, ..., z
$P(x y)$		die Wahrscheinlichkeit, dass, wenn y erfüllt ist, auch x wahr ist

Zeitliche Bezüge (an Stelle temporallogischer Formeln)

t_1, t_2, \dots, t_n		Zeitpunkt 1, 2, ..., n
$t_{\text{start}}(\text{Zustand}(M))$		Startzeitpunkt eines Zustands der Maschine M
$t_{\text{ende}}(\text{Zustand}(M))$		Endzeitpunkt eines Zustands der Maschine M
$\text{Zustand}(M) @ t$		der Zustand der Maschine M zum Zeitpunkt t
$\text{Zustand}(M) @ (t_1, t_2)$		der Zustand der Maschine M in der Zeitspanne zwischen t_1 und t_2
$t[\text{Zustand}(M)]$		Dauer des Zustands der Maschine M
$t_{\text{min}}(M_i/M+1)$		Hilfsgröße: Minimum des Endzeitpunkts einer Störung i an der Maschine M und dem Startzeitpunkt einer Störung an der Maschine M+1

Bezeichner und Symbole

ϵ_r		Dielektrizitätskonstante
A		Menge paralleler MT in einer Ebene
A_B		Fläche eines Transporteurs bzw. Puffers

A_O	Fläche bzw. Projektionsfläche parallel zur Transportfläche eines Objekts
b_B	Breite eines Transporteurs bzw. Puffers
b_s	Breite der Sensoren
d_O	Durchmesser eines Objekts
f	Pufferfüllungsgrad
i	Indexvariable
k, l, m, n	Anzahlvariablen oder -parameter
$K_M / K_M(M)$	Kapazität einer Maschine (max. Anzahl an Objekten in der Maschine) / Kapazität der Maschine M
$K_P / K_P(P+1)$	Kapazität eines Transporteurs bzw. Puffers (sogenannte Pufferkapazität) / Kapazität des Transporteurs/Puffers P+1
l_B	Länge eines Transporteurs bzw. Puffers
l_T	Länge des Wegs auf dem Transportabschnitt
l_{TP}	Länge des Transportwegs unter einem Objekt-Pulk
M	Maschine
$M+1, M+2, \dots, M+n$	Maschine 1, 2 ..., n Positionen nach M
$M-1, M-2, \dots, M-n$	Maschine 1, 2 ..., n Positionen vor M
M_{ab}	Maschine, die einem Puffer/Transporteur nachgeschaltet ist
M_{Down}	Menge paralleler Maschinen im Stillstand
M_{zu}	Maschine, die einem Puffer/Transporteur vorgeschaltet ist
n_0	Anzahl der Objekte, die sich bereits auf dem Transporteur befinden haben
n_{ab}	Anzahl der Objekte, die von dem Transporteur abgeführt werden
n_{ext}	Anzahl der Objekte, die auf dem Transporteur durch andere Ursachen als die verbundenen Maschinen entnommen (-) oder hinzugefügt (+) werden
n_{krit}	kritische Anzahl an Objekten, die ausgeschleust werden kann, ohne dass sich dies auf angrenzende Maschinen auswirkt
n_{max}	Anzahl der Objekte, die insgesamt vom Transporteur aufgenommen werden können; n_{max} entspricht somit der Kapazität des Transporteurs
$n_{M_{Down}}$	Anzahl der Maschinen, für die gilt: $Downtime(M_n)@t[\text{Bereich}_m]$
n_P	Anzahl der Objekte in einem Pulk
$n_{rejected_Objects}$	Anzahl ausgeschleuster Objekte
n_{Rest}	Hilfsgröße zum Berechnen der anteiligen Schuld (Anzahl an theoretisch verfügbaren Objekten pro Berechnungsschritt)
n_{zu}	Anzahl der Objekte, die dem Transporteur zugeführt werden
P	Puffer
$P+1, P+2, \dots, P+n$	Puffer 1, 2, ..., n Positionen nach M
$P-1, P-2, \dots, P-n$	Puffer 1, 2, ..., n Positionen vor M
$P_{B/O}$	typische bzw. objektspezifische Porosität

Q_{est}	Einstellausbringung der Maschine
$Q_{est,leer}$	konstante Einstellausbringung zum automatischen Leerfahren
$Q_{est,leer,m}$	mittlere Ausbringung zum automatischen Leerfahren
$Q_{est,voll}$	konstante Einstellausbringung zum automatischen Vollfahren
$Q_{est,voll,m}$	mittlere Ausbringung zum automatischen Vollfahren
S_m	Abstand der Objektmündungen bei einer dichtesten Packung
S_s	Abstand zwischen den Sensoren
$t_{krit, n}$	kritische Zeit zur Stillstandsfortpflanzung auf nachgeschaltete Maschinen
$t_{krit,n}^*$	kritische Zeit zur Stillstandsfortpflanzung auf nachgeschaltete Maschinen bei einer Blockierung (verminderte K_p)
$t_{krit, v}$	kritische Zeit zur Stillstandsfortpflanzung auf vorgeschaltete Maschinen
$t_{krit,v}^*$	kritische Zeit zur Stillstandsfortpflanzung auf vorgeschaltete Maschinen bei einer Blockierung (verminderte K_p)
t_{leer}	Zeit zum Leerfahren der Maschine
t_M	Bearbeitungszeit für ein Objekt durch eine Maschine M bei störungsfreiem Betrieb
t_T	Transportzeit
t_{tot}	Totzeit des Transporteurs
t_{voll}	Zeit für das automatische Vollfahren der Maschine
t_{VS}	Verzögerungszeit des Sensors
v_T	Geschwindigkeit des Transportabschnitts
Z	Zentralaggregat

Spezielle Formelzeichen und Symbole für den modellbasierten Ansatz

COMPS	Komponenten
GOALS	Zielverhalten des Systems
Interfaces	Schnittstellen der Komponenten
in. A_e	Projektionsfläche der Objekte am Eingang [m^2]
out. A_e	Projektionsfläche der Objekte am Ausgang [m^2]
in. d_0	größte Ausdehnung der Objekte am Eingang in Flussrichtung [m]
out. d_0	größte Ausdehnung der Objekte am Ausgang in Flussrichtung [m]
in. q_{pot}	potentieller Fluss in MT [$\frac{elements}{s}$]
out. q_{pot}	potentieller Fluss aus MT [$\frac{elements}{s}$]
in. q_{act}	aktueller Fluss in MT [$\frac{elements}{s}$]
out. q_{act}	aktueller Fluss aus MT [$\frac{elements}{s}$]
in.type	Objekttyp am Eingang
out.type	Objekttyp am Ausgang
LIB	Verhaltensmodelle

MA	Mode Assignments (Moduzuweisung)
MODEL _{OK}	Modell des korrekten Verhaltens
modes(C_i)	Verhaltensweisen der Komponenten
OBS	Beobachtungen aus dem System
okay ($ok(C_i)$) / ($-ok(C_i)$)	okay-Verhalten / nicht-okay-Verhalten
Parameters	Parameter der Komponente
A_b	Fläche der Komponente [m^2]
c_{por}	Porositätskorrekturfaktor
$f_{in,i}$	Verteilungsfunktion der Objekte an den i Eingängen der Komponente
$f_{out,i}$	Verteilungsfunktion der Objekte an den i Ausgängen der Komponente
QUANT-CONDS	Mengenbedingungen
QUANT-EFFECTS	Mengeneffekte
SD	Systembeschreibung
State Variables	Zustandsvariablen der Objekte
B	gespeicherte Objekte
B_{out}	gespeicherte Objekte, die am Ausgang theoretisch verfügbar sind
Bar_{IN}	mechanische Sperre am Eingang
Bar_{OUT}	mechanische Sperre am Ausgang
v_{in}	Geschwindigkeit des Objektflusses in die Komponente [m/s]
v_{out}	Geschwindigkeit des Objektflusses aus der Komponente [m/s]
t_d	“Totzeit” [s]
STRUCT-CONDS	Strukturbedingungen
STRUCT-EFFECT	Struktureffekte
STRUCTURE	Systemstruktur

1. Einleitung und Zielsetzung

Das Abfüllen und Verpacken von Lebensmitteln ist einer der letzten Schritte in der Wertschöpfungskette bei der Lebensmittelherstellung. Bei den dazu verwendeten Lebensmittelverpackungsanlagen handelt es sich um hochkomplexe, verkettete Fertigungslinien. Die einzelnen Maschinen, die mit Ausbringungen von bis zu 90.000 Packungen pro Stunde arbeiten, können über mehrere Haupt- und Nebenströme miteinander verbunden sein. Sie bestehen aus einer Vielzahl mechanischer und elektronischer Komponenten, was zu einer erhöhten Störfälligkeit führt.

Stillstände sind in Abfüll- und Verpackungsanlagen jedoch nicht nur aus wirtschaftlichen Erwägungen, sondern insbesondere aufgrund des Packguts Lebensmittel zu vermeiden. Schwankende Bedingungen oder Unterbrechungen beim Abfüllprozess wirken sich häufig negativ auf die Qualität der Produkte aus [14], [29]. Hierbei sind neben einer mikrobiellen (Re-) Kontamination vor allem Oxidationsprozesse aufgrund einer übermäßigen Sauerstoffaufnahme die qualitätsmindernden Ursachen. Sie führen zu Vitaminverlusten, Farbveränderungen, geschmacklichen Beeinflussungen, usw. (siehe z. B. [4] und [239]).

Dies führt dazu, dass Lebensmittelverpackungsanlagen im Allgemeinen so ausgelegt werden, dass die Füll- und Dosiermaschinen als Zentralaggregate möglichst stillstandsfrei arbeiten können. Dazu werden die der zentralen Maschine vor- und nachgeschalteten Anlagenkomponenten mit einer höheren Nennausbringung konzipiert und die Transporteure häufig mit einer zusätzlichen Pufferfunktion ausgestattet. Ferner werden die Einstellausbringungen der Maschinen und die Geschwindigkeiten der Transporteure oft elektronisch gesteuert oder geregelt.

Trotz dieser Vorkehrungen treten aufgrund der stochastischen Verteilung der Stördauern immer wieder Fehler auf, die über eine Stau- oder Mangelfortpflanzung zu einem Stillstand des Zentralaggregats führen [196], [197]. Verbunden mit organisatorisch bedingten Stillstandszeiten, die z. B. durch Produktumstellungen oder Wartungsarbeiten entstehen, erreichen Abfüll- und Verpackungsanlage daher heutzutage nur Verfügbarkeiten von 50-75 % (siehe z. B. [97] und [108]).

Um die technische Verfügbarkeit zu erhöhen, ist es möglich, Schwachstellenanalysen in den entsprechenden Anlagen durchzuführen, um die Verursacher für die meisten und längsten Stillstände ausfindig zu machen. Diese Analysen werden derzeit im Rahmen stichprobenartiger Abnahmeversuche durchgeführt [119], [182], [301]. Die Versuchsdurchführung erfolgt dabei durch Experten, bzw. mit der Anlage vertraute Personen, die lediglich bei der Auswertung durch IT-Instrumente unterstützt werden [298]. Dies verursacht zum einen hohe Kosten, da die Aufgabe der Anlagenbeobachtung nicht parallel zur Arbeit durch das in der Anlage verfügbare Personal erledigt werden kann [182], zum anderen ist die statistische Absicherung durch den Stichprobencharakter der Untersuchung eher als gering anzusehen. Untersuchungen

haben gezeigt, dass bei Versuchen an ein und derselben Anlage an mehreren Tagen durchaus Schwankungen im Liefergrad von 5 % und mehr auftreten können [305]¹.

Zwar werden seit einigen Jahren vermehrt Betriebsdatenerfassungssysteme eingesetzt, um die Daten einer Anlage automatisch zu erfassen und auszuwerten, jedoch berücksichtigen diese Werkzeuge bisher lediglich statistische Auswertemethoden [164]. Das Problem bei einer rein statistischen Auswertung ist aber, dass die Störungen lediglich nach ihrer Dauer und Häufigkeit bewertet werden und nicht, wie bei den manuellen Abnahmeversuchen, daraufhin, ob sie auch zu einem Stillstand oder einer Minderausbringung des Zentralaggregats der Anlage führen. Eine Optimierungsmaßnahme an dem am häufigsten oder am längsten gestörten Aggregat kann somit unter Umständen für eine Verbesserung der Kennzahlen der Gesamtanlage nutzlos sein. Dies könnte auch eine Ursache dafür sein, dass beispielsweise in der Braubranche die Instandhaltungskosten mit 4,8 %, bezogen auf den Wiederbeschaffungswert, überdurchschnittlich hoch sind [45].

Es ist daher wünschenswert, dass eine permanente automatische Auswertung von Betriebsdaten erfolgt, die eine Klassifizierung der Stillstandsursachen am Zentralaggregat der Anlage erlaubt. Diese Aufgabe ist jedoch nicht trivial, da die Anlagenkomponenten aufgrund der Pufferfunktionen der verbindenden Transporteure voneinander entkoppelt sind und sich Störungen erst mit einer zeitlichen Verzögerung durch Mangel oder Rückstau bemerkbar machen. Bild 1 verdeutlicht diese Problematik.

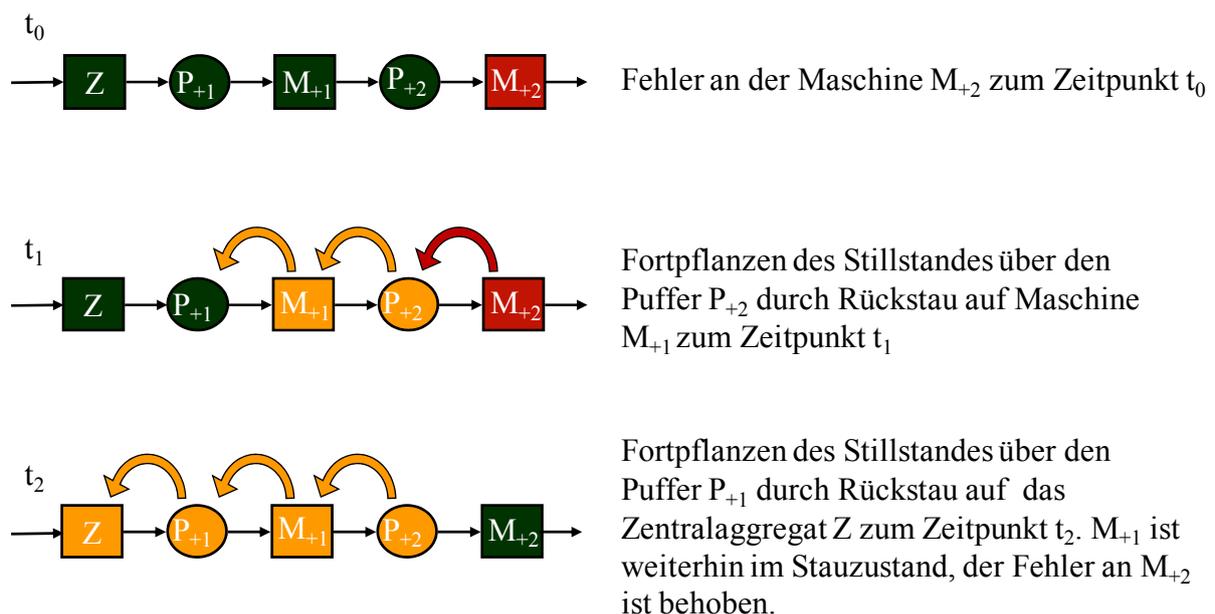


Bild 1: Stillstandsfortpflanzung durch einen Rückstau auf das Zentralaggregat

Die verursachende Maschine kann zum Zeitpunkt des Liefergrad mindernden Stillstands am Zentralaggregat bereits wieder in Betrieb sein, was eine Detektion der Ursache erschwert. Grundsätzlich ist eine Zuordnung zwar möglich, was die manuellen Abnahmeergebnisse und

¹ Für eine Erläuterung typischer Kennzahlen in Abfüll- und Verpackungsanlagen siehe Anhang A

aufwendige Speziallösungen für einzelne Anlagen verdeutlichen, jedoch fehlt es an flexiblen, allgemeingültigen und automatisierbaren Ansätzen [300].

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, Grundlagen und Modelle zu entwickeln, die Werkzeuge für eine automatische Fehlerlokalisierung in Lebensmittelverpackungsanlagen ermöglichen. Dabei soll ein Hauptaugenmerk auf der einfachen Anpassung an die einzelnen sehr heterogenen Anlagen liegen. Hierzu soll Entwicklungsarbeit bei neuartigen Sensorsystemen und der automatischen Datenerfassung und –aufbereitung geleistet werden, um eine standardisierte und problemorientierte Datenbasis zu schaffen. Außerdem sollen grundlegende Zusammenhänge für das Schaffen einer Wissensbasis erörtert werden. Darauf aufbauend sollen wissensbasierte Methoden genutzt und verglichen werden, die das Vorgehen und die Ergebnisse bei einer manuellen Abnahme reproduzieren oder ggf. verbessern können. Eine schematische Darstellung der Ziele bietet Bild 2.

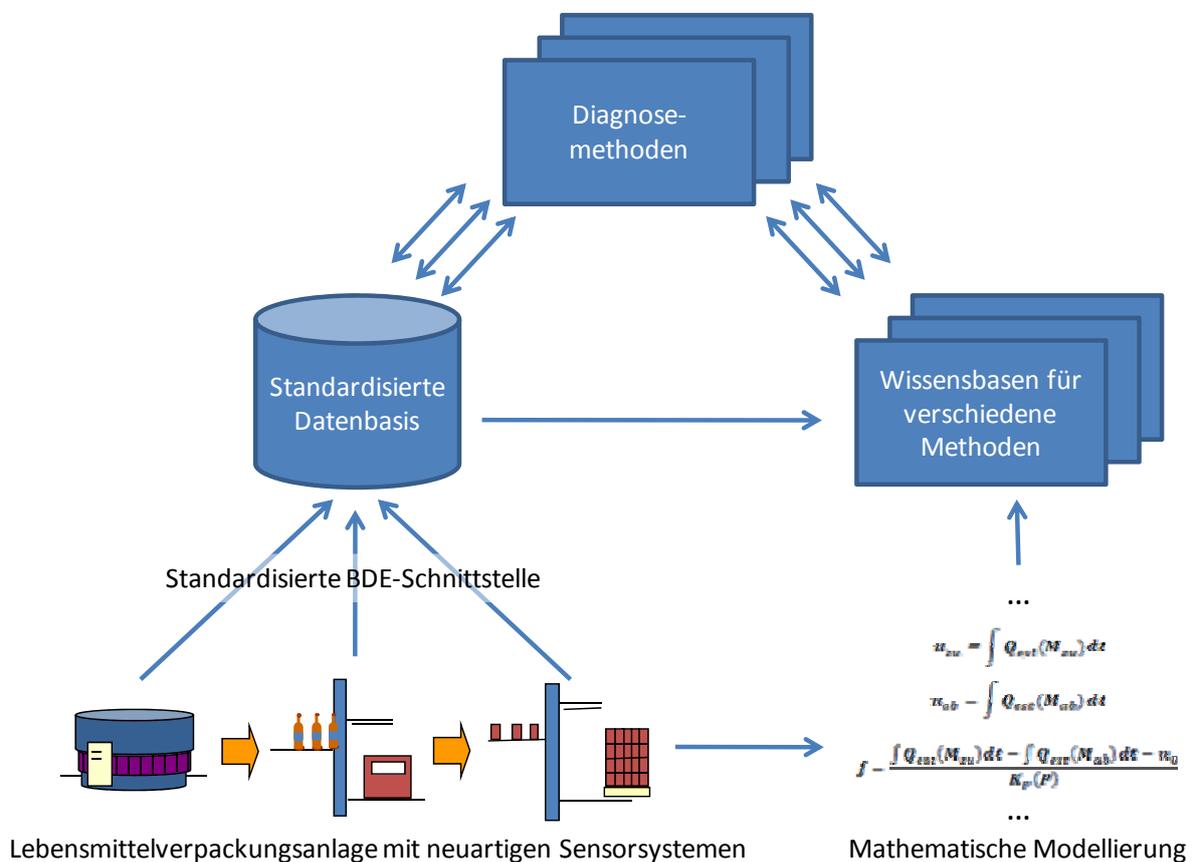


Bild 2: Darstellung der Ziele der vorliegenden Arbeit

Auf dieser Basis entwickelte Werkzeuge sollen Hinweise auf durchzuführende Optimierungsmaßnahmen in der Anlage geben, zur Erstellung von Wartungsplänen dienen und für Planungshinweise bei der Neugestaltung von Anlagen genutzt werden. Zusammen sollen diese Informationen helfen, den Ausnutzungs- und Liefergrad der Anlage näher an ihr Optimum zu führen, dadurch Kosten einzusparen und das Personal in der Anlage zu entlasten.

Die Arbeit ist zu diesem Zweck folgendermaßen gegliedert:

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen und der Stand der Technik erörtert. Basierend hierauf erfolgt die Methodenauswahl für den weiteren Verlauf der Arbeit. Unter 2.1 werden zunächst die für die Arbeit wichtigen Grundlagen von Lebensmittelverpackungsanlagen dargestellt. Dabei wird insbesondere auf den aktuellen Stand der Informationstechnologie Bezug genommen. In Kapitel 2.2 wird der bisherige Stand der Modellierung von Abfüll- und Verpackungsanlagen beschrieben. Kapitel 2.3 befasst sich mit den Grundlagen wissensbasierter Systeme. Nach einer kurzen Einführung in die unterschiedlichen wissensbasierten Ansätze wird deren Einsatz für Diagnosezwecke dargelegt und unter 2.4 eine Auswahl der am besten geeigneten Methoden für den weitem Verlauf der Arbeit getroffen.

In Kapitel 3 werden die unterschiedlichen Methoden zur Datengenerierung erläutert. Dabei wird zunächst in 3.1 auf das Schaffen einer standardisierten Datenbasis eingegangen und unter 3.2 die Verbreitung der entwickelten Standards diskutiert. In Kapitel 3.3 erfolgt eine statistische Bewertung verschiedener Parameter und abgeleiteter Zählwerte und 3.4 befasst sich mit einer Verbesserung der Datenbasis durch neue Sensorsysteme. Im folgenden Abschnitt der Arbeit (3.5) erfolgt die Beschreibung der für die Validierung der Modellierung und Algorithmisierung eingesetzten Versuchsanlagen. Die in der Arbeit entwickelten Modelle und Algorithmen sind in Kapitel 4 dargestellt. Dabei erfolgt unter 4.1 eine grundsätzliche mathematische Betrachtung der Stillstandsfortpflanzung in Abfüll- und Verpackungsanlagen. Das so geschaffenen Basismodell wird in Kapitel 4.2 genutzt, um Wissensbasen für die unterschiedlichen, unter 2.4 ausgewählten wissensbasierten Systeme zu erstellen und diese mithilfe geeigneter Algorithmen in Tools zu überführen, die überprüfbare Ergebnisse erzeugen können. Die Ergebnisse der Validierung der ausgearbeiteten Methoden und Modelle werden in Kapitel 5 dargestellt und diskutiert. Kapitel 6 enthält eine Zusammenfassung der Arbeit und einen Ausblick auf mögliche zukünftige, auf den vorliegenden Ergebnissen aufbauende Erweiterungen.

2. Theoretische Grundlagen, Stand der Technik und Methodenauswahl

2.1 Abfüll- und Verpackungsanlagen

Abfüll- und Verpackungsanlagen sind hochkomplexe, verkettete Anlagen, die aus einer Vielzahl mechanischer und elektronischer Komponenten bestehen. Im Folgenden werden die für diese Arbeit entscheidenden Eigenschaften herausgestellt.

2.1.1 Aufbau von Abfüll- und Verpackungsanlagen

Der Verpackungsprozess gliedert sich in folgende, in Bild 3 dargestellte Stufen:

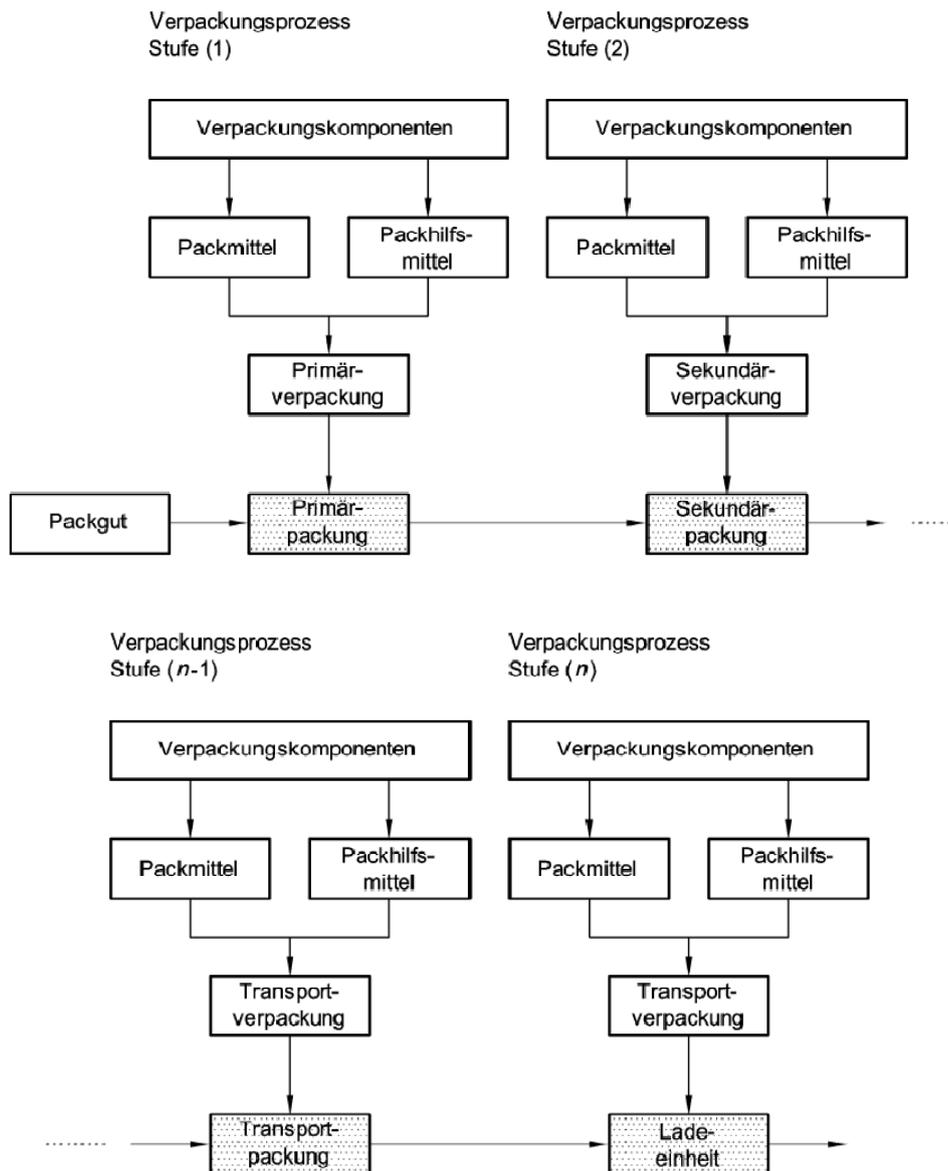


Bild 3: Stufen des Verpackungsprozesses [85]

Auf der ersten Stufe werden die unterschiedlichen Verpackungskomponenten mit dem Packgut zu der Primärpackung vereinigt. Als Beispiel kann hier die Vereinigung eines flüssigen

Produkts mit einem Behälter (z. B.: einer Glasflasche) und einem Verschluss (z. B. einem Kronenkorken) betrachtet werden.

Die zweite Stufe vereinigt im Allgemeinen mehrere Primärpackungen mit zusätzlichen Verpackungskomponenten zu einer Sekundärpackung. Dem Beispiel folgend könnten 20 gefüllte und verschlossene Flaschen mit einem Stapelkasten kombiniert werden.

Die Kombination verschiedener Packungen mit Verpackungskomponenten zu Packungen einer höheren Stufe (Tertiärpackung, ...) kann beliebig fortgesetzt werden, bis aus den Transportpackungen eine Ladeinheit erzeugt wird. Im oben begonnenen Beispiel könnte es sich hierbei um gesicherte Stapelkästen auf einer Euro-Palette handeln.

Mit dieser letzten Stufe wird der Verpackungsprozess abgeschlossen. Er wird somit durch seine Schnittstellen zur Produktion und Logistik begrenzt (vgl. Bild 4).

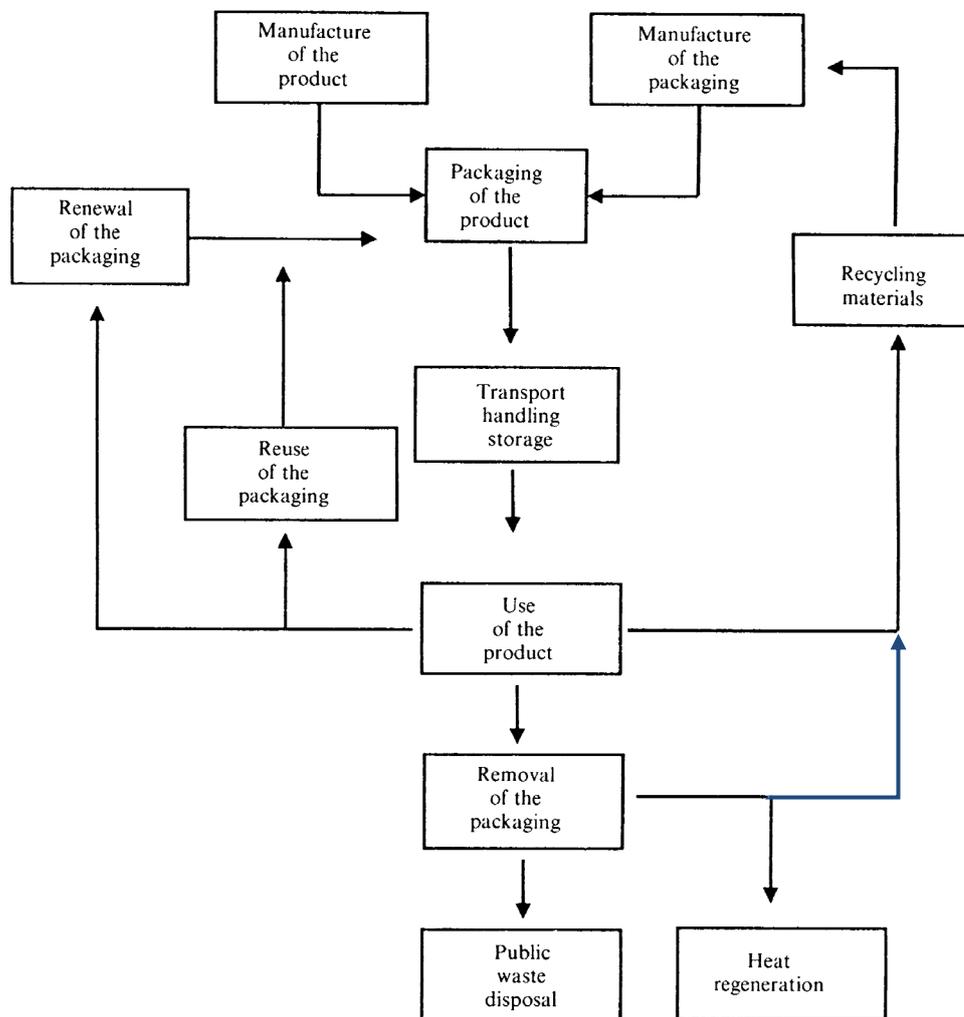


Bild 4: Schnittstellen des Verpackungsprozesses nach [38] (modifiziert)

Die verschiedenen Stufen des Abfüll- und Verpackungsprozesses werden in Lebensmittelverpackungsanlagen realisiert. Dabei werden häufig mehrere Prozesse unterschiedlicher Stufen in einer Anlage durchgeführt, wobei die unterschiedlichen Güterströme der verschiedenen Prozess-Stufen in vielen Fällen voneinander abhängig sind. Bild 5 zeigt ein Beispiel für die

Güterströme in einer Getränkeabfüllanlage. Hier existieren drei sich gegenseitig beeinflussende Materialströme: Die palettierten Getränkekästen werden depalettiert und danach ausgepackt.

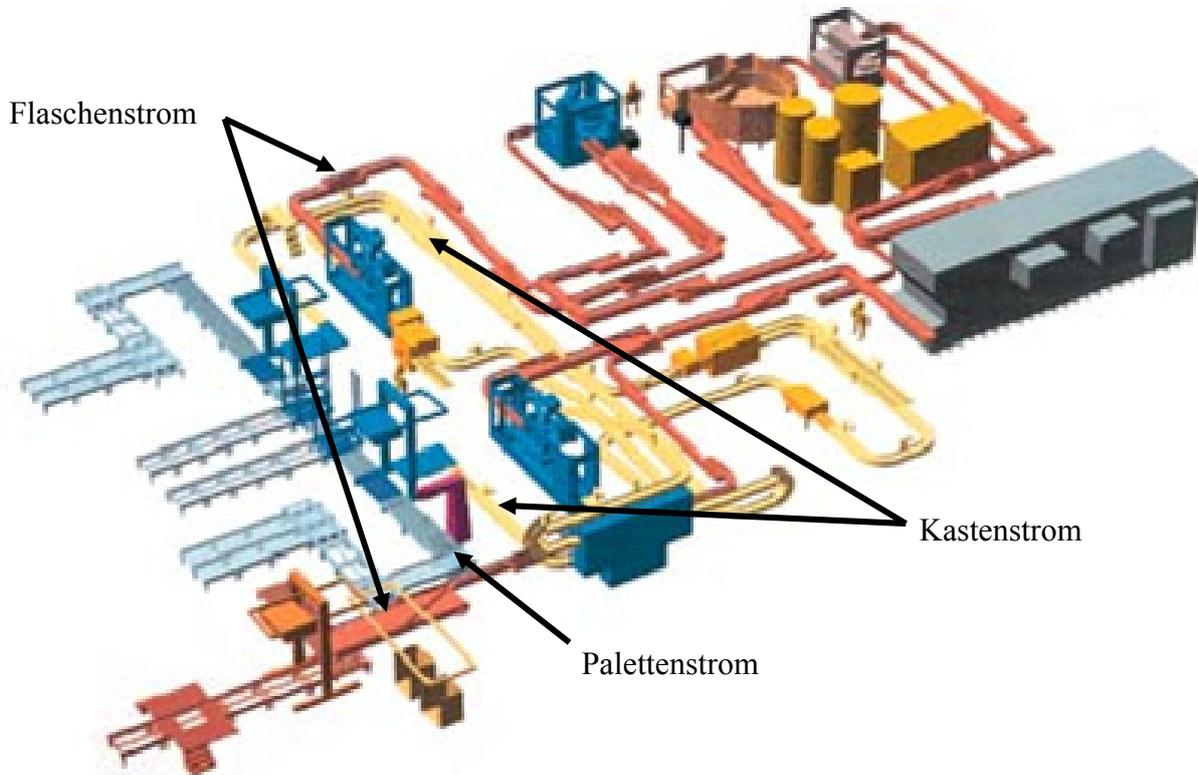


Bild 5: Abfüllanlage mit einander beeinflussenden Güterströmen (durch unterschiedliche Farben kenntlich gemacht) nach [100]

Die Kästen werden am Ende der Linie wieder für die gereinigten, gefüllt und ausgestatteten Flaschen benötigt. Gleiches gilt für die Paletten, die zur Palettierung der Kästen benötigt werden. Eine Störung in einem dieser Ströme kann sich somit direkt oder indirekt auf die anderen auswirken und dazu führen, dass sich Stau- oder Mangelsituationen ergeben.

Die einzelnen Aufgaben der Abfüll- und Verpackungsprozesse, die sich verallgemeinert durch Bild 6 beschreiben lassen, werden von den einzelnen Maschinen und Transporteuren der Anlage übernommen.

2.1.1.1 Maschinen in Lebensmittelverpackungsanlagen

Im Folgenden soll nur auf generelle Eigenschaften der Maschinen eingegangen werden, die für die vorliegende Arbeit von Interesse sind. Einen guten Überblick über typische Maschinen in Lebensmittelverpackungsanlagen und ihre Funktionsweise bieten [36], [39] und [87]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden als Beispielanlagen verschiedene Getränkeabfüllanlagen betrachtet, die eine starke Komplexität und einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen. Sie sind damit ein sehr gut geeigneter Betrachtungsgegenstand für die automatische Diagnose. Einen guten Überblick über die verschiedenen Maschinen in einer Getränkeabfüllanlage ge-

ben [100] und [112]. Über neueste Entwicklungen bei Maschinen in Getränkeabfüllanlagen informieren [10], [11] und [12].

Abstrahiert man von der Funktion, so ist die Arbeitsweise der Maschinen ihr wichtigstes Unterscheidungsmerkmal. Man kann kontinuierlich arbeitende Maschinen von solchen unterscheiden, die intermittierend arbeiten. Die intermittierend arbeitenden Maschinen lassen sich wiederum in periodisch und nicht periodisch intermittierende unterscheiden [27], [71].

Ein weiterer wichtiger Punkt, der die Maschinen charakterisiert, ist, ob sie Güter bzw. Objekte speichern können. So existieren gerade in Getränkeabfüllanlagen Maschinen, wie z. B. Flaschen-Waschmaschinen, die eine große Anzahl an Objekten in ihrem Inneren bewegen, was zur Folge hat, dass der Zeitraum zwischen Aufnahme und Abgabe der Objekte bis zu 30 Minuten dauern kann.

Die Art der Arbeitsweise und das Speichervermögen, im weiteren Verlauf der Arbeit als Kapazität bezeichnet, haben häufig einen Einfluss auf das Verhalten beim Wechsel der Maschine vom Betrieb in einen Stillstand. Die kontinuierlichen Maschinen, die über keine große Kapazität verfügen oder in denen aus technischen Gründen keinerlei Objekte während der Stillstandszeit verweilen dürfen, wie z. B. viele Füll- und Dosiermaschinen oder Etikettier-, Dekorier- und Codiermaschinen, werden bei einem kontrollierten Stillstand leergefahren. Hingegen bleiben taktweise arbeitende Maschine, wie die meisten Reinigungsmaschinen und Sammelpackmaschinen, oder auch kontinuierliche Maschinen mit großer Speicherkapazität, wie z. B. kontinuierliche Pasteurisiermaschinen, einfach stehen. Dies wirkt sich auch auf die Zeiten für das Anfahren und Wiederanfahren aus.

Zusätzlich lassen sich die Maschinen danach unterscheiden, ob sie Vorrichtungen zum Ausleiten von Objekten vorsehen. Diese Funktionalität ist in praktisch jede Inspektionsmaschine integriert. Häufig handelt es sich hierbei um kleine Kontrollgeräte, wie z. B. Geräte zur Füllhöhenkontrolle, die direkt mit der Maschine verblockt sind und daher häufig nicht isoliert, sondern als zu der Maschine gehörig betrachtet werden. Es kann bei der Ausleitung der Objekte unterschieden werden, ob sie an eine frühere Stelle im Prozess zurückgeführt oder ob sie komplett aus der Anlage und dem Verarbeitungsprozess ausgeschleust werden.

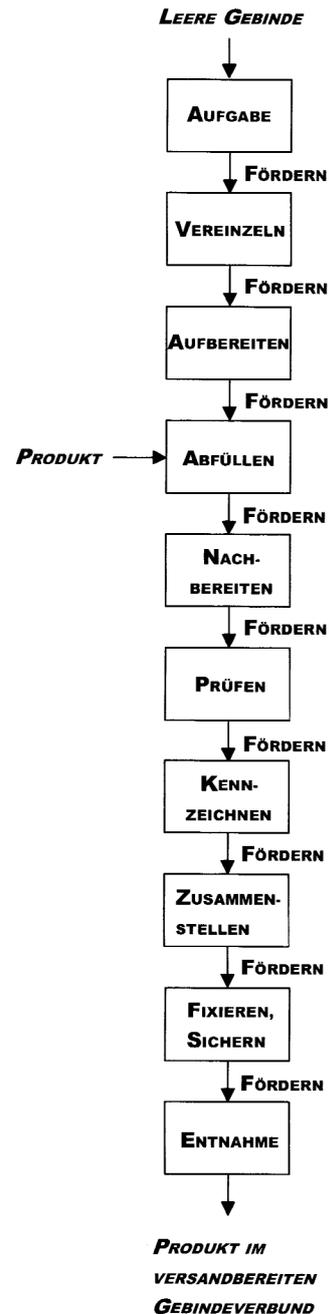


Bild 6: Aufgaben im Abfüll- und Verpackungsprozess nach [87]

2.1.1.2 *Transporteure und Puffer in Lebensmittelverpackungsanlagen*

Damit ein automatischer Abfüll- und Verpackungsprozess realisiert werden kann, müssen die Objekte für die Bearbeitung von einer Maschine zur anderen transportiert werden. Die einfachste Möglichkeit, dies zu realisieren, ist es, die Maschinen mechanisch zu verblocken. Hierbei werden die Objekte über bestimmte mechanische Bauteile, wie Übergabeschnecken oder -sterne, von einer Maschine an die andere weitergereicht. Der Nachteil einer solchen Lösung ist, dass sich Fehler an einer einzelnen Maschine unmittelbar auf die Gesamtanlage auswirken. Hierdurch werden die hohen Einzelwirkungsgrade der Maschinen relativiert. So erreicht eine Anlage mit beispielsweise zehn mechanisch verblockten Maschinen mit Einzelwirkungsgraden von jeweils 99 % unter ungünstigen Bedingungen gerade noch einen Wirkungsgrad von $0,99^{10} \approx 90 \%$ (für eine detaillierte Betrachtung siehe [234]). Zusätzlich sind höchste Anforderungen an die Synchronisierung der Maschinen zu stellen, damit neben den Einzelfehlern nicht auch zusätzliche Übergabefehler den Wirkungsgrad mindern. Ein Schritt, um wenigstens diese Problematik zu reduzieren und um den Aufbau der Anlage bedienerfreundlicher zu gestalten, ist es, die Maschinen elektronisch zu verblocken, also mit Transporteuren ohne relevante Pufferfunktion zu verbinden. Jedoch hat auch diese Lösung die oben genannten negativen Auswirkungen auf die Kennzahlen der Gesamtanlage (vgl. auch Anhang A).

Eine wirkliche Steigerung der Effizienz der Anlage ist nur durch ein Entkoppeln der einzelnen Maschinen voneinander zu erreichen. Die geschieht im Allgemeinen dadurch, dass Puffer in die Anlage integriert werden [288]. Diese sind häufig mit der Transportfunktion zwischen den Maschinen verknüpft.

Um die Puffertypen zu erläutern, soll auf allgemeine Speicherstrukturen zurückgegriffen werden. Man kann verschiedene Arten von Speichern unterscheiden. Zum einen gibt es sogenannte Warteschlangen oder Queues, die zu den FIFO-(First In First Out)-Speichern gehören. Dies bedeutet, dass das erste Objekt, das in den Speicher hinein kommt, auch als erstes Objekt wieder aus dem Speicher entfernt wird. Bei Lebensmittelverpackungsanlagen gilt dies vor allem für einsträngige Transporteinrichtungen, die nur dadurch eine Pufferwirkung besitzen, dass die Förderer und die dem Transportbereich vorgeschaltete Maschine eine höhere Geschwindigkeit bzw. Ausbringung besitzen als das nachgeschaltete Aggregat. So können Störungen an den Maschinen in geringem Maße gepuffert werden. Um dies effizient zu gestalten und einen permanenten Stop-and-Go-Betrieb der Maschinen zu verhindern, ist hierfür jedoch eine Steuerung oder Regelung unumgänglich. Systeme dieser Art sind beispielsweise in [133] und [289] beschrieben. Ein weiteres Beispiel sind Luftstromtransporteure für leere PET-Flaschen. Auch hier erfolgt die Speicherung nach dem FIFO-Prinzip und die Pufferwirkung entsteht durch eine Überausbringung der vorgeschalteten Maschine in Verbindung mit dem schnellen Luftstromtransporteur. Neuere Entwicklungen variieren zur einsträngigen Pufferung von Behältern auch den Transportweg (siehe [177]).

Ähnlich gestaltet sind auch die Massentransporteure in Lebensmittelverpackungsanlagen. Jedoch kann hier nicht gewährleistet werden, dass die Objekte genau in der Reihenfolge, in der sie in den Speicher eingelaufen sind, auch wieder abgezogen werden, da eine Vermis-

schung der Objekte auf dem Speicher möglich ist. Zusätzlich hängt der Abzug der Objekte von der Geometrie und den verschiedenen Fördergeschwindigkeiten des Transporteurs ab. Dies lässt sich mit einem Schüttgutsilo anschaulich vergleichen: In einem Silo ergibt sich, abhängig von der Konusgestaltung, entweder ein sogenannter Massenfluss, der die Schichten im Silo nach dem FIFO-Prinzip abzieht oder ein sogenannter Kernfluss, bei dem das Schüttgut aus der Mitte des Silos früher abgezogen wird als an den Rändern. Dies ergibt stark unterschiedliche Verweilzeiten für die einzelnen Produktfraktionen im Silo. Ähnlich verhält es sich bei den Massentransporteurs, die somit eher einem Rucksackspeicher (Bag) zuzuordnen sind, aus dem die Elemente mit einer gewissen statistischen Verteilung wieder entnommen werden. Diese Art der Puffer ist in Lebensmittelverpackungsanlagen am häufigsten anzutreffen.

Auch weitere Speicher nach diesem Prinzip sind denkbar. So kann ein Puffer auch aus einem Behälter bestehen, in den Objekte gefördert und durch eine Dosiereinrichtung, einen Roboter o. ä. entnommen werden (z. B. ein Unscrambler zwischen einer Streckblas- und einer Füllmaschine).

Die dritte Art der Pufferung ist ein Speicher nach dem LIFO-(Last In First Out)-Prinzip des Kellerspeichers (Stack). Dies bedeutet, dass die zuletzt in den Speicher geförderten Objekte als erste wieder aus dem Speicher entfernt werden. Hierbei existieren zahlreiche Varianten, die sich aufgrund kurzer Totzeiten, also Zeiten die ausschließlich für den Transport benötigt werden und nicht als Puffer zur Verfügung stehen, zunehmender Verbreitung erfreuen. Als Beispiel für solche Systeme sind Turmspeichersysteme zu nennen [13], [177].

2.1.2 Informationstechnologie (IT) in Lebensmittelverpackungsanlagen

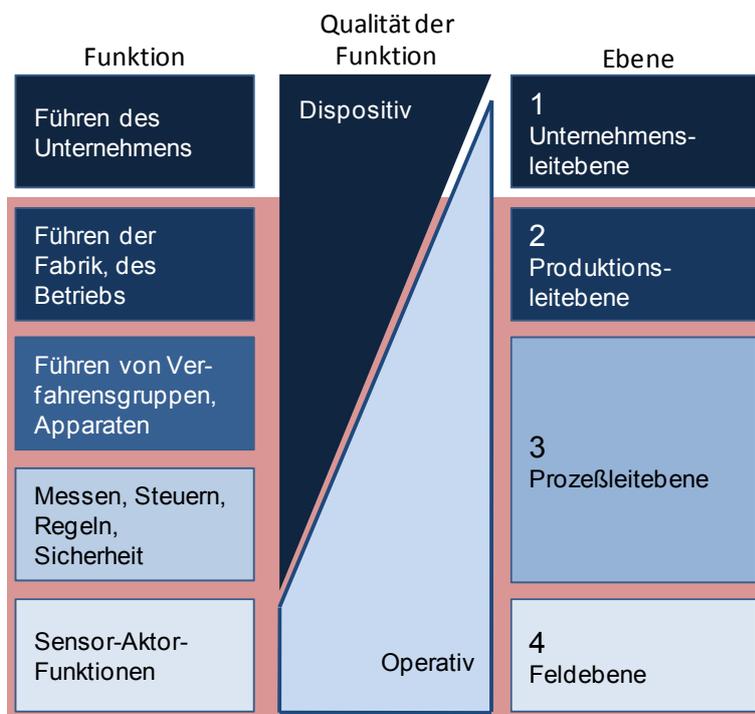


Bild 7: Ebenenmodell nach [224]

Unternehmen aus der Lebensmittelbranche lassen sich „im Hinblick auf die Produktionsbelange eines Unternehmens der Prozessindustrie“ nach POLKE in vier hierarchische Ebenen untergliedern (vgl. Bild 7) [224]. Auf diesen Ebenen lassen sich verschiedene IT-Systeme einordnen, die die Verantwortlichen beim Ausführen der verschiedenen Funktionen unterstützen. Die Funktionen der Unternehmensleitebene, die im Allgemeinen mithilfe von Enterprise-Resource-Planning-(ERP)-Systemen realisiert werden, sind in dieser Arbeit von untergeord-

ner Bedeutung [291]. Die anderen Ebenen sind von hoher Wichtigkeit für das Entwickeln von Diagnosesystemen und das Nutzen der Ergebnisse. Während auf der Feldebene die Informationsgenerierung mithilfe von Sensoren erfolgt, wird in den übergeordneten Systemen direkt darauf reagiert, oder es werden nach einer entsprechenden Verdichtung und Aufbereitung der Daten Maßnahmen eingeleitet.

Eine entscheidende Rolle für die reibungslose Informationsweiterleitung und -verdichtung spielt die Kommunikation der Systeme auf den unterschiedlichen Ebenen. Die Kommunikation muss dabei gewissen Konventionen folgen. Grundsätzlich lassen sich diese auch auf unterschiedliche Ebenen verteilen. Da diese prinzipiell frei wählbar sind, wurde von der International Standardisation Organisation (ISO) ein Modell erarbeitet, welches die Schichten in einem Netzwerk festlegt und definiert. Es handelt sich hierbei um das OSI-Referenzmodell (OSI = Open Systems Interconnection). Dieses Modell besteht aus sieben Schichten, über denen die eigentliche Anwendung steht (vgl. Bild 8). Die unterschiedlichen Schichten übernehmen dabei verschiedene Aufgaben. Diese reichen von der physischen Beschreibung der Anschlussmöglichkeiten an die Systeme in den untersten Schichten über Adressierungskonventionen und Sicherheitsmechanismen bis zur Darstellung der Information. Für weitere Informationen zu den einzelnen Schichten siehe [92], [125] und [132].

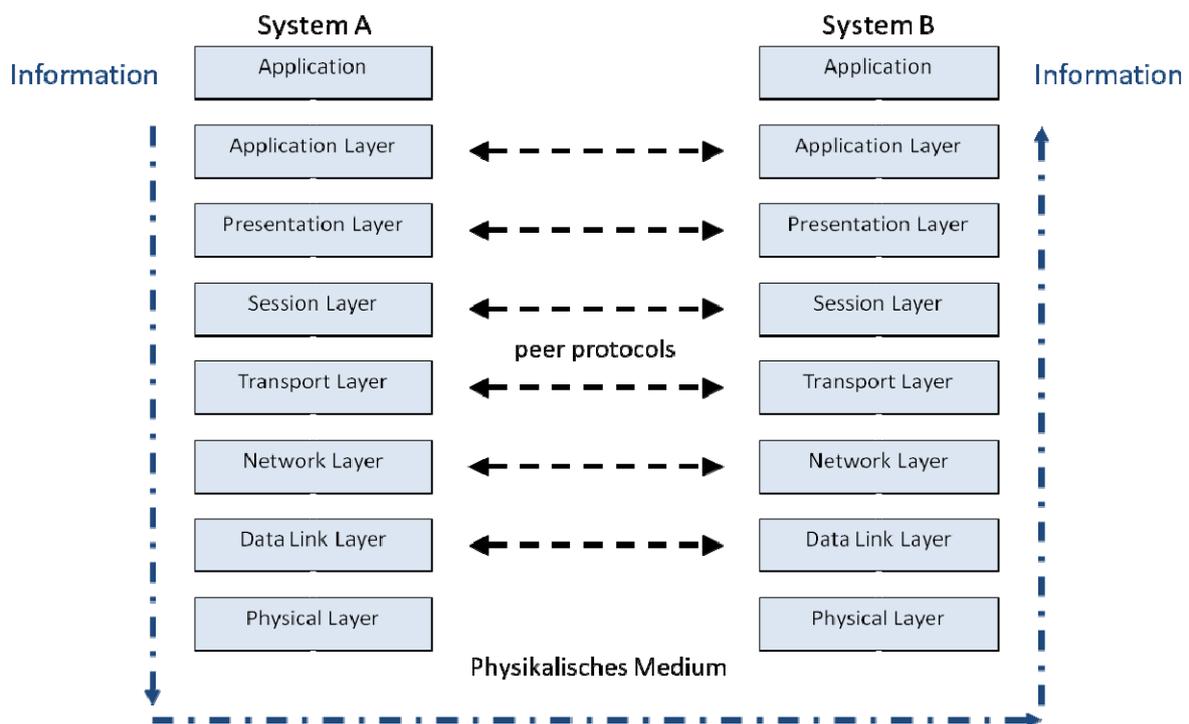


Bild 8: ISO OSI-Referenzmodell nach [125]

Die einzelnen Schichten kommunizieren über sogenannte Protokolle miteinander. Unter einem Protokoll versteht man eine Sammlung von Regeln und Vereinbarungen für einen Kommunikationsprozess. Hierbei existieren Schichtenprotokolle oder Peer-to-Peer-Protokolle, die die Kommunikation zwischen gleichwertigen Schichten unterschiedlicher Kommunikationspartner regeln. Ferner gibt es Schicht-Schicht-Protokolle, die regeln, wie eine Schicht in ei-

nem System die Dienste der direkt darunter liegenden Schicht anfordert. Diese Protokolle werden in der Literatur häufig auch als Schnittstellenspezifikation bezeichnet [125].

Insgesamt kann man sich den Transport einer Information von einem System A zu einem System B über die Schnittstelle wie den Versand eines Briefes vorstellen. In jeder Schicht wird der Brief in einen neuen Briefumschlag gesteckt, der bestimmte Informationen beinhaltet, die jeweils nur der gleichwertigen Schicht in der Schnittstelle des anderen Kommunikationsteilnehmers dienen, damit dieser den Brief vollständig und richtig weiterleiten kann. Der Brief wird daher in der Empfänger-Schnittstelle Schicht für Schicht wieder ausgepackt, bis am Ende der Schnittstelle der Anwendung des Systems B die reine Information zur Verfügung steht. Es ist dabei zu beachten, dass nur identisch definierte Schichten mit den Informationen auf den Briefumschlägen etwas anfangen können. Dies verdeutlicht, warum eine einheitliche Schnittstellendefinition für eine problemlose Kommunikation so entscheidend ist. Unterscheiden sich die Protokolle der unterschiedlichen Systeme, so wird ein aufwendiges Engineering für eine Protokollumsetzung notwendig.

2.1.2.1 Sensoren

Sensoren sind auf der Feldebene, der untersten Ebene des Modells nach POLKE, einzuordnen. Sie stellen damit die Basis für die Informationsgewinnung aus Anlagen der Prozessindustrie dar.

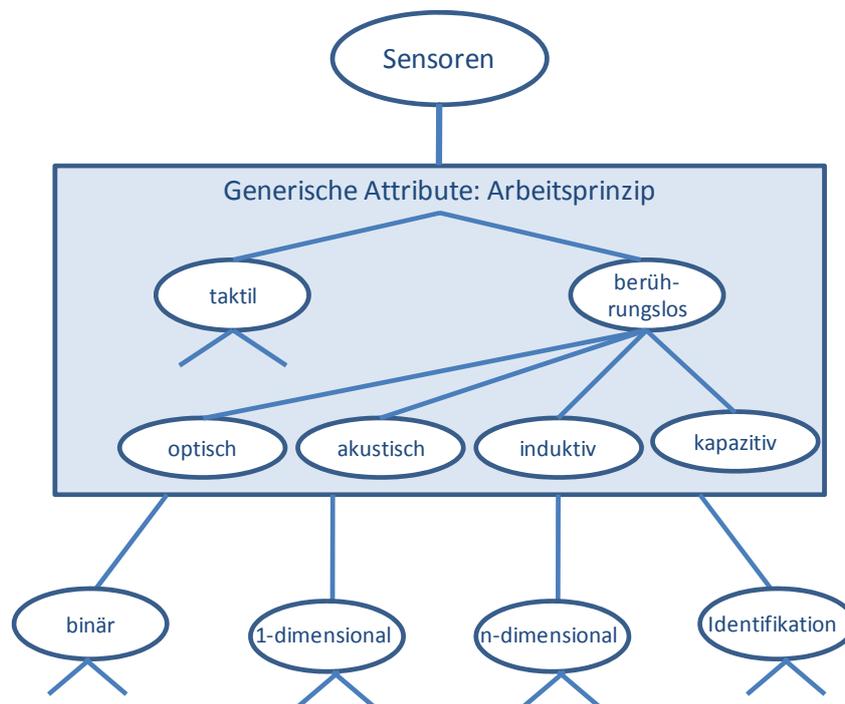


Bild 9: Taxonomie der Sensoren für die Fertigungsindustrie nach [224]

In Lebensmittelverpackungsanlagen kommen zahlreiche unterschiedliche Sensoren zum Einsatz. Eine Vielzahl davon ist als Bestandteil der einzelnen Maschinen anzusehen und übermittelt dem Anwender Informationen über Temperaturen, Drücke etc. Diese Sensoren sollen im Folgenden nicht näher betrachtet werden, da ihre Informationen, die über die Maschinen-

schnittstelle zur Verfügung gestellt werden, für die Diagnose mit dem Zweck der Fehlerlokalisierung von untergeordneter Bedeutung sind. Interessant sind vor allem die Sensoren, die Rückschlüsse auf Fördergeschwindigkeiten, Ausbringungen und Betriebszustände zulassen. Hierbei handelt es sich zu einem großen Anteil um Präsenzdetectoren. Auf diese soll im Folgenden näher eingegangen werden. Sensoren der Fertigungsindustrie lassen sich, wie aus Bild 9 ersichtlich, taxonomisch darstellen.

Dabei gibt es für jedes Arbeitsprinzip eine Vielzahl von Anwendungsgebieten mit daran angepassten Sensorgestaltungen. Zwar finden sich in der Lebensmittelindustrie gerade im Bereich der Transporteure häufig auch taktile Sensoren in Form von Wippschaltern zur Stau- und Mangelndetektion, jedoch sind auf Grund der hygienischen Anforderungen vor allem die berührungslosen Sensoren von Interesse. Hier lassen sich unterschiedliche Messprinzipien mit charakteristischen Vor- und Nachteilen unterscheiden, die zur Präsenzdetection eingesetzt werden:

- Kapazitive Sensoren: bei den kapazitiven Sensoren wirken in den meisten Fällen zwei konzentrisch angeordnete, metallische Elektroden in einem Rückkopplungsweig eines Hochfrequenz-Oszillators. Ohne Anwesenheit eines elektrisch leitenden Körpers findet dabei keine Schwingungsanregung statt. Nähert sich jedoch ein Körper, so beginnt der Oszillator aufgrund der Änderung der Koppelkapazität zu schwingen. Diese Schwingung wird gleichgerichtet und nachgewiesen. Einen wesentlichen Einfluss auf die Änderung der Kapazität und damit auch auf den Messabstand hat dabei die Dielektrizitätskonstante ϵ_r der Objekte [286]. Diese ist bei den in der Lebensmittelindustrie verwendeten Werkstoffen für Packmittel im Allgemeinen sehr gering (z. B. $\epsilon_r(\text{PET})=2,3$, $\epsilon_r(\text{Glas})=5-9$) [117]. Außerdem besteht eine starke Beeinflussung durch Schmutz und Feuchtigkeit [104].
- Induktive Sensoren: diese Sensoren sind im Allgemeinen aus einem Hochfrequenzgenerator und einer Spule aufgebaut. Die durch die Spule erzeugte Schwingungsamplitude wird mit der gleichgerichteten Amplitude des Generators verglichen. Befindet sich ein Objekt im Feld der Spule, so wird die Amplitude durch eine Dämpfung auf Grund eines Energieentzugs durch die in den Objekten entstehenden Wirbelströme kleiner. Dies löst bei Unterschreiten der Generatoramplitude den Schaltvorgang des Sensors aus. Für diese Funktionsweise ist es jedoch dringend erforderlich, dass die zu detektierenden Objekte aus magnetischen oder elektrisch leitenden Werkstoffen bestehen. Ferner können sich die Magnetfelder der einzelnen Sensoren beeinflussen, so dass ein Bauart spezifischer Mindestabstand eingehalten werden muss [124], [286].
- Akustische Sensoren: diese meist im Ultraschall-Bereich arbeitenden Sensoren senden für eine Detektion Schallwellen aus. Die Wellen werden von den zu detektierenden Objekten reflektiert, und der Sensor wertet die Laufzeit der wieder empfangenen Wellen aus. Die Sensoren können in einem großen Bereich von Schaltabständen arbeiten, jedoch müssen auch diese so angebracht werden, dass sie sich gegenseitig nicht beeinflussen [124], [104].

- **Optische Sensoren:** bei den optischen Systemen sind zahlreiche verschiedene Funktionsweisen zu unterscheiden. Eine der am häufigsten verwendeten Arten sind Lichtschranken. Bei diesen Systemen wird Licht durch einen Sender emittiert und von einem Empfänger detektiert. Eine Unterbrechung löst den Schaltvorgang aus [124]. Ähnlich funktionieren auch Reflexions-Lichttaster. Sie senden einen gepulsten Lichtstrahl im Infrarot-Bereich aus. Hierbei dient jedoch, anders als bei den Lichtschranken, das zu detektierende Objekt als Reflektionsfläche. Die Intensität des reflektierten Lichts wird mit einer Fozelle gemessen und kann einen Schaltvorgang auslösen. Komplexere optische Systeme sind Kamerasysteme. Hierbei werden im Wesentlichen CCD-Kameras (CCD = Charge Coupled Device) eingesetzt, die als Zeilen- oder Matrix-Kameras ausgeführt sein können. Dabei besteht ein CCD-Chip abwechselnd aus lichtunempfindlichen und lichtempfindlichen Pixeln, wobei die lichtunempfindlichen Pixel den Transport der Bildinformation übernehmen. Nach den einzelnen Belichtungsvorgängen werden die aus der auftreffenden Strahlungsleistung resultierenden, elektrischen Ladungen an eine Auswerteeinheit weitergeleitet, die daraus ein Bild errechnet. Trotz der hohen Komplexität besitzen CCD-Kameras ein breites Einsatzgebiet, sind jedoch, verglichen mit den anderen Standard-Sensoren, sehr teuer [104].

2.1.2.2 Steuerungstechnik und Bussysteme

Wie aus den oben dargelegten Gründen ersichtlich, kommt der Anbindung der Sensorik an die Systeme der Prozessleitebene eine hohe Bedeutung zu. Hierbei sind die einzelnen Sensoren häufig direkt über analoge Zweidrahtleitungen oder über einen Feldbus an die Eingangsgruppen einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) angeschlossen. Einen guten Überblick über eingesetzte Feldbussysteme geben [87] und [227]. Die SPS übernimmt die Informationssammlung und prozessnahe Steuerung.

In Lebensmittelverpackungsanlagen handelt es sich bei den Steuerungsaufgaben hauptsächlich um die Ablauf- und Geschwindigkeitssteuerung der einzelnen Maschinen und Transporteure. Dabei ist derzeit eine diskrete Steuerung auf der Basis belegter Präsenzdetektoren Stand der Technik. Für die vorliegende Arbeit ist dabei die grundsätzliche Steuerungsstrategie bezüglich des Zentralaggregats entscheidend. Die Maschinen und Transporteure vor diesem Aggregat der Anlage werden so gesteuert, dass eine permanente Versorgung gesichert ist, damit kein Mangelzustand eintritt. Nachgeschaltete Maschinen und Transporteure müssen dafür Sorge tragen, dass die bearbeiteten Objekte möglichst zügig von der zentralen Maschine abtransportiert werden, so dass kein Stau entstehen kann. Dies bedeutet, dass die Puffer der Anlage vor dem Zentralaggregat möglichst voll und nach dem Aggregat möglichst leer gehalten werden sollen (für eine mathematische Betrachtung des optimalen Pufferfüllungsgrads siehe [243]). Man spricht hier von sogenannten Anti-Starve- und Anti-Block-Puffern (vgl. Bild 10).

Die Kommunikation der Maschinensteuerungen zu den übergeordneten Systemen erfolgt im Allgemeinen über den sogenannten Prozessbus im Client-Server-Verfahren [254]. Dabei stellt die SPS die gesammelten Daten als Server zur Verfügung. Ein Client, z. B. ein Betriebsdatenerfassungssystem (BDES), Leitsystem oder Manufacturing Execution System (MES), kann

diesen Dienst in Anspruch nehmen und die Daten vom Server abrufen. Dabei kamen in der Lebensmittelverpackungsindustrie bisher zahlreiche verschiedene Bussysteme mit größtenteils proprietären Protokollen zum Einsatz.

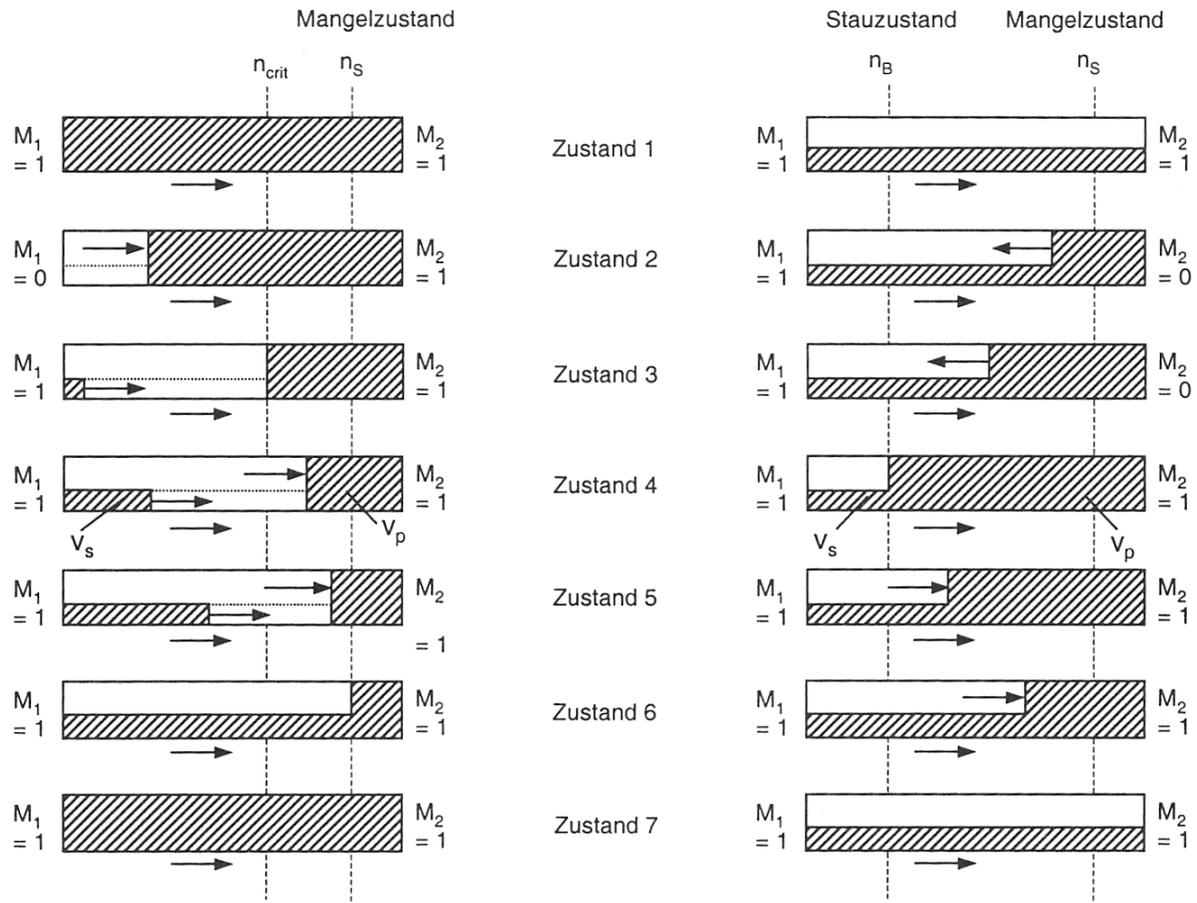


Bild 10: Anti-Starve (links) und Anti-Block Puffer (rechts) in einer Lebensmittelverpackungsanlage nach [118] ($M_{1/2}$: dem Puffer vor-/nachgestellte Maschine, v : Geschwindigkeit der Bänder, v_p : Geschwindigkeit Objektpulk, $n_{B/S}$: Anzahl von Objekten bei Stau-/Mangelauslösung, n_{crit} : minimale Anzahl von Objekten, damit sich eine Störung nicht fortpflanzt)

Seit einigen Jahren ist jedoch eine Abkehr von proprietären Lösungen zu erkennen. Dies liegt an dem Bestreben, möglichst offene und durchgängige Steuerungsarchitekturen zu implementieren, die nach ETTENHOFER und THOREN folgende Merkmale besitzen [96]:

„Merkmale einer offenen Steuerungsarchitektur:

- Die Funktionen und Komponenten sind von mehreren Herstellern erhältlich
- Die Kommunikationsschnittstellen und –protokolle sind international genormt und werden von unabhängigen Interessensgruppen unterstützt
- Die Komponenten eines Architekturbereiches sind austauschbar, ohne dass benachbarte Bereiche tangiert werden
- Der Know-How-Schutz für die Verpackungsmaschinenhersteller ist möglich

Merkmale einer durchgängigen Steuerungsarchitektur:

- Der skalierbare Aufbau von Systemen ist durch Verwendung von Komponentenfamilien möglich

- Für alle Architekturbereiche stehen gleiche Engineering-Tools zur Verfügung
- Die Kommunikationsmechanismen für die Architekturbereiche sind genormt, herstellerunabhängig und zueinander kompatibel“

Hieraus wird deutlich, wie wichtig der Einsatz genormter Protokolle und eine Standardisierung des gesamten Kommunikationsablaufs sind. Eine solche Standardisierung lag bisher in der Lebensmittelverpackungsbranche nicht vor (vgl. hierzu auch Kapitel 3.1).

2.1.2.3 Betriebsdatenerfassung

Die Betriebsdatenerfassung (BDE) in Unternehmen der Prozessindustrie erfolgt auf der Prozess- oder Produktionsleitebene (vgl. Bild 7). Hierbei kommen Systeme zum Einsatz, die Daten sammeln, aufbereiten, verdichten, Kennzahlen berechnen und es erlauben, Berichte zu erstellen. Vermehrt wird die Funktion der Betriebsdatenerfassung in MES integriert. MES sind das Bindeglied zwischen der Automatisierungsebene und den ERP Systemen, was sie zum Kernstück der vertikalen Integration der IT-Infrastruktur eines Unternehmens macht [257]. Dabei wird die Abgrenzung der MES von anderen IT-Systemen über ihre Funktionen definiert, die durch die Manufacturing Enterprise Solutions Association (MESA) festgelegt wurden und in Tabelle 1 dargestellt sind. Einen guten Überblick über MES gibt [316].

Die automatisierte Erfassung von Betriebsdaten aus Lebensmittelverpackungsanlagen ist seit vielen Jahren Gegenstand der Forschung [20], [21], [302], [303], [311], [312]. Die große Heterogenität der BDE-Systeme (siehe oben) und das Fehlen einheitlicher Definitionen führte dabei in der Vergangenheit dazu, dass BDEs in der Projektierung und Inbetriebnahme sehr teuer und daher -wenn überhaupt- vornehmlich in großen Betrieben zu finden waren. Auch die Vertrauenswürdigkeit der Daten war in vielen Fällen nicht gegeben, was häufig an der unterschiedlichen Interpretation der erfassten Datenpunkte durch Maschinenhersteller, Systemlieferanten und Anwender lag. Zusätzlich lieferten viele Systeme eine unübersichtliche Datenflut, deren Aufbereitung schwierig war und es den Anwendern schwer machte, die für sie wichtigen Informationen zu extrahieren.

Besonders groß war der Leidensdruck in den hochautomatisierten Abfüll- und Verpackungsanlagen der Getränkeindustrie, die aufgrund sinkender Personalzahlen an den Anlagen mehr und mehr auf die automatisch erfassten Informationen angewiesen waren. Aufgrund dieser Tatsache wurde durch VOIGT ET AL. eine Bedarfsumfrage in der Getränkebranche durchgeführt und eine Standardisierung einzelner Datenpunkte für typische Aggregate einer Mehrwegabfüllanlage durchgeführt [303]. Dieses sogenannte „Standardpflichtenheft“ konnte sich in der Branche zwar durchsetzen, besaß jedoch auch zahlreiche Schwächen. So waren keine verbindlichen Vorgaben für eine physikalische Anbindung enthalten und auch bei den Definitionen der Datenpunkte fehlten wichtige Festlegungen, wie beispielsweise das Format der Daten, um eine einfache Handhabung zu gewährleisten. Eine Vorgabe für die Überprüfung der Daten war nicht vorgesehen. Zusätzlich war dieses Standardpflichtenheft sehr stark auf die Ist-Situation in der deutschen Getränkeindustrie fokussiert, was eine intensive Anlehnung an die Architektur von Siemens-Maschinensteuerungen bedeutete und andere, auch internationale Entwicklungen außer Acht ließ.

Tabelle 1: Funktionen von MES nach [195]

MES-Funktion	Aufgaben
Resource Allocation and Status	Planung, Statusüberwachung und Dokumentation aller relevanten Ressourcen (Maschinen, Werkzeuge, Personalqualifikationen, Dokumente)
Operations / Detail Scheduling	Permanente Produktionsplanung und Planungsanpassung aufgrund von Prioritäten, Eigenschaften und Besonderheiten der Produkte und Anlagen
Dispatching Production Units	Management und Disposition aller manuellen und automatisierten Arbeitsabläufe und Reaktion auf Veränderungen in der Produktion
Document Control	Elektronisches Dokumentenmanagement aller Aufzeichnungen und Formulare für den Produktionsbereich
Data Collection / Acquisition	Klassische Betriebsdatenerfassung
Labor Management	Personalmanagement (Disposition, Zeiterfassung, Basis für Prozesskostenrechnung)
Quality Management	Analyse und Auswertung von Echtzeitmesswerten aus der Produktion, Verbindung zu Offline-Laboranalysen und Labor-Informationen-Management-Systemen (LIMS)
Process Management	Prozessüberwachung und Entscheidungsunterstützung bei Benutzereingriffen sowie Alarmmanagement
Maintenance Management	Planung und Dokumentation einer vorbeugenden und periodischen Anlageninstandhaltung
Product Tracking and Genealogy	Online-Überwachung des Produktionsstatus und Produktrückverfolgung
Performance Analysis	Kennzahlenberechnung und -analyse, Online-Visualisierung und Berichtserstellung

Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit, aufbauend auf den Arbeiten von VOIGT ET AL., eine Erweiterung und Verbesserung des bestehenden Standards für die BDE in der Getränkebranche erarbeitet und eine Ausweitung auf andere Branchen, im ersten Schritt die gesamte Lebensmittelbranche, erprobt (vgl. Kapitel 3.1).

2.1.2.4 Werkzeuge zur Datenanalyse und Anlagendiagnose

In der Literatur finden sich bisher nur wenige Arbeiten, die sich mit Diagnose und Fehleranalyse bei Abfüll- und Verpackungsanlagen befassen. So beschäftigen sich z. B. [185], [234] oder [313] mit der statistischen Verteilung von Stördaten in Linien dieser Art, die als Grundlage für eine Modellierung oder Simulation entsprechender Anlagen dienen können.

Die Modellierung von Lebensmittelverpackungsanlagen als verkettete Fertigungslinien wird in Kapitel 2.2 gesondert erörtert.

Simulationen von Abfüll- und Verpackungsanlagen werden eingesetzt, um Ziele, wie eine detailliertere Anlagenplanung, eine Anlagenoptimierung und Effizienz- sowie Ausbringungsvorhersagen, zu erreichen (z. B. [32], [109], [179], [253] und [313]). Die Simulationsmodelle eignen sich auch gut als Ersatzmodelle für wissenschaftliche Untersuchungen (z. B. bei [180], [250] und [300]), indem sie durch das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell“ virtuelle Studien bei sehr realitätsnahem Verhalten erlauben [293]. So zeigte [234] die prinzipielle Anwendbarkeit und konnte Ausbringungsabstufungen von Maschinen optimieren, [235] setzte sie planungsbegleitend ein und [299] nutzte sie für das Entwickeln und Validieren eines Leitsystems für Getränkeabfüllanlagen.

Jedoch finden sich in der wissenschaftlichen und technischen Literatur bisher keine zufriedenstellenden Lösungen im Bereich der Diagnose mit dem Ziel der Fehlerlokalisierung für Abfüll- und Verpackungsanlagen. Dies bestätigt auch der Blick auf die bisher erteilten Patente und Schutzrechte. Als einziges Patent beschäftigt sich [321] mit einem automatisierten Soll-Ist-Vergleich für die Faktoren Kosten, Kapazität und Durchlaufzeiten einer Verpackungsanlage. Hierbei wird jedoch lediglich ein statischer Vergleich zwischen den in der Anlage erreichten Werten und einem modelltheoretischen Optimum durchgeführt.

Patente bezüglich der allgemeinen Diagnose und Analyse von Produktionslinien verfolgen meist einen einfachen Mustervergleich zwischen Ist- und Soll-Parametern. So befassen sich [154], [168] und [258] mit einem permanenten Vergleich von Messwerten mit Schwellenwerten, um frühzeitig Fehler in der Anlage zu erkennen und ihnen entgegenzuwirken. [284] und [285] verfolgen in ihren Patenten die Fehlerfindung mithilfe eines Betriebszeitenvergleichs. Hierbei sind für jede Operation in einer Anlage die typischen Betriebszeiten abgelegt, so dass bei Abweichungen von diesen reagiert werden kann. Die Verwendung eines dynamischen Kennzahlenmodells zum Vergleich der aktuellen Zustände mit den Soll-Parametern und zum schnellen Detektieren von auftretenden Fehlern empfehlen [201] und [202]. Um den Fehlerverursacher in einem Kraftwerk ausfindig zu machen und die Auswirkungen des Fehlers abschätzen zu können, wendet [91] ein Simulationsmodell der Anlage an, das sowohl über die Betriebszustände der Anlage im Normalfall als auch im Fehlerfall Aufschluss gibt und somit einen Verursacher der Störung verifizieren soll. Um Daten aus verschiedenen Datenquellen zu sammeln und geordnet für alle Bereiche, in denen diese Daten für eine Diagnose von Interesse sein könnten, zur Verfügung zu stellen, schlägt [205] ein Datenerfassungs- und Datenverteilungssystem als Komponente eines Prozess-Steuersystems vor. Hierdurch wird das Einbeziehen zusätzlicher Informationen zu den reinen Prozessdaten des jeweiligen Teilprozesses möglich. Eine Kombination verschiedener Ansätze wurde für Anlagen nicht gefunden.

Bei der Diagnose einzelner Maschinen sind ebenfalls einfache Mustervergleiche vorherrschend (siehe [171], [172], [279], [283] und [323]). Vereinzelt sind hier Patente anzutreffen, die für die Maschinenanalyse hybride Diagnosesysteme verwenden. So benutzt [307] für sein Diagnosesystem zur voraussagenden Maschinenwartung eine Kombination aus einem Ma-

schinenmodell und Ansätzen aus der Künstlichen Intelligenz (Neuronale Netzwerke, Fuzzy Logik basierte Hypothesen- und Testverfahren). [152] gliedert seine Diagnose für die Qualitätsbewertung rotierender Maschinen in eine Grobdiagnose vom Typ der Schwellenwertanalyse (siehe oben), eine Feindiagnose, bei der die Daten der Grobdiagnose für ein Expertensystem genutzt werden, und ein Klassifikationssystem, das durch überwachtes Lernen trainiert wird und die Ergebnisse der beiden Diagnosen mit in seine Beurteilung einbezieht. Eine erfolgreiche Umsetzung der beschriebenen Systeme, die eine Bewertung erlaubt, ist in der Literatur jedoch bisher nicht aufzufinden.

Lediglich VOIGT ET AL. konnten mit ihrer Arbeit eine Zuordnung von Störungsverursachern in einer Getränkeabfüllanlage realisieren. In dieser Arbeit werden Betriebsdaten der Anlage als Gantt-Chart graphisch aufbereitet und als Eingangsvektor für ein Künstliches Neuronales Netz (KNN) verwendet (vgl. auch 2.3.3.1) [304]. Die Klassifizierung erfolgt dabei in einer Art Bildanalyse und hat eine eindeutige Zuordnung zur Folge. Während sich mit Simulationsdaten sehr gute Ergebnisse realisieren ließen (richtige Zuordnung des Verursachers von 98-100%), zeigten sich in der realen Versuchsanlage erste Nachteile der Lösung, die charakteristisch für die Anwendung von KNN sind. Neben einem sehr hohen operativen Aufwand beim Training der Netze (vgl. auch Kapitel 2.3.3.1), das einer Anwendung des Systems vorausgehen muss, ist ein solches Diagnosesystem auch sehr empfindlich und unflexibel was Anlagenmodifikationen angeht. Bereits eine Umstellung der Flaschensorte in der Getränkeabfüllanlage erfordert eine erneute Trainingsphase [304]. Der Black-Box-Charakter von KNN macht eine Interpretation des Antwortverhaltens schwierig (wenn auch nicht unmöglich [256]), was das Ableiten zusätzlicher Erkenntnisse erschwert [187]. Eine anteilige Ursachenzuordnung (in der Literatur im Allgemeinen mit Mehrfachfehler bezeichnet) ist in dem derzeitigen System ebenfalls nicht vorgesehen.

Das beschriebene System von VOIGT ET AL. soll im weiteren Verlauf der Arbeit als Vergleichsobjekt dienen, um die neu entwickelten Ansätze zu bewerten.

In verschiedenen Firmenschriften, wie [175] und [176], gibt es Hinweise auf Schwachstellenanalysen und Diagnosetools als Bestandteil von Systemen zur Datenerfassung und -aufbereitung. Es sind jedoch keine Hinweise über eine automatisierte Funktionsweise oder die Genauigkeit dieser Systeme in der Literatur auffindbar. Dem Autor sind zum Zeitpunkt des Erstellens der vorliegenden Arbeit auch keine Umsetzungen in die Praxis bekannt, die die unter 1 definierten und in der Arbeit detaillierter ausgeführten Anforderungen zufriedenstellend erfüllen.

2.2 Mathematische Modellierung verketteter Linien

Auf einige Grundlagen zur Modellierung von Lebensmittelverpackungsanlagen wurde in 2.1.2 bereits kurz eingegangen. Im Folgenden soll der Stand der Forschung für die Modellierung von verketteten Anlagen dargelegt werden. Zusätzlich sollen Aspekte aufgezeigt werden, die bei einer Anpassung und Erweiterung der vorhandenen Ansätze sowie bei der Entwicklung neuer Modelle im Kontext der vorliegenden Arbeit wichtig sind, um die Charakteristika von Lebensmittelverpackungsanlagen mit den Modellen zu erfassen.

Betrachtet man den Bereich der allgemeinen Anlagenmodellierung, so finden sich verkettete Fertigungslinien als Betrachtungsgegenstand der Warteschlangentheorie [217]. Hierbei werden sie als Linien störanfälliger Maschinen abstrahiert (vgl. z. B. [33] und [41]), in welchen das zu verarbeitende Gut in einer festgelegten Reihenfolge von Maschine zu Maschine befördert wird und Puffer mit Speichervermögen zwischengeschaltet sind, um auftretende kurze Störungen einzelner Maschinen auszugleichen. Die Arbeitsschritte in jeder Fertigungsstation können von einer oder von mehreren parallel betriebenen Maschinen gleicher Funktion durchgeführt werden (vgl. Bild 11).

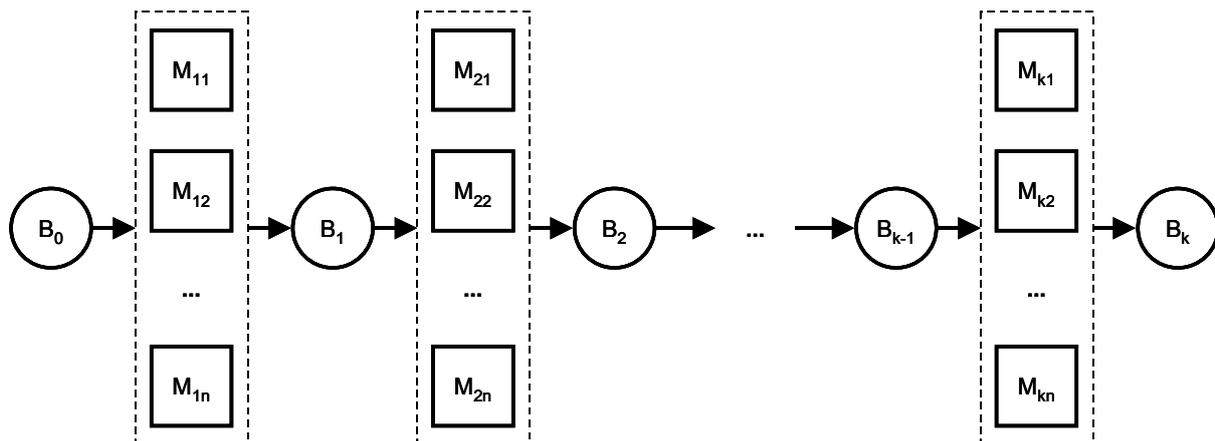


Bild 11: Fertigungslinie mit k Fertigungsstationen n parallel angeordneter Maschinen M und $k+1$ Puffern B nach [33]

Für das Modellieren der Linien wurden von zahlreichen Autoren analytische Ansätze verfolgt. So zeigten [86] und [262], dass auf Basis von Markov-Ketten die Belegung von Puffern näherungsweise vorhergesagt werden kann. Es handelt sich hierbei um stochastische Modelle, die die Zustandsübergänge einer Anlage in Differenzialgleichungssystemen beschreiben. Ähnliche Ansätze, mit dem Ziel der Vorhersage von Anlageneffizienzen bzw. Ausbringungen, verfolgen z. B. auch [122] und [174]. Einen Überblick über weitere Beispiele geben [59], [62] und [217].

Bei diesen stochastischen Modellansätzen müssen jedoch verschiedene Vereinfachungen getroffen werden, damit die Gleichungssysteme lösbar sind. Nach [300] sind hier vor allem folgende Punkte zu nennen:

1. Die Anlage arbeitet in einem stationären Zustand ohne instationäre Veränderung, wie sie z. B. beim Voll- und Leerfahren einer Abfüll- und Verpackungsanlage oder bei in

ihren Ausbringungen gesteuerten oder geregelten Maschinen und Fördereinrichtungen vorkommen.

2. Störungen an einer Fertigungsstation treten rein zufällig, also unabhängig vom Zustand der anderen Stationen auf. Mangel- und Stauzustände, bedingt durch Störungen vor- oder nachgeschalteter Stationen, wirken sich nicht auf andere Maschinen aus.
3. Es ist ausreichend Bedienpersonal vorhanden, um Störungen innerhalb ihrer stochastisch ermittelten Stördauer zu beheben.
4. Maschinenstörungen treten nur laufzeitbezogen auf, d. h. wenn die Maschinen arbeiten und sich in der Regel in Bewegung befinden. Befindet sich eine Maschine in Stau- oder Mangelzustand, kann keine Störung auftreten.
5. Entlang der gesamten Anlage werden keine Güter ausgeschleust.

Zusätzlich ist zu beachten, dass auch folgende, in 2.1 bereits näher erläuterte Aspekte von Abfüll- und Verpackungsanlagen in den bisherigen Modellen weitgehend unberücksichtigt geblieben sind:

6. In Lebensmittelverpackungsanlagen gibt es mehrere Güterströme, die sich gegenseitig beeinflussen: Neben den Primärverpackungen existieren häufig auch Sekundär- und Tertiärverpackungen, die zwar eigene Kreisläufe in der Anlage bilden, sich aber gegenseitig über die Funktionalitäten der einzelnen Maschinen beeinflussen [85].
7. In Lebensmittelverpackungsanlagen existieren sämtliche in 2.1.1 dargestellten Verkettungsformen von Anlagenkomponenten. Hierbei können parallel arbeitende Maschinen auch unterschiedliche Funktionen ausführen, mehrere Maschinen mechanisch oder elektronisch verblockt sein, usw.
8. Die Fördergeschwindigkeiten der Transporteure und die Ausbringungen der Maschinen können gesteuert oder geregelt sein und sind, abhängig von der Liniengestaltung, im Allgemeinen nicht konstant [81].
9. Gerade bei den Transporteuren mit Pufferfunktionalität sind selbst im ungesteuerten Betrieb häufig zahlreiche Bereiche mit unterschiedlichen Fördergeschwindigkeiten miteinander verbunden, so dass nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich keine konstanten Fördergeschwindigkeiten auf den Transporteuren herrschen.
10. Die Maschinen einer Lebensmittelverpackungsanlage besitzen stark unterschiedliche Kapazitäten für die Aufnahme von Objekten, die zum Teil auch zu einer gewissen Pufferwirkung der Aggregate führen.
11. In den einzelnen Güterkreisläufen kann es Schleifen geben. Dies ist vor allem nach Inspektionseinrichtungen zu beobachten, bei denen nicht einwandfrei verarbeitete Einheiten z. B. an den Anfang der Linie zurückgeführt werden, um die Anlage und den damit verbundenen Prozess erneut zu durchlaufen.

Auf diese Punkte soll in 5.2.3 für das unter 4.2.2 vorgestellte Modell intensiv eingegangen werden, um die Vorteile des neuen Modellierungsansatzes darzustellen.

2.3 Wissensbasierte Systeme

Das Lösen von Diagnoseproblemen ist der wohl am besten verstandene Bereich wissensbasierter (Experten-) Systeme [34], [88], [230]. Daher werden in der vorliegenden Arbeit für die Diagnose von Lebensmittelverpackungsanlagen verschiedene wissensbasierte Methoden untersucht und ggf. verwendet.

2.3.1 Definition und Aufbau wissensbasierter Systeme

Für die Definition und das Verständnis wissensbasierter Systeme ist eine Abgrenzung der Begriffe Daten und Wissen hilfreich. Nach BORGELT UND KRUSE unterscheiden sich Daten und Wissen folgendermaßen [31]:

Daten:

- beziehen sich auf Einzelfälle (Zeitpunkte, Objekte, etc.)
- beschreiben individuelle Eigenschaften
- sind oft in großer Zahl/Menge vorhanden (Datenbanken)
- sind gewöhnlich leicht zu erfassen bzw. zu beschaffen
- lassen keine Vorhersagen zu

Wissen:

- bezieht sich auf Fallklassen (Mengen von Zeitpunkten, Personen, etc.)
- beschreibt allgemeine Muster, Strukturen, Gesetze, Prinzipien, etc.
- besteht aus möglichst wenigen Aussagen
- ist gewöhnlich schwer zu finden bzw. zu beschaffen
- lässt Vorhersagen zu

Konventionelle Softwaresysteme bestehen aus Daten und Algorithmen, die mit diesen Daten arbeiten. Eventuell vorhandenes Wissen über das Problem und die Problemlösung sind dabei in die Algorithmen integriert. Das entscheidende Charakteristikum wissensbasierter Systeme ist eine Trennung der Wissensdarstellung über den betrachteten Problembereich von der problemunabhängigen Wissensverarbeitung [22].

Die grundsätzliche Funktionsweise wissensbasierter Systeme lässt sich am besten an dem Aufbau eines Expertensystems erläutern, das laut PUPPE als ein spezielles wissensbasiertes System gesehen werden kann, in dem das Wissen von einem Experten stammt [232] (vgl. Bild 12). Die Wissensbasis stellt den Rahmen für das System dar. Auf ihr operieren die Problemlösungsalgorithmen, die über Erklärungs- und Dialogmodule mit den Anwendern verbunden sind. Außerdem verfügt das System über eine Wissenserwerbskomponente, die den Aufbau der Wissensbasis unterstützt.

Beim Inhalt der Wissensbasis kann zwischen dem fallspezifischen und dem regelhaften Wissen unterschieden werden. Während sich ersteres auf den gerade betrachteten Problemfall bezieht und häufig auch als evidentielles Wissen oder Evidenz bezeichnet wird, ist letzteres der eigentliche Kern der Wissensbasis. Er besteht aus bereichsbezogenem Wissen über die Anwendungsdomäne des wissensbasierten Systems und Allgemeinwissen über Objekte und Beziehungen in der realen Welt [22]. Während das regelhafte Wissen durch den Experten

beeinflusst wird, resultiert das fallspezifische Wissen häufig aus einem Dialog mit dem Benutzer. Entscheidend ist ebenfalls, wie das vorhandene Wissen im System repräsentiert wird, da die unterschiedlichen Repräsentationen die Effizienz beeinflussen können [225].

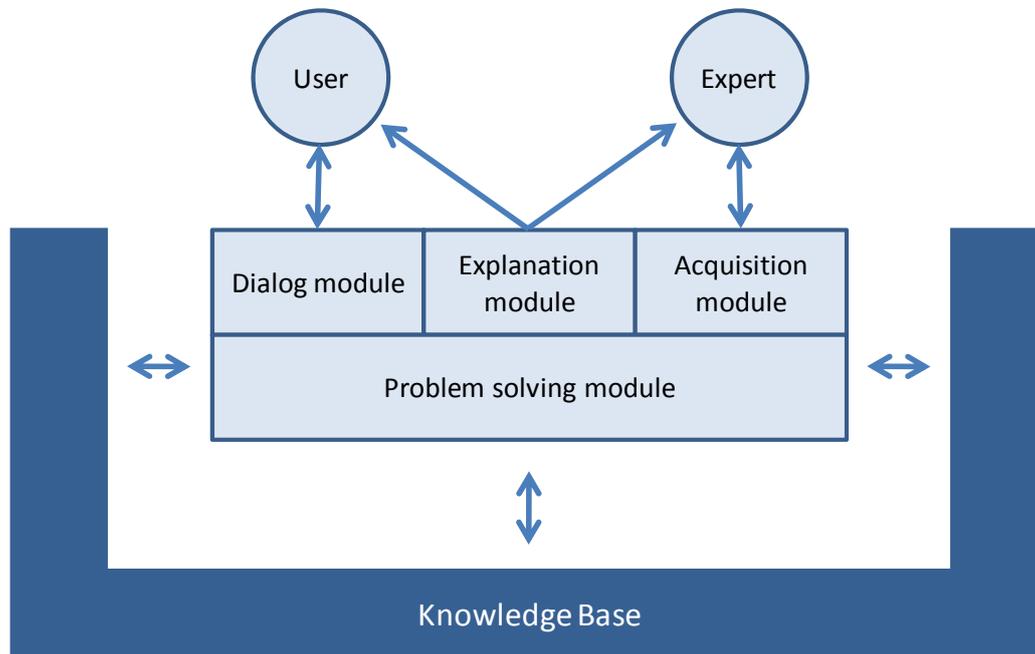


Bild 12: Architektur eines Expertensystems aus funktionaler Sicht nach [231]

Ein wissensbasiertes System ist mit seinen speziellen Vorteilen somit auch immer ein Kompromiss, bei Diagnosesystemen z. B. bzgl. des Aufwands der Wissensakquisition und der Diagnosequalität [230]. Daher ist es häufig sinnvoll, verschiedene Ansätze zu vergleichen. Die unterschiedlichen Faktoren, die bei der Systemauswahl zu berücksichtigen sind, sind in [88] detailliert dargestellt.

Im Folgenden werden unterschiedliche Methoden wissensbasierter Systeme vorgestellt und bezüglich ihrer möglichen Verwendung im Verlauf dieser Arbeit untersucht.

2.3.2 Erfahrungswissensbasierte Methoden

Unter erfahrungswissensbasierten Methoden versteht man Ansätze, deren Wissensbasis durch Experten aufgebaut wird. Hieraus resultiert auch die häufig gebrauchte Bezeichnung „Expertensysteme“ (siehe oben). Systeme dieser Art zählen zu den ältesten der wissensbasierten Systeme [22]. Eine besondere Rolle in der Entwicklungsgeschichte spielte dabei das in der Stanford University erarbeitete medizinische Diagnosesystem MYCIN, in dem erstmals zur Diagnose von Meningitis und bakteriellen Infekten Regeln eingesetzt wurden [37], [88]. Die Ergebnisse dieses Systems entsprachen den Diagnosen guter Fachärzte und bewiesen damit die prinzipielle Anwendbarkeit solcher Systeme zur Unterstützung der Experten [136].

2.3.2.1 Regelbasierte Methoden

Die Entwicklung der Expertensysteme wurde sehr stark von dem regelbasierten Paradigma beeinflusst [116]. Die Regeln bestehen dabei aus einem Bedingungsteil und einer Konklusion. Sie können folgendermaßen formalisiert werden:

if A then B

wobei die Prämisse A und die Konklusion B Ausdrücke verschiedener Wissensrepräsentationsformen sind². Es kann sich hierbei auch um komplexe Formeln handeln, die jedoch nach BEIERLE UND KERN-ISBERNER folgende Bedingungen erfüllen müssen [22]:

- In der Prämisse einer Regel dürfen keine Disjunktionen (oder-Verknüpfungen) auftreten
- Die Konklusion einer Regel darf nur aus einem Literal (positiv oder negiert) bestehen

Dabei lassen sich aber Regeln, die diese Anforderungen nicht erfüllen, durch das Distributivgesetz und die de Morgan'sche Regel so umformen, dass die Prämisse aus einer Disjunktion von Konjunktionen und die Konklusion aus einer Konjunktion von Disjunktionen besteht [22]. Damit ist es möglich, jede Regel in mehrere kleinere Regeln zu überführen, die den Anforderungen genügen, z.B. lässt sich ***if A ∧ (B ∨ C) then D***

in die Regeln ***if A ∧ B then D*** und ***if A ∧ C then D*** überführen.

Die Wissensbasis besteht also aus Regeln über verschiedene Variablen und ihre Wertebereiche und wird bei Eintreten eines speziellen Falls um das evidentielle Wissen dieses Falls erweitert. Die grundlegende Inferenzregel, die auf dieser Wissensbasis arbeitet, ist bei den regelbasierten Methoden der *modus ponens*:

if A then B	(Regel)
<u>A = true</u>	(Evidenz)
B = true	(Folgerung)

Um effizient Wissen ableiten zu können, ist jedoch die Verkettung der Regeln entscheidend. Hierbei unterscheidet man zwischen der Vorwärts- und der Rückwärtsverkettung.

Bei der Vorwärtsverkettung, die auch als datengetriebene Inferenz bezeichnet wird, werden die Regelprämissen nach bestimmten Auswahlkriterien überprüft und „feuern“ bei Erfüllung durch die entsprechenden Evidenzen (Daten) [231]. Sich hierdurch ergebende Folgerungen können wieder dazu führen, dass andere Regeln feuern. Ein Beispiel für die Verwendung der Vorwärtsverkettung ist das Eingabesystem CLIPS, das für das Erstellen von regelbasierten Expertensystemen genutzt werden kann [208], [238].

Die Rückwärtsverkettung, die auch zielorientierte Inferenz genannt wird, orientiert sich an einem bestimmten Ziel(objekt) und dem zugehörigen Zustand. Dabei wird eine Schlussfolgerung vorgegeben und es wird geprüft, ob die zur Stützung dieser Schlussfolgerung benötigten Fakten vorhanden sind. Ein System, welches das Erstellen von regelbasierten Systemen nach dem Prinzip der Rückwärtsverkettung erlaubt, ist beispielsweise JESS [134].

² Auf eine Einführung in Grundlagen der Aussagen- und Prädikatenlogik und anderer Wissensrepräsentationsformen wird an dieser Stelle und auch im weiteren Verlauf der Arbeit verzichtet. Es sei jedoch auf entsprechende Fachliteratur, wie [22], [25], [99] und [127], verwiesen.

Um die Regelverkettung anschaulich darzustellen, werden Regelnetzwerke genutzt. Darin lassen sich Regeln wie in Bild 13 verdeutlicht darstellen.

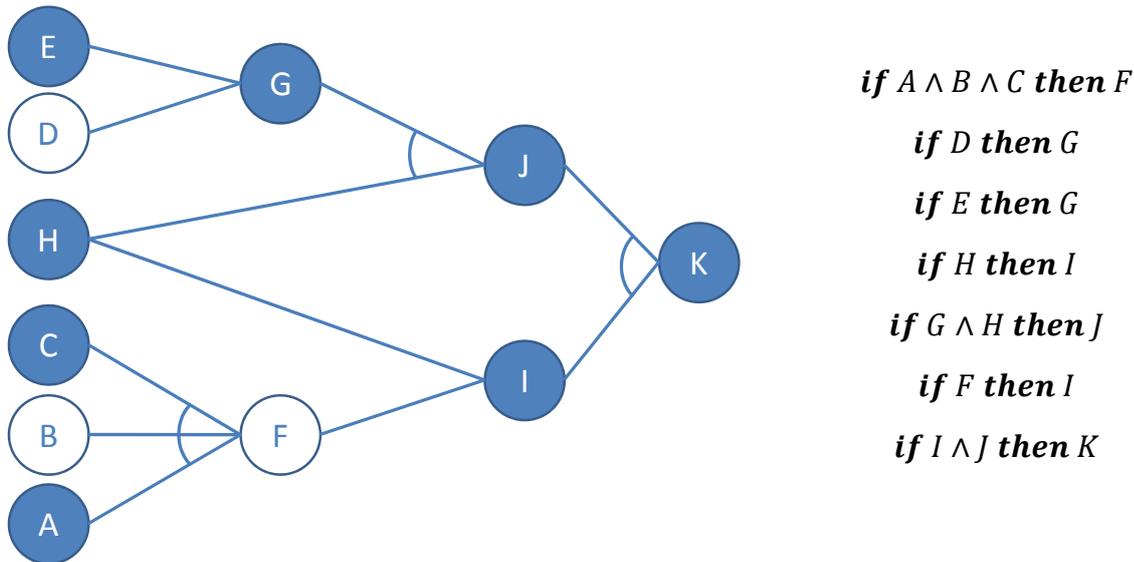


Bild 13: Regelnetzwerk zum Beispiel mit Vorwärtsverkettung, die Kreisbögen symbolisieren Konjunktionen

Beim Eintreten der Fakten (z. B.: $A, C, H, E = \text{TRUE}$) ergeben sich dann bei einer Vorwärtsverkettung schrittweise die entsprechenden Folgerungen (vgl. farbige Markierungen in Bild 13). Diese Abbildung deutet auch auf die enge Verwandtschaft zu einer anderen, erfahrungswissensbasierten Methode, den Entscheidungsbäumen, hin.

2.3.2.2 Entscheidungs- und Fehlerbäume

Die wahrscheinlich bekannteste und am weitesten verbreitete erfahrungswissensbasierte Methode sind Entscheidungsbäume [31], [88]. Hierbei wird ein Baum aufgebaut, bei dem die Wege von der Wurzel über die einzelnen Knoten des Baums zu den Blättern verschiedene Attribut/Wert-Paare darstellen. Die einzelnen Blätter des Baums repräsentieren dabei die Entscheidungen für das Problem³. Ein einfaches Beispiel für einen Entscheidungsbaum zeigt Bild 14.

Die Bäume können dabei auch als Grundlage für die Erstellung von Regeln dienen. So kann aus dem in Bild 14 dargestellten Baum z. B. die Regel

if ($\text{Blutdruck} = \text{normal}$) \wedge ($\text{Alter} > 50$) **then** $\text{Medikamentenauswahl} = \text{Medikament } B$

abgeleitet werden. Auch das Repräsentieren vorhandener Regeln in Entscheidungsbäumen zur besseren Visualisierung ist problemlos möglich.

Ein wesentlicher Vorteil von Entscheidungsbäumen ist, dass sie sich auch automatisch aus Daten generieren lassen (z. B.: [248]) und für Anwender leicht verständlich sind [52]. Sie stellen damit ein Bindeglied zwischen den erfahrungswissensbasierten und den fallbasierten

³ An dieser Stelle, sowie im weiteren Verlauf der Arbeit (z. B. bei den probabilistischen Netzwerken), soll nicht auf graphentheoretische Grundlagen eingegangen, sondern auf die entsprechende Fachliteratur, wie z. B. [58] und [169] verwiesen werden.

Methoden (vgl. 2.3.3) dar. Hieraus wird auch ersichtlich, dass eine Abgrenzung der einzelnen Methoden nach den in der vorliegenden Arbeit verwendeten, aus [88] abgeleiteten Kategorien, nicht immer problemlos möglich ist.

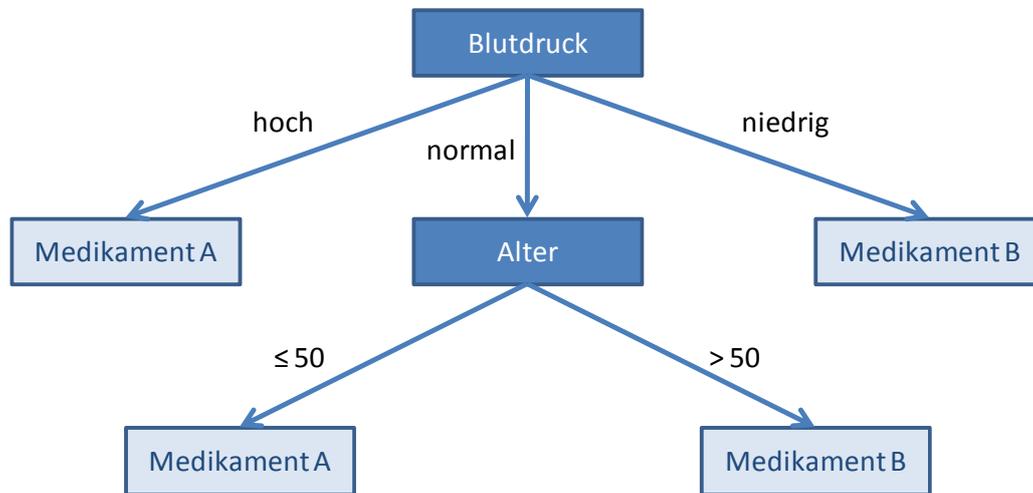


Bild 14: Entscheidungsbaum zur Medikamentenauswahl

Als nachteilig erweist sich, dass Entscheidungsbäume komplexer Systeme oft sehr groß und unübersichtlich werden und im Allgemeinen systemspezifisch sind, was bedeutet, dass häufig schon bei kleinen Änderungen ein Update des Baums notwendig ist [98].

2.3.2.3 *Unschärfe Methoden*

Ein Nachteil der bisher dargestellten erfahrungswissenbasierten Ansätze ist, dass die klassischen Systeme mit scharfen Grenzwerten arbeiten. So wird im in Bild 14 dargestellten Beispiel ein Patient mit normalem Blutdruck (auch mithilfe scharfer Grenzen klassifiziert) kurz vor seinem 50. Geburtstag Medikament A und kurz danach Medikament B verordnet bekommen, obwohl er sich praktisch in der gleichen Lebenssituation befindet.

Um diese Problematik zu umgehen, können unscharfe Regeln verwendet werden. Die Idee der Abbildung unscharfer Mengen geht auf die Arbeiten von ZADEH zurück [15], [22], [324], [325]. Der grundsätzliche Gedanke ist dabei, Mengen nicht mehr durch die Angabe ihrer einzelnen Elemente oder Wertebereiche darzustellen und scharf voneinander abzugrenzen, sondern einzelnen Elementen zu ermöglichen, nur teilweise zu einer bestimmten Menge zu gehören. Die Mengen erhalten dadurch weiche oder unscharfe Grenzen. Auf das oben genannte Beispiel bezogen bedeutet das Folgendes: Während bei der bisherigen Menge von Menschen mit normalem Blutdruck ein scharfer Grenzwert besteht, soll durch die Verwendung einer Fuzzy-Menge diese Grenze fließend werden und damit eine Unterteilung in „alt“, „nicht alt“ und verschiedene graduelle Zugehörigkeiten ermöglichen. Die Unterschiede zwischen der scharfen und der Fuzzy-Menge verdeutlicht Bild 15. Mit solchen Mengen lassen sich auch Fuzzy-Entscheidungsbaume erstellen oder automatisch aus Daten ableiten (vgl. z. B. [309]).

Für nähere Betrachtungen der Fuzzy-Logik und angrenzender Bereiche der Possibilistik sei an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur, wie [16], [22], [95], [198] und [296] verwie-

sen, da sie in der vorliegenden Arbeit aufgrund der in 2.4 dargestellten Gründe keine Verwendung findet.

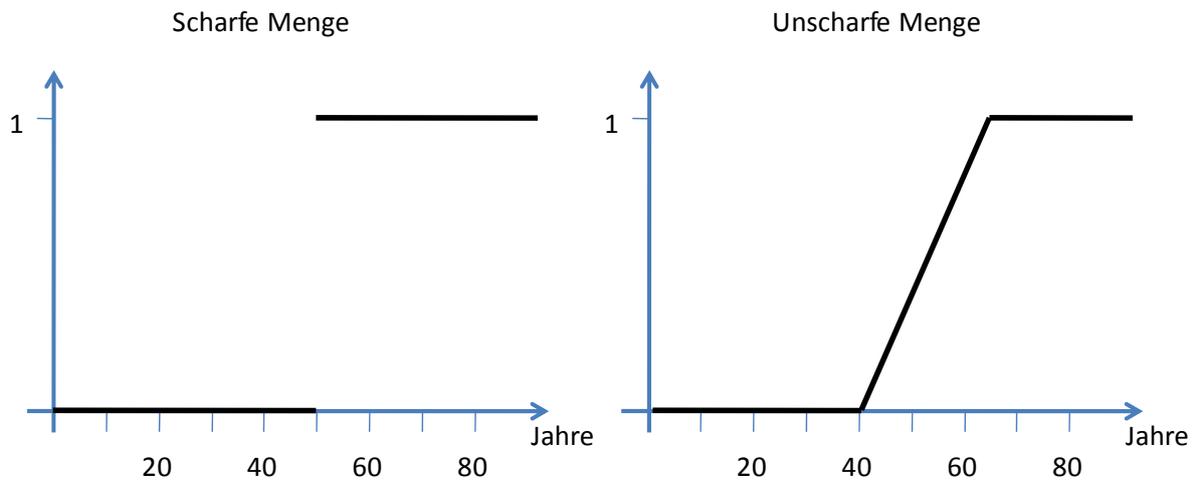


Bild 15: Vergleich der klassischen scharfen mit der unscharfen Fuzzy-Menge für „alt“

2.3.2.4 Weitere Methoden

Auch weitere Methoden, wie die probabilistischen Bayes'schen Netze, können zu den erfahrungswissenbasierten Methoden gezählt werden. Dies gilt vor allem dann, wenn die Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Experten abgeschätzt werden. Da psychologische Experimente jedoch bewiesen haben, dass selbst Experten aus den betrachteten Disziplinen Wahrscheinlichkeiten sehr schlecht einschätzen können (vgl. [88] und [290]), werden diese in der vorliegenden Arbeit ausschließlich unter dem Punkt 2.3.3 kurz behandelt.

2.3.2.5 Diagnoseanwendungen mit erfahrungswissenbasierten Methoden

Tabelle 2: Medizinische Systeme mit erfahrungswissenbasierten Methoden

Anwendungsgebiet	Regelbasiertes System	Entscheidungsbaum	Fuzzy-Logik
Tuberkulose Diagnosetool TUMBERDIAG (besteht aus mehr als 1000 Regeln)	[139]		
Klassifizierung von Herzkrankheiten, Karzinomen oder von verschiedenen anderen Erkrankungen		[181], [218], [244]	
Vergleich verschiedener Diagnoseverfahren unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten (als Grundlage zur Aufwandsabschätzung)		[297]	
Systeme für die Brustkrebs-Diagnose (System ClaDia sowie System zur Erweiterungen von statistischen Abschätzungen)			[306], [320]
Vorbereitung und Auswertung von Elektrokardiogramm-Daten			[223]

Die erfahrungswissensbasierten Methoden kommen bei einer Vielzahl von Diagnoseaufgaben zum Einsatz. Neben dem oben schon erwähnten System MYCIN, das neben seinem Pionier-Status ein über die Jahre gewachsenes Regelsystem darstellt, zählen auch viele andere, neuere medizinischen Systeme zu ihrem Hauptanwendungsgebiet, wobei aufgrund der schwierigen Beschreibbarkeit der Symptome in der Medizin häufig unscharfe Regelsysteme eingesetzt werden [65]. Einige typische Beispiele sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 3: Technische Systeme mit erfahrungswissensbasierten Methoden

Anwendungsgebiet	Regelbasiertes System	Entscheidungsbaum	Fuzzy-Logik
Diagnose von Netzwerk-Problemen (Quality of Service (QoS) Verletzungen, Protokollfehler)	[5], [165]		
Diagnose von fehlerhaften Komponenten und Subsystemen in Netzwerken		[52]	[183], [280]
Überwachung und Diagnose von Stromnetzen			[53]
Transformatoridiagnose (auch Diagnose von Mehrfachfehlern) zur vorbeugenden Instandhaltung mithilfe von Analysen gelöster Gase (Dissolved Gas Analysis, DAG)			[277]
Fehlerdiagnose verschiedener Komponenten in Automobilen			[191]
Fehlerdiagnose von Ventilen			[30]
Diagnose chemischer Prozesse (diskontinuierliche und kontinuierliche Prozesse)	[207]		[64], [166] ⁴
Überwachung und Diagnose einer kompletten Anlage für anaerobe Abwasserbehandlung			[46]
Diagnose von Abhängigkeiten und Darstellung möglicher Störungfortpflanzungswege in Fertigungssystemen			[166] ⁴
Unterstützung der Entscheidungsfindung beim Ersatzteile- und Werkzeugeinsatz im Fehlerfall in flexiblen Fertigungsanlagen	[216]		
Maschinen-Diagnosetool (z.B. als Bestandteil eines Hypermedia-Anlageninformationssystems oder direkt auf der Steuerung umgesetzt)	[121], [199]		

⁴ Hierbei handelt es sich um eine Kombination von Graphensuchverfahren, Genetischen Algorithmen und Fuzzy-Logik, die für verschiedene Problemstellungen eingesetzt werden kann

Doch da die Fehlerdiagnose ein klassisches Ingenieurproblem ist, kommen auch in technischen Anwendungen erfahrungswissensbasierte Methoden zum Einsatz, was für die vorliegende Arbeit von besonderem Interesse ist [191]. Eine Übersicht über typische Problemstellungen, die mithilfe erfahrungswissensbasierter Systeme diagnostiziert werden, zeigt Tabelle 3.

2.3.3 Fallbasierte Methoden

Die Wissensbasis fallbasierter Methoden besteht nicht aus einer Sammlung von regelhaften Zusammenhängen, sondern aus einer Menge bekannter Fälle, in denen diese Zusammenhänge implizit gespeichert sind. Neue Fälle werden über geeignete Methoden mit den bekannten Fällen verglichen und auf Ähnlichkeiten untersucht. Man kann den fallbasierten Inferenzprozess somit als einen „erinnerungsbasierten Prozess“ ansehen [22].

Häufig werden in der Wissensbasis zusätzlich zu den Fällen auch regelhafte Zusammenhänge oder Modelle abgelegt [22]. Dies unterstreicht die Schwierigkeit bei der Abgrenzung der einzelnen Methoden nach der vorliegenden Klassifikation. Ein gutes Beispiel hierfür sind die probabilistischen Bayes'schen Netze (vgl. auch 2.3.2), bei denen die statistische Information aus den vorliegenden Fällen, der Netzaufbau jedoch häufig aus dem Erfahrungswissen des Experten abgeleitet wird.

Einer der größten Vorteile fallbasierter Systeme ist die automatische Wissensakquisition bzw. das „maschinelle Lernen“ aus Daten. Für nähere Informationen zu Lernverfahren sei auf [88] und [233] verwiesen.

In der vorliegenden Arbeit sollen alle Systeme, bei denen die Wissensbasis im Wesentlichen aus bekannten Fällen *abgeleitet* wird, zu den fallbasierten Systemen gezählt werden, auch wenn in der Fachliteratur häufig weitere Differenzierungen zu finden sind.

2.3.3.1 Künstliche Neuronale Netze

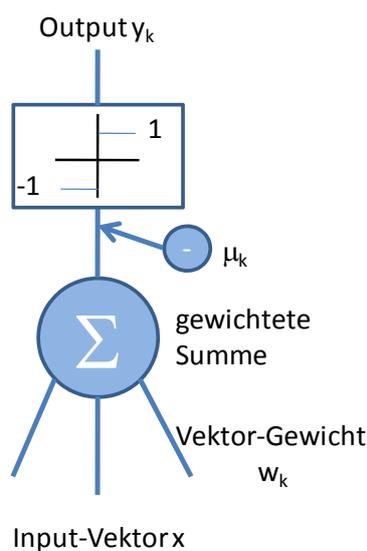


Bild 16: McCulloch and Pitts Neuron nach [241]

Künstliche Neuronale Netze (KNN), wie das in dieser Arbeit verwendete Referenzsystem nach [304], sollen den Denkprozess des Menschen nachbilden. Dazu wird versucht, das menschliche Nervensystem, das aus ca. 25 Milliarden Neuronen (Nervenzellen) besteht, funktionell nachzubilden [224]. Die Grundidee dabei ist, dass Neuronen untereinander vernetzt sind und bestimmte Reize in diesem Netzwerk weiterleiten. Wird bei einem Neuron durch die eintreffenden Reize ein Schwellwert überschritten, so „feuert“ dieses Neuron und gibt damit die Reize an die Neuronen weiter, mit denen es selbst verbunden ist. Dies lässt sich für künstliche Neuronen (*McCulloch and Pitts Neuron* [194]) wie in Bild 16 darstellen und in Form der sogenannten Aktivierungsfunktion formalisieren (für Variablenbezeichnungen siehe Bild 16):

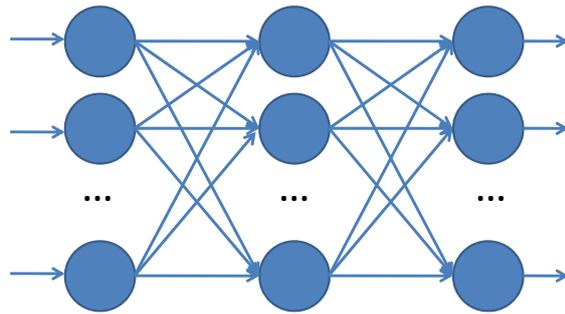
$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \sum_j w_{kj}x_j - \mu_k \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Um diese Neuronen für eine Diagnoseaufgabe nutzbar zu machen, wird ein Netz aufgebaut, das mindestens aus einer Eingangs- und einer Ausgangsschicht besteht. Hinzu kommen x sogenannte verdeckte Schichten.

Dieses Netz kann als gewichteter, gerichteter Graph betrachtet werden, wobei man grundsätzlich zwei Netzwerkarchitekturen unterscheidet [98]:

- Feed Forward Architekturen ohne Rückkopplung der einzelnen Schichten
- Recurrent Architekturen mit Rückkopplung zwischen den Schichten.

Die Rückkopplung bedeutet dabei, dass eine Erinnerung an frühere Eingangswerte vorliegt.



Eingangsschicht Verdeckte Schicht Ausgangsschicht

Bild 17: Feed Forward Multi-Layer Netz mit einer verdeckten Schicht

Das so entstandene Netzwerk (vgl. Bild 17)

wird daraufhin mit Datensätzen von be-

kannten Fällen trainiert, um die zu Beginn dieser Phase beliebigen Gewichte für die Diagnoseaufgabe einzustellen. Man unterscheidet dabei das überwachte Lernen, bei dem das Netz mit vorgegebenen Beispielen trainiert wird (z. B. mithilfe des Backpropagation-Algorithmus [245]), und das unüberwachte Lernen, bei dem sich das Netz selbständig anhand von Gesetzmäßigkeiten in den Eingabedaten trainiert [224].

Auf die einzelnen Netztopologien (z. B.: Multilayer-Perzeptron, Hopfield-Netz, Kohonen-Netz, usw.) und die unterschiedlichen Lernalgorithmen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen, sondern auf die entsprechende Fachliteratur, wie [110], [127], [251] und [326], verwiesen werden.

Bei dem auch von VOIGT ET AL. verwendeten, überwachten Lernen wird neben dem Eingangsvektor des Netzes auch der Vektor an der Ausgangsschicht vorgegeben [300]. Durch die Lernregel passt das Netz in mehreren Schritten die Gewichte der einzelnen Neuronenschichten dann so an, dass das Netz aus dem Eingangsvektor den Ausgangsvektor produziert. Dies wird für möglichst viele, für die Diagnoseaufgabe repräsentative Fälle durchgeführt. Nach dieser Lernphase ist das Netz in der Lage, ähnliche Fälle, wie die bereits aufgetretenen, aufgrund ihres Eingangsvektors zu klassifizieren. Es greift dabei nicht mehr direkt auf die Trainingsfälle zu, sondern entscheidet aufgrund der durch diese antrainierten Gewichte [101].

2.3.3.2 Probabilistische Netzwerke

In probabilistischen Netzwerken werden Zusammenhänge zwischen verschiedenen Variablen graphisch dargestellt. Dem so entstandenen Graphen werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet, die die verschiedenen Abhängigkeiten quantifizierbar machen.

In Markov-Netzen werden direkt voneinander abhängige Variablen durch Kanten miteinander verbunden. Sind die Variablen nur indirekt voneinander abhängig (bedingt unabhängig), so sind sie über Wege ≥ 2 miteinander zu verbinden [22]. Dabei sind Variablen bedingt unabhängig, wenn für ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungen P gilt:

$$P(A \wedge B | C) = P(A|C) * P(B|C)$$

wobei $P(X|Y) = \frac{P(X \wedge Y)}{P(Y)}$ die Wahrscheinlichkeit angibt, dass wenn Y erfüllt ist auch X wahr ist. Für nähere Betrachtungen siehe [22] und für die Anwendung von Markov-Ketten bei der Anlagenmodellierung [234].

Das Problem bei Markov-Graphen besteht darin, dass sie ungerichtet sind. Dies lässt sich an einem einfachen Beispiel verdeutlichen:

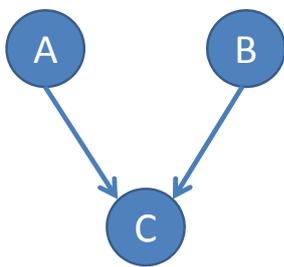


Bild 18: DAG zum Beispiel

Bei einem Spiel passiert ein bestimmtes Ereignis C genau dann, wenn ein Sechserpasch mit zwei Würfeln A und B geworfen wird. Die idealen Würfel werden so geworfen, dass sie sich nicht beeinflussen. Damit sind die Ergebnisse der Würfel unabhängig voneinander, jedoch bedingt abhängig unter C . Dies lässt sich in den Markov-Graphen nicht befriedigend darstellen, da der Graph nicht gleichzeitig die Unabhängigkeit zwischen A und B und die Abhängigkeit zwischen den drei Variablen ausdrücken kann.

Eine Lösung für dieses Problem stellen (azyklische) gerichtete Graphen (Directed Acyclic Graphs, DAG) dar. Diese finden in den sogenannten Bayes'schen Netzen Verwendung. Eine Abbildung des Beispiels zeigt Bild 18.

Durch die Pfeile wird die Richtung der Beeinflussung eindeutig dargestellt: die Würfelergebnisse A und B bedingen das Ereignis C , nicht jedoch umgekehrt. Es kann aber aus der Beobachtung C auf die Ereignisse A und B rückgeschlossen werden.

Dabei sind in größeren Netzen insbesondere die Eltern-Kind-Beziehungen der Knoten von Interesse, da die Eltern-Knoten die direkten Ursachen repräsentieren, die auch den Einfluss anderer, indirekter Ursachen verhindern können. Ein Bayes'sches Netz ist somit ein DAG, in dem jede Variable bedingt unabhängig von ihren Nicht-Nachkommen bei gegebenen Werten ihrer Elternknoten ist [22].

Für eine nähere Betrachtung sei an dieser Stelle auf die „Standard-Beispiele“ mit *Watson und Holmes* in der Fachliteratur verwiesen (z. B. in [17], [50] und [203]).

2.3.3.3 Weitere Methoden (CBR)

Case-Based-Reasoning-(CBR)-Systeme greifen, im Gegensatz zu den oben beschriebenen, direkt auf die abgespeicherten Fälle zu und klassifizieren neu auftretende Fälle mithilfe von Ähnlichkeitsmaßen [101]. Als Beispiel hierfür sei die Minimum-Abstand-Klassifikation (MAK) (vgl. [113], [136] und [314]) genannt.

Tabelle 4: Systeme mit fallbasierten Methoden

Anwendungsgebiet	KNN	probabilistische Netzwerke	CBR
Krebsdiagnose (Wahrscheinlichkeiten für eine Krebserkrankung, Diagnose und Klassifizierung von Tumoren durch Auswertung von Bilddaten, Analyse von Massenspektrogrammen und HPLC-Daten oder DNA-Analysen)	[2], [51], [54] [153], [319], [328], [255]	[8], [40]	[113]
Analyse von Netzwerken (quantifizierbare Betrachtung möglicher physikalischer Fehler und von Protokoll-Fehlern)		[35], [155], [263]	
Fehlerlokalisierungen in Stromnetzen		[55]	
Diagnose von elektronischen Komponenten in komplexen Geräten auf Basis von Infrarotbildern	[186]		
Fehlerlokalisierung in analogen Schaltkreisen in Form einer Wavelet-Analyse	[7]		
Diagnose und Wartungsunterstützung bei Druckerproblemen		[261]	
Lokalisierung fehlerhafter Komponenten in Düsentriebwerken		[242]	
Diagnose einer Gasturbine (basierend auf Daten von ca. 2000 Sensoren)			[70]
Analyse von Motoren auf Grund von Vibrationen und Geräuschen	[184], [190], [247], [318]		
Diagnose von Herstellungsfehlerursachen in Fertigungsprozessen		[240]	
Unterstützung zur Wartung von Maschinen für Fertigungsprozesse		[310]	

Der allgemeine CBR-Prozess lässt sich dabei mit folgenden Schritten beschreiben [1], [23], [69], [98]:

- Wissens- oder Fall-Repräsentation (Represent): Auswahl, welche Daten in welcher Form als Fall abzuspeichern sind
- Fall-Selektierung (Retrieve): Auswahl des ähnlichsten Falls, bzw. der ähnlichsten Fälle
- Fall-Wiederverwendung (Reuse): Verwendung der gefundenen Fälle, um Unterschiede und Zusammenhänge zum aktuellen Fall ausfindig zu machen und das gespeicherte Fallwissen zur Lösung heranzuziehen

- Fall-Überprüfung (Revise): Bewertung der Lösung aus der Wiederverwendungsphase
- Fall-Aufnahme (Retain): Hinzufügen des neuen Falls oder neuer Erkenntnisse aus dem Fall zur Wissensbasis

Nach LIOA können hierbei auch nicht erfolgreich zugeordnete Fälle in der Wissensbasis abgelegt werden, wobei jedoch eine Erklärung beizufügen ist, damit diese auch sinnvoll genutzt werden können [188].

2.3.3.4 Diagnoseanwendungen mit fallbasierten Methoden

Fallbasierte Methoden sind vor allem in den Bereichen sinnvoll, in denen eine Vielzahl von Merkmalen und vor allem eine Vielzahl von klassifizierten Fällen vorliegen. Dabei ist es wichtiger, viele Symptome zu erhalten, als formalisierbares Wissen ableitbar zu machen.

Daher ist auch oder gerade bei diesen Systemen der Haupteinsatzbereich im medizinischen Sektor zu finden, wobei, wie auch Tabelle 4 zeigt, die Krebsdiagnose eine Sonderstellung einnimmt. Auch in zahlreichen anderen medizinischen Bereichen finden sich Umsetzungen fallbasierter Methoden, auf die jedoch wegen der geringen Bedeutung für diese Arbeit nicht näher eingegangen wird. Eine gute Übersicht für medizinische Anwendungen geben [137], [173], [189] und [204]. Einen Vergleich zu regelbasierten Systemen bietet [214].

Zusätzlich werden fallbasierte Methoden in weiten Bereichen der Technik eingesetzt. Hierbei orientiert sich die Auswahl der passenden Methode häufig daran, ob grundsätzliche Zusammenhänge bekannt sind, was den Einsatz probabilistischer Netzwerke begünstigt, oder ob das Erfassen und Darstellen von Zusammenhängen schwer möglich ist, was den Einsatz von KNNs oder CBR sinnvoll erscheinen lässt.

2.3.4 Modellbasierte Methoden

Bei den modellbasierten Methoden wird versucht, die Struktur und die kausalen Zusammenhänge des zu untersuchenden Systems in einem Modell nachzubilden [128]. Da hierbei die grundsätzlichen (physikalischen) Zusammenhänge modelliert werden, nennt man das modellbasierte Schließen auch „reasoning from first principles“ [268]. Dies stellt eine grundsätzliche Abgrenzung zu den oben beschriebenen erfahrungswissensbasierten und fallbasierten Systemen dar. Dabei wird eine Unterscheidung zwischen der strukturellen Beschreibung (structural description) und der Verhaltensbeschreibung (behavioural description) der einzelnen Elemente gemacht. Die Verhaltensmodelle werden in einer Modellbibliothek abgelegt und können unabhängig von der Struktur des Problems wiederverwendet werden [88]. Dies erleichtert die Wartung und die Wiederverwendung, die wichtige Anforderungen an effiziente wissensbasierte Systeme darstellen [120], [230].

Nach REITER lassen sich die Verhaltensmodelle *LIB* und die Systemstruktur *STRUCTURE* zur Systembeschreibung *SD* zusammenfassen [236]:

$$SD = LIB \cup STRUCTURE$$

Das Modell wird dann mit dem realen System verglichen, indem die Eingangsvariablen des Systems auch als Eingangsvariablen des Modells dienen. Der Vergleich des Verhaltens von

System und Modell über die Ausgangsvariablen kann für die Analyse des Systems genutzt werden. Auch die umgekehrte Analyse der Eingangsvariablen auf Basis der Ausgangsvariablen ist möglich [67]. Man unterscheidet bei den modellbasierten Methoden mehrere Herangehensweisen. Da die modellbasierte Diagnose nach STRUSS innerhalb der modellbasierten Systeme „sowohl theoretisch als auch im Hinblick auf industrielle Anwendung am weitesten fortgeschritten“ ist und im Folgenden Diagnoseanwendungen von besonderem Interesse sind, beschränkt sich die Arbeit auf die Beschreibung der konsistenzbasierten Komponenten- und Prozess-orientierten Diagnosemethoden [268].

2.3.4.1 *Konsistenzbasierte Diagnose mit Komponenten-orientierten Modellen*

Die konsistenzbasierte Diagnose zählt zu den verbreitetsten Methoden der modellbasierten Diagnose [229]. Unter konsistenzbasierter Diagnose versteht man, dass ein Modell des korrekten Verhaltens $MODEL_{OK}$ und die realen Beobachtungen aus dem System OBS auf Widerspruchsfreiheit bzw. Konsistenz untersucht werden, wobei das festgelegte Zielverhalten $GOALS$ des Systems durch das $MODEL_{OK}$ impliziert wird [268]:

$$MODEL_{OK} \cup OBS \vdash^? \perp, \quad MODEL_{OK} \Rightarrow GOALS$$

Bei der Komponenten-orientierten Diagnose besteht das Systemmodell in seinem fehlerfreien Zustand aus einer Menge von Modellen fehlerfreier Komponenten $COMPS$, die in einer festgelegten Struktur interagieren [267]:

$$SD \cup \{ok(C) \mid C \in COMPS\} \cup OBS \vdash^? \perp$$

Dabei ist darauf zu achten, dass die Komponenten bei der Modellierung in keinen impliziten Zusammenhang gesetzt, sondern kontextfrei, also unabhängig von Annahmen über Randbedingungen, modelliert werden. So wäre beispielsweise die Modellierung eines Ventils nicht kontextfrei, wenn das Modell für den Fall eines offenen Ventils einen Volumenstrom aus dem Ventil heraus vorsähe, da dies impliziert, dass auch etwas in das Ventil hineinkommt. Es muss vielmehr ein Modell erstellt werden, dass für den offenen Fall vorsieht, dass das was hineinfließt auch hinauslaufen kann.

Den einzelnen Komponenten können dabei mehrere Verhaltensweisen $modes(C_i)$ zugewiesen werden, die im einfachsten Fall aus den Modi okay ($ok(C_i)$) und fehlerhaft ($\neg ok(C_i)$) bestehen. Dabei stellen die Belegungen der Komponenten mit ihren entsprechenden Modi, die sogenannte Moduszuweisung MA , eine (Fehler-)Hypothese dar, die auf Konsistenz mit den Beobachtungen und der Systembeschreibung überprüft werden kann. Unter den in [268] angegebenen Randbedingungen (korrekter Systementwurf, fixierte Konstituenten, bekannte Struktur, keine Strukturfehler, nur Komponentenfehler) gilt sie dabei als Diagnose bzw. Diagnosekandidat, wenn sie konsistent ist:

$$SD \cup \{MA\} \cup OBS \not\vdash \perp$$

Beschränkt man sich auf die Modi $ok(C_i)$ und $\neg ok(C_i)$, so dient dies in erster Linie der Fehlerlokalisierung, also der Erkennung, welche Komponente defekt ist. Durch das Zuweisen verschiedener Modi ist eine Erweiterung der Diagnose auf eine Fehleridentifikation möglich. Ein großer Vorteil gegenüber anderen Methoden ist hierbei, dass schon ein Modell des fehlerfrei-

en Verhaltens eines Systems Diagnosehypothesen erlaubt, wobei auch unbekannte Fehler diagnostiziert werden können. Außerdem ist die Diagnose von Mehrfachfehlern möglich [67], [88], [268]. Um die Diagnosekandidaten einzuschränken, bzw. um bestimmte Fehler zu priorisieren, ist es möglich, zusätzlich zu dem Modell des fehlerfreien Verhaltens auch spezielle Fehlermodelle, kombiniert mit Wahrscheinlichkeitskriterien oder anderen Inferenzen, zu definieren [67], [98], [237], [226].

Für die Berechnung der Diagnosen kommen unterschiedliche Algorithmen bzw. Diagnosemaschinen zum Einsatz, auf die an dieser Stelle jedoch lediglich anhand der entsprechenden Fachliteratur verwiesen werden soll:

- Algorithmus basierend auf *Conflicts und Hitting Sets* nach REITER [236]
- *Default-based Diagnostic Engine (DDE)* nach DRESSLER UND STRUSS [89], [90]
- *DRUM (II)* nach FRÖHLICH ET AL. [106], [107]
- *General Diagnostic Engine (GDE)* nach DE KLEER ET AL. [68]
- *GDE⁺* nach DRESSLER UND STRUSS [269]
- *Structure Based Abduction (SBA)* nach DECHTER ET AL. [93]
- *TREE* nach STUMPTNER ET AL. [276]

In dem in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Software-Tool zur Umsetzung der modellbasierten Diagnose wird die in der Aufzählung hervorgehobene Diagnosemaschine DDE verwendet. Da diese jedoch in der vorliegenden Version keine zeitlichen Bezüge zwischen Ursache und Wirkung herstellen kann, muss sie, ähnlich wie in [221] beschrieben, in ein System integriert werden, dass die zeitlichen Bezüge für die Diagnose eliminiert (siehe Kapitel 4.2.2.2).

2.3.4.2 *Konsistenzbasierte Diagnose mit Prozess-orientierten Modellen*

Bei vielen technischen Systemen, wie z. B. Anlagen für Fermentationsprozesse, fällt das Zerlegen in sinnvolle Komponenten schwer, da neben den technischen Bestandteilen auch biologische, chemische und physikalische Prozesse eine entscheidende Rolle spielen. Eine Einhaltung der oben dargestellten Randbedingungen kann hierdurch ebenfalls häufig nicht gewährleistet werden [267]. Daher wird für solche Systeme eine Modellierung benötigt, die auch Änderungen an der Struktur des Systems erlaubt. Um dieser Anforderung Rechnung zu tragen, schlagen HELLER UND STRUSS eine Prozess-orientierte Modellierung vor [129], [131], [270], [272]. Andere Ansätze finden sich z. B. in [56], sollen hier jedoch nicht vertieft werden.

Nach HELLER UND STRUSS besteht ein Prozess-orientiertes Modell aus drei wesentlichen Teilen: Domain Theory, Situation Description und Basic Axioms [131]. Dabei enthält die Domain Theory das Wissen über das betrachtete System, (vgl. Bild 19). Auf Basis der Bestandteile der Domain Theory können Prozesse als deterministische Gesetze formuliert werden, in denen die Struktur- und Mengenbedingungen (STRUCT-CONDS und QUANT-CONDS) die Struktur- und Mengeneffekte (STRUCT-EFFECTS und QUANT-EFFECTS) implizieren:

$$\text{STRUCT-CONDS} \wedge \text{QUANT-CONDS} \Rightarrow \text{STRUCT-EFFECTS} \wedge \text{QUANT-EFFECTS}$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch hier eine kontextfreie Modellierung der einzelnen Prozesse erfolgt, was häufig nur qualitative Aussagen, wie „wirkt sich positiv auf x aus“ ermöglicht. Dies kann dazu führen, dass bei aus verschiedenen Prozessen zusammengesetzten Systemen die Mengeneffekte recht schwierig zu spezifizieren sind, da mehrere Prozesse die gleichen Faktoren beeinflussen können. Dies erhöht die Schwierigkeit, auf Basis gemachter Beobachtungen aussagekräftige Diagnosen zu berechnen.

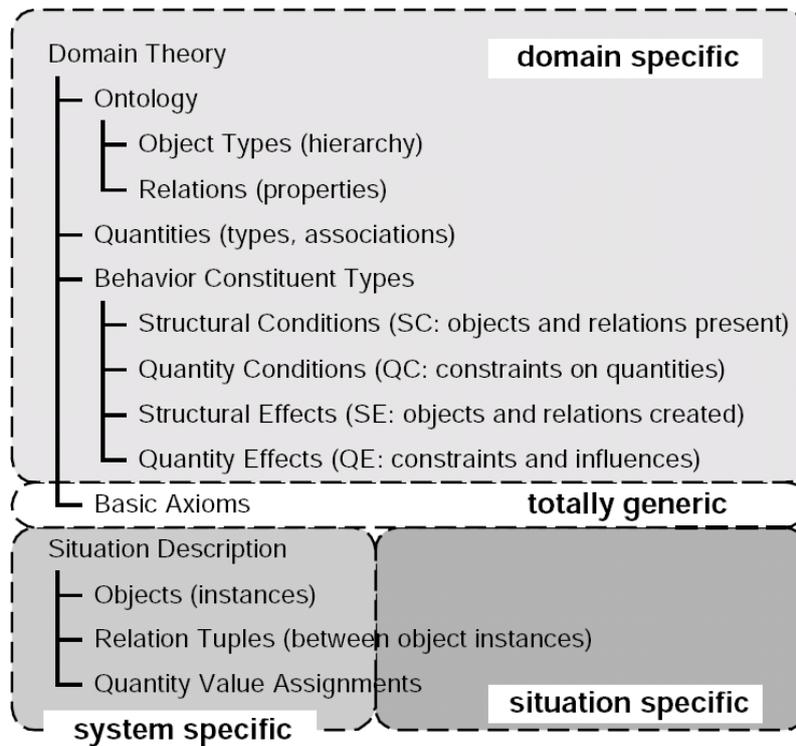


Bild 19: Übersicht über die Struktur eines Prozess-orientierten Modells nach [131]

Da es sich um ein konsistenzbasiertes Verfahren handelt, wird bei einer gegebenen Systembeschreibung SD , die inkonsistent mit den Beobachtungen OBS ist, eine abgeleitete Systembeschreibung SD' gesucht, die konsistent ist [272]:

$$SD \cup OBS \vdash \perp \Rightarrow SD' \cup OBS \not\vdash \perp$$

Im Gegensatz zur Komponenten-orientierten Diagnose ist dies jedoch noch nicht ausreichend, um die Fehlerursache festzustellen. Es ist lediglich eine Hypothese über den Systemzustand, der eine mögliche Therapie durch das Suchen nach Konsistenz mit dem festgelegten Zielverhalten $GOALS$ des Systems ermöglicht:

$$SD' \cup GOALS \vdash \perp \Rightarrow SD'' \cup GOALS \not\vdash \perp$$

Es ist die Aufgabe des Diagnosealgorithmus', diese Suche möglichst so durchzuführen, dass das Ergebnis mit möglichst wenigen Änderungen erreicht wird. Heller und Struss schlagen hierfür die Diagnosemaschine Generalized Diagnosis Engine (G^+DE) vor, die allerdings in der zitierten Version lediglich Momentaufnahmen diagnostizieren kann, was erfordert, dass die Systemstörung und die daraus resultierenden Effekte gleichzeitig auftreten [131]. Dies ist bei der zugrundeliegenden Problemstellung nicht der Fall und erforderte bei einer Verwen-

derung der G⁺DE die gleichen Modifikationen wie bei der Komponenten-orientierten Diagnomaschine DDE.

2.3.4.3 Anwendungen der modellbasierten Diagnose

Die modellbasierte Diagnose ist zwar seit einigen Jahren in der akademischen Literatur als ernsthafte Alternative zu regelbasierten Systemen o. ä. akzeptiert, jedoch sind letztere bisher in der Industrie aus verschiedenen Gründen vorherrschend [63]. Daher sind viele der im Folgenden zitierten Anwendungen prototypischer Natur und nur vereinzelt als kommerzielle Systeme im Einsatz.

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Methoden spielen medizinische Anwendungen bei der modellbasierten Diagnose nur eine untergeordnete Rolle. In [193] werden erste Ansätze und grundsätzliche Möglichkeiten dargestellt, die eine zukünftige Verbreitung auf diesem Gebiet erwarten lassen.

Tabelle 5: Systeme mit modellbasierten Methoden

Anwendungsgebiet	Komponenten-orientierte Modelle	Prozess-orientierte Modelle
Diagnose beim Hardware-Design	[105]	
Diagnose von (Telekommunikations-) Netzwerken	[66], [215],[252]	
Fehleridentifikation in Software Systemen	[140]	
Fehlersuche bei der Stromerzeugung und Verteilung	[19], [24], [57], [281]	
Diagnose und Selbstrekonfigurierung für Raumsonden der NASA	[315]	
Diagnose von Helikopter-Getrieben	[308]	
Überwachung von technischen Einrichtungen in Industrieanlagen (kommerzielles Überwachungssystem für Gasturbinen „TIGER“)	[287]	
Erzeugung von Fehlerbäumen für die Gabelstaplerdiagnose	[60], [61]	
Diagnose von Färbe-Anlagen	[115]	
Anwendungen für verschiedene Fahrzeugs subsysteme (z. B. Motorsteuerung, Anti-Blockier-System) in Form von On-Board- oder Offline-Diagnosesystemen	[26], [47], [246], [273], [275], [274]	
Diagnose von Wasseraufbereitungsanlage		[90], [131], [271]

Derzeit sind die modellbasierten Diagnosemethoden fast ausschließlich in technischen Disziplinen anzutreffen. Die ersten technischen Anwendungen waren im Bereich elektronischer Bauteile und Schaltungen zu finden (Anwendungen siehe z. B. [57]). Hierunter fanden sich

sehr erfolgreiche Prototypen, wie das System JADE, das half, bereits im ersten Jahr seines Einsatzes mehrere Millionen französische Francs einzusparen [226]. Viele Systeme, wie z. B. SymCure, stellen generische Werkzeuge dar, die in zahlreichen industriellen Anwendungen erprobt wurden [156]. Typische Anwendungen für die modellbasierte Diagnose sind in Tabelle 5 dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Verwendung von Prozess-orientierten Modellen als relativ neue Methode bisher nur in wenige Anwendungen erprobt wurde. Die Arbeit von HELLER, der Fälle aus Medizin, Ökologie und elektrischen Schaltkreisen behandelt [130], beweist jedoch die praktische Anwendbarkeit.

2.3.5 Hybride Systeme

Die oben dargestellten Methoden kommen in zahlreichen Diagnoseanwendungen nicht nur isoliert, sondern auch in Kombination zum Einsatz. Dabei wird versucht, die unterschiedlichen Vorteile der einzelnen Ansätze miteinander zu kombinieren. So wird beispielsweise in mehreren Arbeiten versucht, die Schwächen der KNNs, die hauptsächlich in ihrer mangelnden Bewertbarkeit und dem fehlenden Modell hinter der Entscheidungsfindung liegen, auszugleichen oder ihre Stärken bei der einfachen Wissensgewinnung zu nutzen (z. B.: [9], [101] und [327]). Andere Ansätze versuchen die Anzahl der Diagnosen bei der modellbasierten Systemen mit Hilfe fallbasierter oder erfahrungswissensbasierter Systeme einzugrenzen oder die modellbasierte Diagnose zu nutzen, wenn die Wissensbasis oder Fallbasis bei diesen Systemen nicht für eine Diagnose ausreicht (z. B.: [69], [192], [282] oder [317]). Da die Variation bei diesen hybriden Systemen sehr groß ist, wird an dieser Stelle nicht näher auf die einzelnen Systeme eingegangen. Einen guten Überblick über weitere hybride Systeme gibt [98].

2.4 Methodenauswahl

In diesem Teil der Arbeit werden die im weiteren Verlauf verwendeten Methoden ausgewählt. Die Auswahl basiert dabei auf der grundsätzlichen Eignung der Methoden und ihrer bisherigen Anwendung in Diagnoseaufgaben.

Wie unter 2.1.2.4 bereits dargestellt, wurde die Diagnose von Lebensmittelverpackungsanlagen in der Vergangenheit vorwiegend durch Beobachtung der Anlage durch Experten bzw. mit der Anlage vertrauten Personen durchgeführt. Die Verursachung eines Stillstands am Zentralaggregat konnte dabei durch Verfolgen der Stillstandsfortpflanzung über die Zeit durchgeführt werden, die sich durch die Experten in Form einfacher Regeln verbalisieren lässt. Diese Tatsache deutet auf die gute Eignung eines regelbasierten Systems für die vorliegende Aufgabenstellung hin. Auch die in Kapitel 2.3.2.5 dargestellten Beispiele lassen erfahrungswissensbasierte Methoden für die vorliegende Anwendung als sehr gut geeignet erscheinen. Zahlreiche verschiedene Problemstellungen, in denen die Zusammenhänge beschreibbar sind, lassen sich mit diesen Methoden lösen, wobei auch das Formulieren zeitlicher Zusammenhänge möglich ist. Häufig werden bei unsicheren Zusammenhängen Fuzzy-Mengen eingesetzt, um auch hier mit Regeln oder Entscheidungsbäumen arbeiten zu können. Da in der vorliegenden Arbeit auf eine umfassende Datenbasis mit eindeutigen Informationen zurückgegriffen werden kann (siehe 3.1) und sich die Zusammenhänge physikalisch eindeutig darstellen lassen, ist jedoch anzunehmen, dass unscharfe Methoden nicht benötigt werden. Die Diagnose mithilfe erfahrungswissensbasierter Methoden wird unter 4.2.1 verwendet und näher untersucht.

Bei den fallbasierten Systemen handelt es sich hingegen um Methoden, die in Problemstellungen verwendet werden, in denen entweder keine klaren Zusammenhänge ersichtlich sind oder die sich aufgrund erfassbarer Merkmale in verschiedene Problemklassen bzw. Fallklassen unterscheiden lassen. KNN werden dabei hauptsächlich in technischen und technologischen Bereichen eingesetzt, in denen die Beschreibung der Abhängigkeiten sehr komplex oder nicht möglich ist [6]. Die meisten der unter 2.3.3.4 zitierten technischen Diagnose-Anwendungen Bayes'scher Netze zeigen, dass diese hauptsächlich da eingesetzt werden, wo zwar prinzipielle Abhängigkeiten bekannt, die Rückschlüsse aus Beobachtungen jedoch mit Unsicherheiten behaftet sind. CBR-Methoden werden im Allgemeinen dort angewendet, wo eine Vielzahl von Sensordaten vorliegt (als Beispiel sei hier nochmals die Diagnose einer Gasturbine mit ca. 2000 Sensoren genannt). Die zitierten Beispiele und auch die Probleme, die bei dem fallbasierten System von VOIGT ET AL. [304] auftraten (vgl. 2.1.2), lassen die Anwendung fallbasierter Systeme für die vorliegende Problemstellung als ungeeignet erscheinen. Die Anzahl der Daten für die Erfassung der Stillstandsfortpflanzung in einer Anlage ist eher gering und auch wenn prinzipielle Zusammenhänge bekannt sind, was die Verwendung von probabilistischen Netzen begünstigt, fehlen für viele Zusammenhänge sinnvolle Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen, wodurch die Diagnose mithilfe Bayes'scher Netze sehr komplex würde (vgl. [167]). Auch das Ermitteln der anlagenspezifischen Wahrscheinlichkeiten führte, ähnlich wie die Lösung von VOIGT ET AL., nur zu sehr anlagenspezifischen Lösungen.

Die modellbasierten Methoden wurden, wie auch aus den Beispielen in Kapitel 2.3.4.3 ersichtlich, bisher hauptsächlich für technische Problemstellungen eingesetzt. Dies liegt vornehmlich darin begründet, dass die Modellierung von Prozessen eine klassische Disziplin der Ingenieurwissenschaften darstellt. Gerade der Komponenten-orientierte Ansatz, bei dem komplexe Systeme aus einfachen Einzelkomponenten-Modellen zusammengesetzt werden, entspricht dabei der typischen Vorgehensweise eines Entwicklungsingenieurs. Aufgrund der Tatsache, dass validierte Algorithmen existieren, lässt die modellbasierte Vorgehensweise ein einfaches Erstellen, Warten und Wiederverwenden der Systeme erwarten [63]. Bei der Komponenten-orientierten Methode ist dabei prinzipiell lediglich das Erstellen von Modellen der einzelnen Bausteine einer Lebensmittelverpackungsanlage notwendig, da einsetzbare Inferenz-Systeme bereits existieren. Allerdings wird bei den bisherigen Diagnosemaschinen standardmäßig nicht berücksichtigt, dass Ursache und Wirkung zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten, wie dies bei der Stillstandsfortpflanzung der Fall ist. Erste Ansätze zum Trennen der zeitlichen Betrachtung von der eigentlichen Diagnoseberechnung (vgl. z. B. [221]) lassen jedoch erwarten, dass dieses Problem für die vorliegende Problemstellung gelöst werden kann. Ein weiterer Vorteil des modellbasierten Ansatzes ist, dass das Modell, welches von den Anlagenkomponenten erstellt werden muss, in Zukunft zusätzlich für andere Problemstellungen als die Diagnose, wie z. B. die Anlagenplanung o. ä., verwendet werden kann. Die Prozess-orientierte Modellierung scheint dagegen eher für die Diagnose der an die Lebensmittelverpackungsanlagen angrenzenden Prozesseinrichtungen geeignet zu sein und wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Die Anwendung der modellbasierten Methode auf der Basis von Komponenten-orientierten Modellen für die Fehlerlokalisierung wird unter 4.2.2 untersucht.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Modellierung und Algorithmisierung der unterschiedlichen erfahrungswissenbasierten und der modellbasierten Methode sowie der Vergleich mit der Referenzmethode nach VOIGT ET AL. ist in Kapitel 5.3 dargestellt.

3. Entwickelte Methoden zum Schaffen einer Datenbasis

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Methoden für die Erfassung der für den weiteren Verlauf benötigten Versuchsdaten vorgestellt. Die Vorgehensweise richtete sich dabei nach den in Kapitel 1 definierten Zielen und der in Kapitel 2.4 durchgeführten Methodenauswahl.

3.1 Methodik und Standardisierung der Datenerfassung

Ein wesentlicher Schritt beim Aufbau eines Diagnosesystems ist das Schaffen einer Datenbasis. Hierzu werden Methoden benötigt, mit denen Daten der betrachteten Systeme aufgenommen, konzentriert und ggf. aufbereitet werden können. In Kapitel 2.1.2 wurde auf den bisherigen Stand der Datenerfassung in Lebensmittelverpackungsanlagen bereits eingegangen.

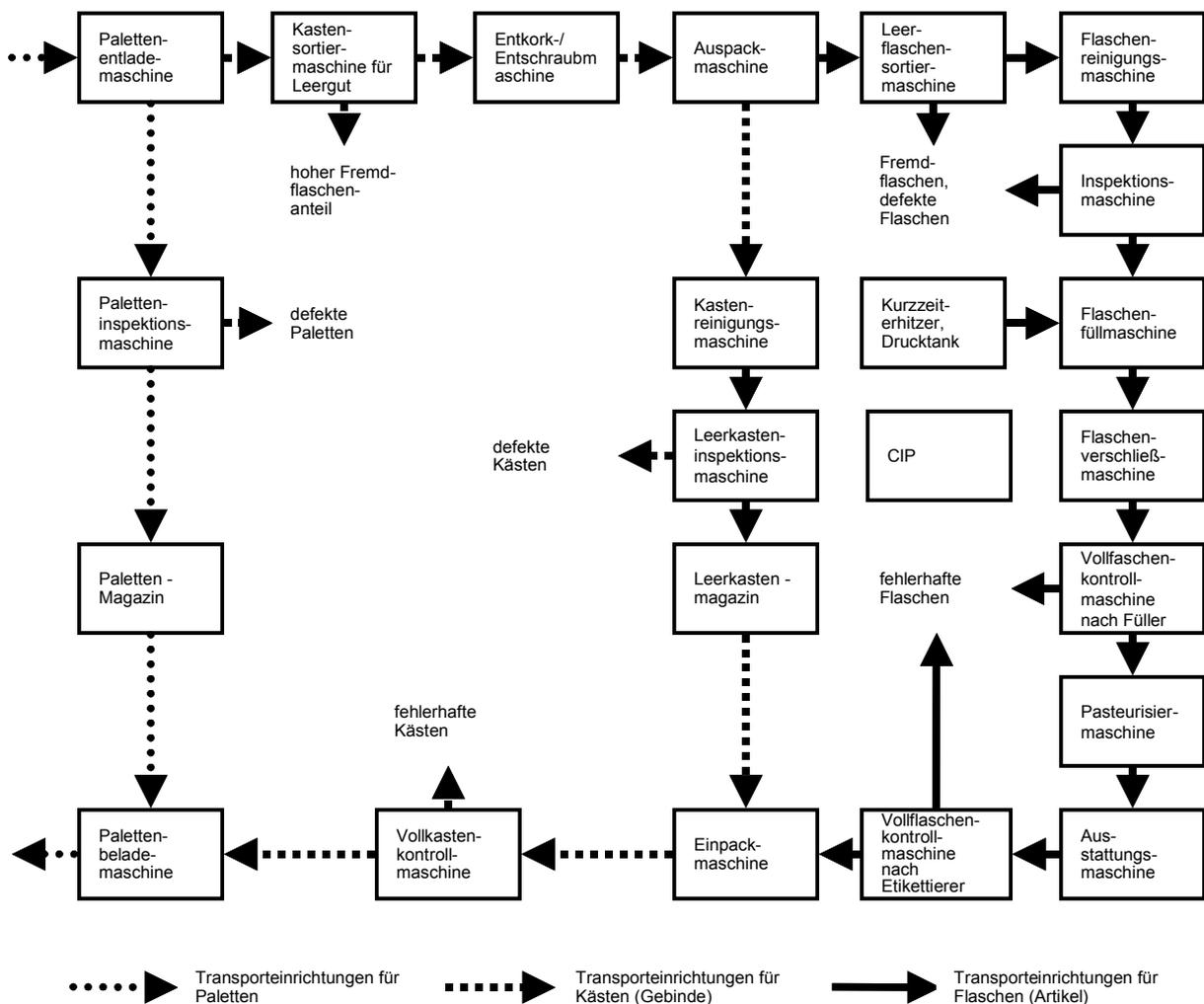


Bild 20: Modell der Beispielanlage, die als Grundlage der Weihenstephaner Standards 2005 dient [163]

Im Folgenden werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemeinsam mit Vertretern aus Anlagen- und Maschinenbau, Systemhäusern und Anwenderbetrieben erarbeiteten Standardisierungen für die Datenerfassung und –bereitstellung mithilfe automatischer Betriebsdatener-

fassungssysteme vorgestellt. Es wird hierbei lediglich auf die für die Arbeit wesentlichen Punkte detaillierter eingegangen. Für weitere Informationen sei auf [157], [158], [160], [161], [162] und [163] verwiesen. Zusätzlich wird die Verdichtung der für die Diagnosemethoden benötigten Daten vorgestellt.

3.1.1 Weihenstephaner Standards für die Betriebsdatenerfassung bei Getränkeabfüllanlagen (WS)

Aus den unter 2.1.2 bereits erwähnten Gründen wurden in einem ersten Schritt lediglich Getränkeabfüllanlagen bei den Standardisierungsbemühungen berücksichtigt. Hierbei wurde eine Glas-Mehrwegabfüllanlage als Beispielanlage zugrunde gelegt (vgl. Bild 20).

Ein Großteil der Ergebnisse der WS kann jedoch direkt für alle Lebensmittelverpackungsanlagen übernommen werden. Andere Teile müssen angepasst oder erweitert werden, um die speziellen Unterschiede zu berücksichtigen. Mit diesen Punkten beschäftigt sich Kapitel 3.1.2.

3.1.1.1 Standardisierung der physikalischen Anbindung

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 der vorliegenden Arbeit dargelegt, müssen für die Kommunikation zwischen verschiedenen Teilnehmern in einem Netzwerk die einzelnen Kommunikationsschichten mit den entsprechenden Protokollen definiert werden. Um den Engineeringaufwand möglichst gering zu halten, ist es wünschenswert, dass alle Teilnehmer in einem Netzwerk aus Anlagenkomponenten und übergeordneten IT-Systemen dieselben Protokolle verwenden. Nur so ist gewährleistet, dass eine Interaktion zwischen allen Teilnehmern möglich ist.

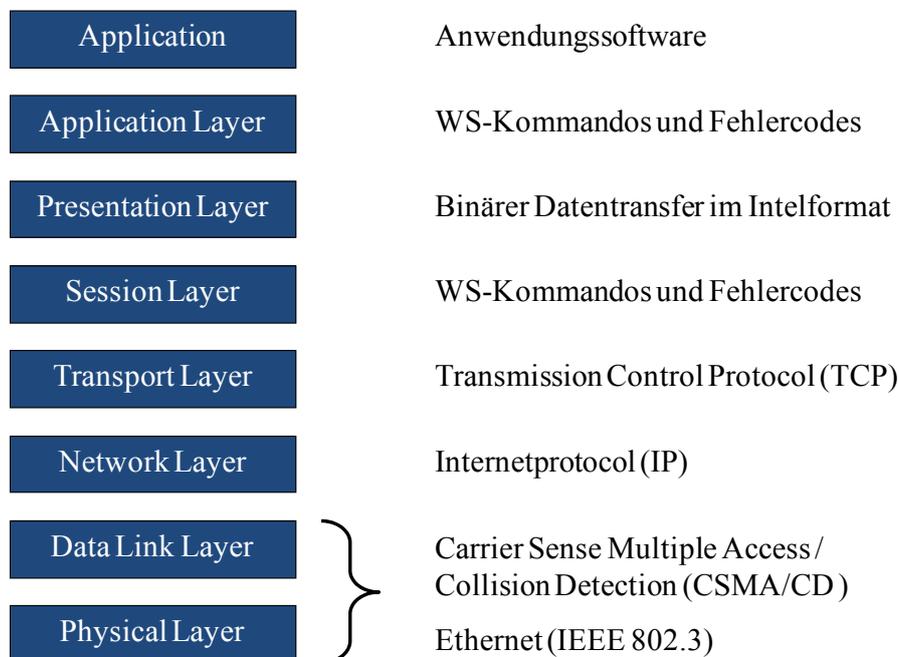


Bild 21: Physikalische Schnittstelle nach den WS [163]

Im Teil 1 der WS wird deshalb die physikalische Schnittstelle für alle Komponenten einer Getränkeabfüllanlage sowie der damit verbundenen BDES festgelegt. Bild 21 verdeutlicht die Definition der einzelnen Protokolle gemäß dem ISO-OSI-Referenzmodell.

Während auf den unteren Schichten die aus der Bürowelt bekannten und etablierten Protokolle Ethernet mit TCP/IP verwendet werden, sind die oberen Schichten proprietär definiert. Die neu geschaffenen Befehlssätze ermöglichen dabei sowohl die Abfrage einzelner Werte als auch das Abfragen mehrere Werte gleichzeitig sowie die Übertragung vorgefertigter Listen. Neben numerischen Werten ist auch die Übertragung von Zeichenketten (Strings) möglich. Zusätzlich sind ein Befehl für die Überprüfung eines erfolgreichen Kommunikationsaufbaus und ein Befehl zur Übertragung der Gerätebeschreibungsdatei, auf die im Folgenden noch näher eingegangen werden soll, vorhanden. Neben den Befehlen sind auch spezielle Fehlercodes definiert, die sicherstellen sollen, dass keine unbemerkten Kommunikations- oder Übertragungsfehler auftreten. Zu jeder Befehl/Fehlercode-Kombination ist ferner eine Fehlerbehandlung definiert. Ein Beispiel für die Definition eines Befehls mit zugehöriger Fehlerbehandlung ist in Anhang B aufgeführt.

3.1.1.2 Standardisierung der Datenpunkte und -inhalte

In Anlehnung an den in [303] ermittelten Datenbedarf wird im zweiten Teil der WS definiert, welche Datenpunkte von den einzelnen Maschinen einer Getränkeabfüllanlage zur Verfügung gestellt werden müssen und welche sie darüber hinaus in welcher Form anbieten können. Dabei ist es insbesondere wichtig, die Eindeutigkeit der einzelnen Datenpunkte zu gewährleisten. Hierzu sind nicht nur eine standardisierte Bezeichnung der Daten, sondern auch das Festlegen ihres Formats und eine genaue Definition der Bedeutung von besonderem Interesse.

Aus diesem Grund müssen für jeden Datenpunkt folgende Parameter festgelegt werden:

- Ein Name, der den Inhalt des Datenpunkts beschreibt
- Eine Identifikationsnummer, die sogenannte Tag-Nummer (siehe unten)
- Ein eindeutiger Identifikationsname, der sogenannte Tag-Name (siehe unten)
- Das Format des Datenpunkts, mögliche Formate:
 - Unsigned32 (vorzeichenlose 32 Bit Ganzzahl (Integerzahl))
 - Signed32 (vorzeichenbehaftete 32 Bit Ganzzahl (Integerzahl))
 - Real (32 Bit Fließkommazahl nach [142])
 - Hex32 (32 Bit Hexadezimalzahl, auch zur Wert-Codierung über einzelne Bits)
 - String16 (16 Bit String zur Übertragung von Zeichen)
- Das Zugriffsrecht für den Datenpunkt
 - R für ausschließlichen Lesezugriff
 - W für ausschließlichen Schreibzugriff
 - RW für Lese- und Schreibzugriff
- Eine Definition der Bedeutung des Datenpunkts, ggf. mit einer Definition einzelner Werte bei Bit- oder Integer-codierten Zuständen oder Meldungen

Eine besondere Bedeutung besitzen hierbei die Tag-Nummer und der Tag-Name. Während die Befehle die einzelnen Werte von den Maschinen und Kontrollgeräten derzeit über die

Tag-Nummer abfragen (vgl. Anhang B), sorgen die Tag-Namen für eindeutige Bezeichnungen der Datenpunkte. Dies ist von großer Wichtigkeit, da es neben den sogenannten Standard-Datenpunkten, die bereits in den Standard-Dokumenten festgeschrieben sind (verpflichtende und optionale), auch solche gibt, die jeder Maschinenlieferant eigenständig definieren kann.

Für die Tag-Nummern ist daher ein 16-Bit Zahlenraum definiert, der festgelegte Bereiche für die unterschiedlichen Datenpunkte besitzt. Neben einer Bereichsabgrenzung aufgrund der Bedeutung der Daten existieren hier reservierte Bereiche für die Standard-Datenpunkte und freie Bereiche, die von den Herstellern genutzt werden können (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Zahlenraum für die Vergabe von Tag-Nummern für die unterschiedlichen Datenkategorien

Inhalt des Datenbereichs	Tag-Nummern	freier Bereich
Daten zur Maschinenkommunikation	00000-00059	00030-00059
Daten zur Chargen- und Artikelverfolgung	00060-00099	00081-00099
Daten zur Betriebsart/zum Maschinenzustand	00100-00199	00150-00199
Daten zum Programm	00200-00299	00250-00299
Daten zum Betriebszustand	00300-00399	00350-00399
Daten zur Übereinstimmung mit OMAC Richtlinien	00400-00999	-
Platz für Erweiterungen	01000-04999	-
Freier Bereich	05000-09999	05000-09999
Störmeldungen	10000-19999	10001-19999
Hinweismeldungen	20000-29999	20001-29999
Parameter	30000-39999	31000-39999
Messwerte	40000-49999	41000-49999
Zählwerte	50000-59999	51000-59999 ⁵
Listen	60000-64999	60000-64999
Platz für Erweiterungen	65000-65535	-

Für die Vergabe des Tag-Namens sind für die Gewährleistung der Eindeutigkeit des Bezeichners diverse Regeln vorgesehen (siehe [163]). Die wichtigste Vorschrift ist dabei die Festlegung eines Präfix, das firmenspezifisch ist und dessen Vergabe zentral geregelt wird, um Duplikate zu vermeiden. Damit ist sichergestellt, dass selbst wenn zwei Hersteller unabhängig voneinander einen Datenpunkt mit der gleichen Bezeichnung, jedoch unterschiedlicher Be-

⁵ Für bestimmte Datenpunkte stehen auch unter 51000 Tag-Nummern zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um mögliche Erweiterungen empfohlener Datenpunkte.

deutung (z. B. unterschiedliche Einheiten eines Messwerts, o. ä.) definieren, keine Verwechslungen auftreten. Die Standard-Datenpunkte werden durch das Präfix „WS_“ kenntlich gemacht. Sollen Datenpunkte angeboten werden, für die es eine Entsprechung in den WS gibt, so sind die definierten Vorgaben zu verwenden. Beispiele für einen Standard-Datenpunkt und einen durch eine fiktive Firma definierten Datenpunkt finden sich in Anhang C.

Die Standard-Datenpunkte dienen als Basis für die Berechnung der in Anhang A vorgestellten Kennzahlen und stellen die Grundlage für die Diagnosemethoden aus 4.2 dar. Für Erläuterungen zur automatischen Berechnung der Kennzahlen und der Verdichtung der Daten in verschiedenen Berichten soll auf [163] verwiesen werden, da diese Aspekte im Rahmen der vorliegenden Arbeit von untergeordneter Bedeutung sind.

3.1.1.3 Die Gerätebeschreibungsdatei für „Plug-and-Acquire“

Nicht jedes Aggregat, das konform zu den WS ist, unterstützt auch alle Befehle und bietet sämtliche Standard-Datenpunkte an. Lediglich das verpflichtende Mindestangebot (Befehle zum Lesen und Schreiben eines Wertes sowie zur Kommunikationskontrolle und verpflichtende Standard-Datenpunkte für jede Maschinenklasse) muss von den Kommunikationspartnern zur Verfügung gestellt werden. Daraus ergibt sich eine hohe Unsicherheit über die Fähigkeiten der Teilnehmer im Anlagen-Netzwerk. Um das Engineering bei der Anbindung der Maschinen trotzdem gering zu halten, definieren die WS eine Gerätebeschreibungsdatei.

Diese Datei, die unter einem festgelegten Pfad entweder direkt im Dateisystem auf dem Aggregat oder auf einem mitgelieferten, externen Datenträger verfügbar sein muss, gibt sowohl über die Kommunikationsfähigkeit (verfügbare Befehle, Portnummern, Anzahl möglicher Anfragen pro Sekunde usw.) als auch über das vollständige Datenangebot Auskunft.

Die Gerätebeschreibungsdatei ist in der Auszeichnungssprache Extensible Markup Language (XML) verfasst und ist in ihrem Aufbau durch ein XML-Schema exakt definiert (vgl. Anhang D). Hierdurch ist eine vollständig automatisierte Auswertung der Datei möglich. Bei der Anbindung einer Maschine an ein Datenerfassungssystem kann das System die Gerätebeschreibungsdatei einlesen und selbständig eine Abfrage der vorhandenen Datenpunkte mit den verfügbaren Befehlen initialisieren. Es wird somit das Prinzip „Plug-and-Acquire“ realisiert, das dem aus der PC-Welt bekannten Prinzip „Plug-and-Play“ nachempfunden ist [102].

Aus der XML-Gerätebeschreibungsdatei kann direkt abgelesen werden, welche Informationen für die Diagnosemethoden aus Kapitel 4.2 zur Verfügung stehen. Eine Beispieldatei für eine Etikettier-, Dekorier- und Codiermaschine vom Typ Naßklebe-Etikettiermaschine ist in Anhang E gegeben.

3.1.1.4 Vertrauenswürdigkeit der Daten

Wie in Kapitel 2.1.2 bereits angedeutet, ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg von IT-Werkzeugen die Richtigkeit der abgespeicherten Daten. Um dies zu gewährleisten, wurde in den WS der Teil 4: „Überprüfung und sicherer Betrieb“ eingeführt. Dieser Teil der Standards schreibt Vorgehensweisen für eine Datenvalidierung nach der Inbetriebnahme bzw. BDE-Anbindung einer Anlage vor. Zu diesem Zweck sind verschiedene Standardarbeitsanweisungen

gen und ein Validierungsmasterplan-Rahmendokument vorgegeben, die sich an den Regeln der *Guten Herstellungspraxis*, insbesondere für automatisierte und Computer-Systeme, orientieren (vgl. [103], [114], [170], [209], [292]). Neben den Vorgaben zur System-Validierung werden auch Standardarbeitsanweisungen für einen sicheren Betrieb des Systems vorgegeben. Diese Anweisungen sollen in erster Linie eine lückenlose Dokumentation eventueller Systemmanipulationen oder anderer Vorkommnisse sichern, um ein möglichst schnelles Beheben existierender Probleme und eine Bewertung der Vertrauenswürdigkeit der Daten zu ermöglichen. Für nähere Informationen siehe [163].

3.1.2 Erweiterung der Standardisierung auf Verarbeitungs- und Verpackungsmaschinen der Lebensmittelindustrie

Die in 3.1.1 vorgestellte Standardisierung bezieht sich bisher lediglich auf die Beispielanlage aus Bild 20 und dient im Bereich der inhaltlichen Schnittstellenspezifikation (Definition der Datenpunkte) nur als Vorlage für weitere Maschinen, für die bisher keine Aufstellung von verpflichtenden und optionalen Datenpunkten verfügbar ist (z. B. aus dem Bereich der allgemeinen Lebensmittelverpackungstechnik). Die Zuordnung der Datenpunkte lässt sich jedoch häufig auf einer höheren Abstraktionsstufe als der der konkreten Maschine realisieren. Aufgrund dieser Tatsache wurde ein objektorientierter Ansatz zum Aufbau einer Ontologie für die Beschreibung des Datenangebots einzelner Maschinenklassen entwickelt.

Grundlage für den Aufbau der Ontologie ist die ISO 13584 (auch „PLib“), die ein Metamodell für Produktbibliotheken darstellt. Diese Norm entstand mit dem Ziel, elektronische Kataloge industrieller Komponenten in eine neutrale Datenbank zu integrieren und den Austausch der Informationen zu ermöglichen [220]. Sie soll im Folgenden kurz erläutert werden, bevor auf die Umsetzung für eine Ontologie der WS eingegangen wird. Die ISO 13584 besteht aus mehreren Serien mit zahlreichen Dokumenten. Wichtige Dokumente sind [143], [144], [145], [146], [147], [148], [149] und [150], wobei im Folgenden insbesondere auf [151] eingegangen wird. Einen guten Überblick über die anderen Teile der Norm gibt [329].

Die ISO 13584 bietet ein umfangreiches Konzept zur Bildung von Objektfamilien, das auf der Objektorientierung fußt. Es wird dabei zwischen *parts*, den Objekten, die eine Abstraktion eines Gegenstands darstellen, und den *part families*, die eine zu einer Gruppe zusammengefasste Menge ähnlicher Objekten beschreibt, unterschieden. Bei den Objektfamilien lassen sich ferner *simple families* und *generic families* unterscheiden. Hierbei stellen die *simple families* Gruppen konkreter Teile dar, auf deren Objekte über den Familiennamen und die entsprechenden, das Objekt charakterisierenden Attribute zugegriffen werden kann. *Generic families* sind die Zusammenfassung mehrerer *simple families* auf einem höheren Abstraktionsniveau. So kann eine Hierarchie von Objektfamilien aufgebaut werden. Hierbei kommen die für die Objektorientierung typischen Konzepte, wie Spezialisierung und Vererbung, zum Einsatz.

Zusätzlich ermöglicht die ISO 13584 sogenannte Repräsentationskonzepte, die verschiedene Perspektiven auf dasselbe Objekt ermöglichen. Die Repräsentationsklassen werden dabei ähnlich wie die Familien beschrieben, wobei auch auf externe Files referenziert werden kann.

Diese Trennung zwischen der Identifikation und der Repräsentation ermöglicht die gezielte Zuordnung von Zusatzinformationen zur eigentlichen Objektbeschreibung, die auch später erfolgen kann, ohne die Identifikation des Objekts zu beeinflussen.

Um diese Unterscheidung zu realisieren, wird in der ISO 13584 zwischen zwei Metadatenmodellen unterschieden:

- Das General Model enthält alle Informationen zur eindeutigen Identifikation der Objekte. Die oben dargestellten Objektfamilien werden durch die Klassen des General Models abgebildet. Einzelne Objekte können dann eindeutig durch die Identifikatoren der Klasse und die Ausprägung der entsprechenden Attribute identifiziert werden. Die ISO 13584-42 legt die Regeln für die Erstellung eines General Models fest [151].
- Das Functional Model legt in seinen Klassen die Beschreibung und Strukturierung der einzelnen Auswahl- und Repräsentationsmodelle fest. Über die Relation *is-view-of* (siehe unten) können die Repräsentationsmodelle mit einer generischen Familie verknüpft werden (vgl. Bild 22).

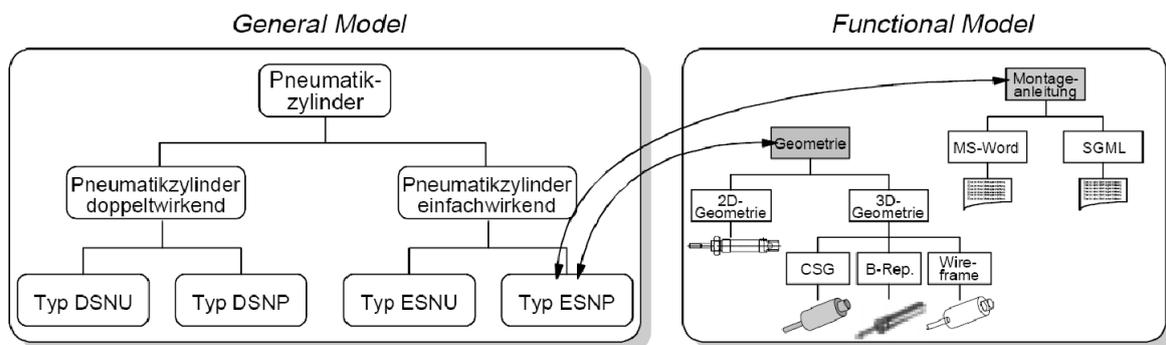


Bild 22: Verknüpfung eines bestimmten einfachwirkenden Pneumatikzylinder Typs „ESNP“ mit seinen Functional Models mithilfe der „is-view-of“-Relation. Ein Functional Model stellt dabei die Montageanleitung für diesen Typ Pneumatikzylinder dar, ein anderes Modell enthält die geometrischen Informationen des Pneumatikzylinders [329].

Um eine Teilebibliothek zu beschreiben, wird auf eine bestimmte Menge von Konstrukten zurückgegriffen. Die einzelnen Konstrukte sind im Folgenden aufgeführt und ihr Zusammenhang in Bild 23 dargestellt:

- is-a: Klassifizierungsrelation
- is-described-by: Merkmalszuordnungsrelation
- is-part-of: Kompositionsrelation
- is-view-of: Repräsentationsrelation
- is-case-of: Zuordnungsrelation
- is-content: Inhaltsrelation

In der vorliegenden Arbeit wurde zum Erstellen einer Produktbibliothek für Verpackungsmaschinen der Editor „PLibEditor“ verwendet. Dieses Tool erlaubt es, in einfacher Weise ISO-normgerechte Ontologien zu erstellen. Eine Einschränkung bei der derzeitigen Version ist allerdings, dass keine Functional Models unterstützt werden [94]. Auf die mögliche Verwen-

dung dieser speziellen Repräsentationsobjekte wird jedoch im weiteren Verlauf dieses Kapitels gesondert eingegangen.

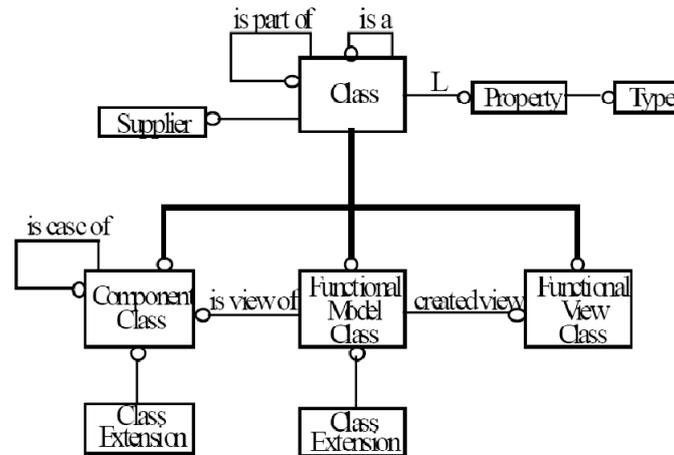


Bild 23: Konstrukte zur formalen Spezifikation einer Teilbibliothek nach ISO 13584 [219]

Um eine möglichst umfassende und allgemeingültige Ontologie zu schaffen, sollte bei der Erstellung auf vorhandene Standards Rücksicht genommen werden. In der Literatur finden sich jedoch nur wenige verschiedene Ansätze zur Klassifizierung von Abfüll- und Verpackungsmaschinen. Neben der DIN EN 415 zur Sicherheit von Verpackungsmaschinen, in der im Teil 1 die Terminologie und Klassifikation von Verpackungsmaschinen und zugehörigen Ausrüstungen festgelegt werden [72], existieren lediglich Klassifizierungen der unterschiedlichen Maschinen nach ihren Hauptvorgängen, wie z. B. in [126]. Daher dient im Folgenden die DIN EN 415-1 als Grundlage für die Hierarchiebildung.

In die neu geschaffene Hierarchie werden die Datenpunkte als Eigenschaften (properties) der entsprechenden Klassen eingefügt. Im PLibEditor können verschiedene Arten von „properties“ eingefügt werden:

1. characteristic property: hierbei handelt es sich um unabhängige Eigenschaften der einzelnen Klassenobjekte, z. B. die Anzahl der Füllventile einer Schwerkraft-Füllmaschine für flüssige Produkte. Diese kann von Objekt zu Objekt (Objekte sind hier im Sinne von Instanzen der Klasse zu verstehen) unterschiedlich sein, ist jedoch unabhängig von anderen Faktoren, wie z. B. dem abzufüllenden Produkt.
2. contextual property: hierbei handelt es sich um Eigenschaften, deren Wert sich abhängig von den *context parameter properties* verändert (Beispiel siehe unten).
3. context parameter property: hierbei handelt es sich um Eigenschaften, die eine Änderung der *contextual properties* bedingen (Beispiel siehe unten).

Um Betriebsdaten als Eigenschaften der einzelnen Klassenobjekte darzustellen, muss unterschieden werden, ob es sich um Datenpunkte mit unabhängigen, für die einzelnen Objekte charakteristischen Werten oder um solche mit variablem Inhalt handelt. Die unabhängigen können dann als *characteristic property* abgebildet werden. Bei den anderen Eigenschaften stellt sich eine Besonderheit der Datenpunkte gegenüber anderen Eigenschaften dar. Da die

Datenpunkte direkt mit bestimmten Eigenschaften verknüpft sind, sie also beispielsweise der Darstellung einer bestimmten Temperatur dienen, könnte angenommen werden, dass die Temperatur, die von einem Sensor detektiert wird, und der entsprechende Datenpunkt als gleichbedeutend anzusehen sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die erfasste Temperatur auch richtig dargestellt wird, was nicht unbedingt der Fall sein muss und in der Realität auch häufig nicht gegeben ist [300]. Eine richtige Abbildung wäre daher ein Trennen der physikalischen Eigenschaft und ihrer Repräsentation als Datenpunkt, da hier, z. B. bei der Wandlung des Strom- oder Spannungssignals in numerische Werte, auch Fehler auftreten können.

In PLib bedeutet dies für die Darstellung, dass die auslösende Eigenschaft als *context parameter property* und der dazu gehörende Datenpunkt als *contextual property* dargestellt werden. Es existiert somit z. B. ein *context parameter property* „Betriebszustand der Maschine“ und ein *contextual property* „Betriebszustand-Tag“, dessen Wert sich nach dem aktuellen Betriebszustand der Maschine richtet. Der Betriebszustand selbst könnte auch als *contextual property* abgebildet werden, da er von der Belegung bestimmter Sensoren in der Anlage abhängt. Da diese Sensoren jedoch in jeder Anlage unterschiedlich positioniert bzw. in unterschiedlicher Anzahl vorhanden sind - oder im Extremfall eben auch gar nicht vorhanden sein könnten - setzte dies die Maschine in einen gewissen Kontext, der aber bei der reinen Betrachtung der Instanz einer Klasse nicht vorausgesetzt werden darf. Die Abhängigkeit des Betriebszustands der Maschine ist damit zwar abhängig von anderen Faktoren, diese können aber bei einer kontextfreien Betrachtung nicht benannt werden. In der vorliegenden Arbeit sollen daher Eigenschaften, wie der Betriebszustand o. Ä., als *context parameter properties* betrachtet werden [159]. Um die Datenpunkte als *properties* angemessen darzustellen, muss außerdem ein Abgleich der Datenformate der WS mit den in PLib verwendeten erfolgen. Die Umsetzung der Weihenstephaner Datenformate in die im PLibEditor wählbaren Formate zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Umsetzung der Formate der WS auf die des PLibEditors [159]

Unsigned32 (vorzeichenloser Integer)	Integer NR1..4
Signed32 (vorzeichenbehafteter Integer)	Integer NR1 S..4
Real (Realzahl)	Real NR2 S..3.3
Hex32 (hexadezimal codierter Bitvektor)	Boolean N 32
String16 (String mit 16 Bit)	String X 17 (als Beispiellänge)

Als Beispiel für den Aufbau der Ontologie und die Zuordnung der Datenpunkte zu den einzelnen Klassen soll, wie im bisherigen Verlauf der Arbeit, eine Naßklebe-Etikettiermaschine dienen. Die Naßklebe-Etikettiermaschine ist nach der DIN 415-1 folgendermaßen in die Hierarchie der Verpackungsmaschinen eingeordnet (vgl. [72]):

- Verpackungsmaschinen
 - Etikettier-, Dekorier- und Codiermaschinen
 - Etikettiermaschinen
 - Naßklebe-Etikettiermaschine

Die Datenpunkte der WS (vgl. Anhang E) können dabei als Eigenschaften auf verschiedenen Abstraktionsebenen definiert werden. Während die allgemeinen Datenpunkte, wie z. B. der Betriebszustand, auf der obersten Hierarchieebene eingeordnet werden können, da sie für alle Verpackungsmaschinen gültig sind, müssen die Datenpunkte, die lediglich für spezielle Maschinen gelten, den einzelnen Spezialisierungsebenen zugeordnet werden.

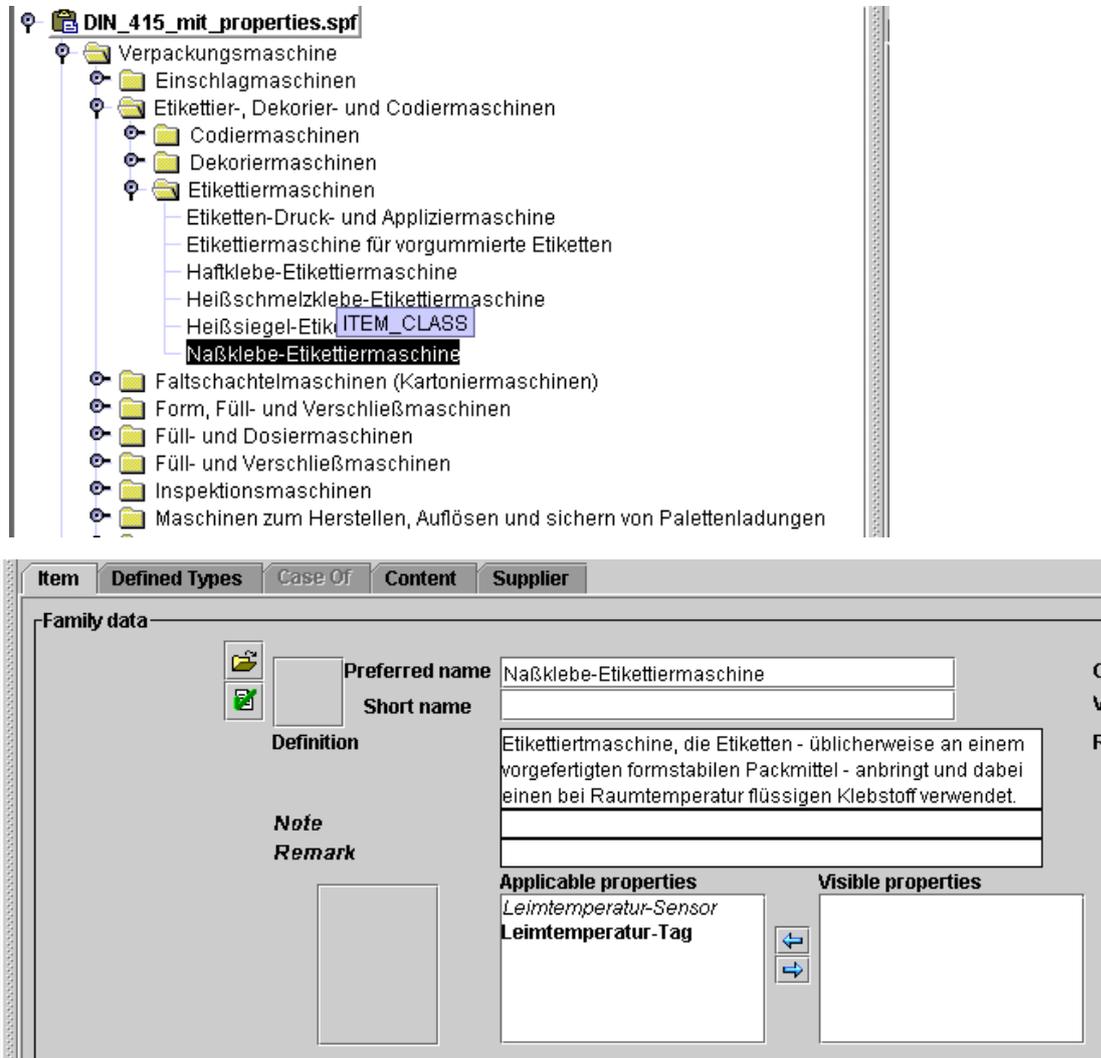


Bild 24: Abbildung der Beispiel-Datenpunkte auf der untersten Hierarchiestufe im PLibEditor [159]

Bild 24 zeigt die unterste Hierarchieebene, auf der die Datenpunkte hinzugefügt werden, die nur für die Klasse der Naßklebe-Etikettiermaschine gültig sind. Alle Datenpunkte der darüber liegenden Ebenen werden automatisch vererbt (verpflichtende Datenpunkte) bzw. können optional geerbt werden (optionale Datenpunkte). Anhang F bietet eine Darstellung sämtlicher Ebenen des Beispiels im PLibEditor.

Ein Hersteller einer Maschine, die die WS erfüllen soll, kann sich somit in die vorhandene Hierarchie einordnen oder über eine *case-of*-Verknüpfung seine eigene Produktbibliothek mit der Standardontologie verbinden. Er erbt damit automatisch alle benötigten Datenpunkte, die er zur Erfüllung der Vorgaben anbieten muss.

Datenpunkte, die unabhängig von der Klassifizierung nach der DIN 415-1 verschiedenen Maschinen zugeordnet werden sollen, wie dies z. B. bei Datenpunkten für die Rückverfolgbarkeit der Fall ist (vgl. [163]), können als eine zusätzliche Hierarchie parallel eingefügt werden (vgl. Bild 25).

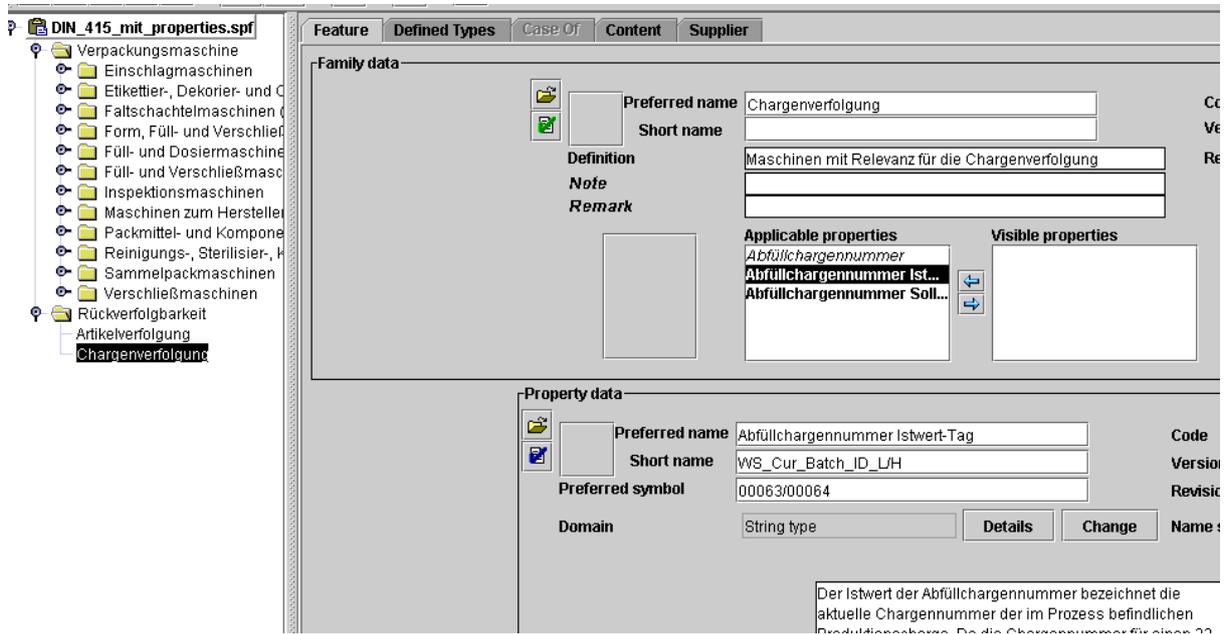


Bild 25: Parallele Hierarchie für Daten zur Rückverfolgbarkeit [159]

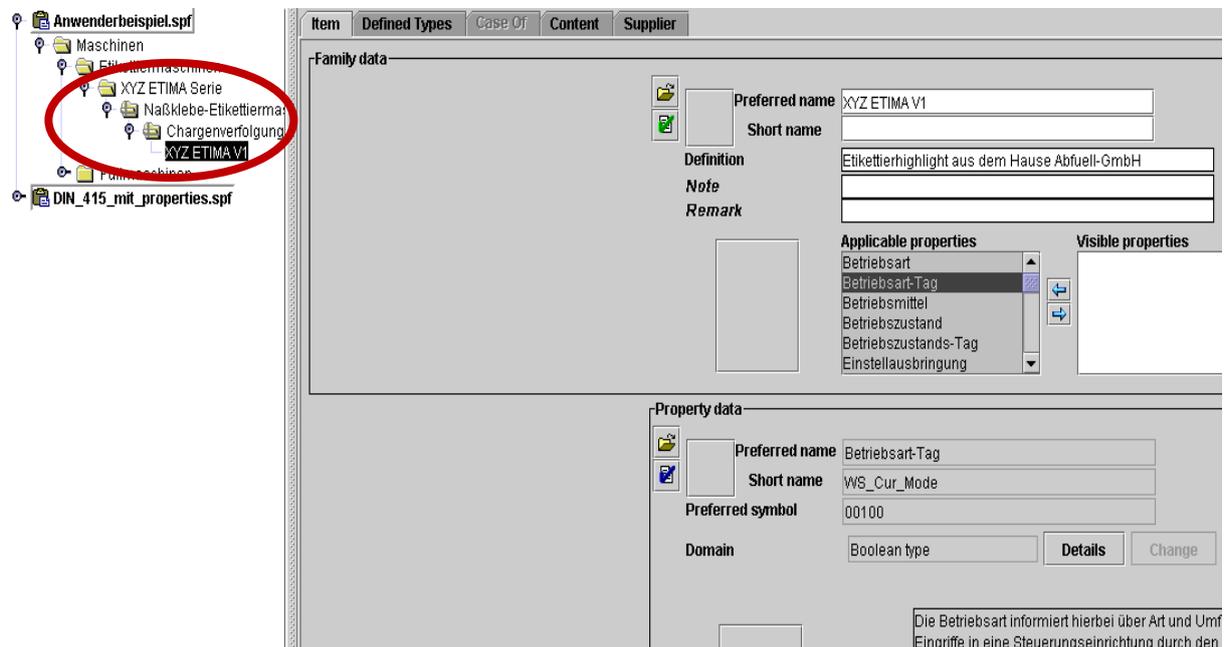


Bild 26: Beispiel für die Verknüpfung einer Maschine XYZ ETIMA V1 der XYZ ETIMA Serie aus einer Anwenderhierarchie mit den Standardklassen für Naßklebe-Etikettiermaschinen und Chargenverfolgung im PLibEditor [159]

Eine Naßklebe-Etikettiermaschine, die auch Datenpunkte für die Rückverfolgbarkeit anbieten soll, kann dann bei der Einordnung in die Hierarchie zusätzlich eine *case-of* Verknüpfung zu dieser Hierarchie erhalten (vgl. Bild 26).

Die offene Hierarchie erlaubt es so auch, zusätzliche Maschinenklassen in neuen Hierarchien hinzuzufügen. Dies ist in Lebensmittelverpackungsanlagen besonders von Interesse, da hier häufig auch Fertigungsmaschinen, wie z. B. sogenannte Slicer zur Zerteilung von großen Lebensmitteln (z. B. Käseläiben) in Scheiben, eingesetzt werden. Da sie direkt in die Anlage integriert werden, ist eine standardisierte Anbindung auch bei diesen Maschinen wünschenswert. Ähnliches gilt für mit der Anlage verbundene Prozessanlagen.

Die Gerätebeschreibungsdateien der einzelnen Maschinenklassen, die die Mindestanforderungen nach den WS enthalten, könnten als spezielle Sicht der entsprechenden Klassen angesehen und über den *is-view-of* Operator mit ihnen verknüpft werden. Da der PLibEditor diesen Operator jedoch nicht unterstützt, kann hierfür auch eine andere Möglichkeit genutzt werden: der PLibEditor erlaubt das Verknüpfen der einzelnen Klassen mit Definitionsdateien (Documents of Definition). Diese sind bei jeder Klasse als Verweis anzugeben, so dass die fehlenden *functional models*, die ansonsten eine Sicht als Gerätebeschreibungsdatei der Produktklasse ermöglichen, wenigstens zum Teil kompensiert werden können.

Um die Standardisierung auf allgemeine Lebensmittelverpackungsanlagen auszuweiten, ist außerdem eine Verallgemeinerung verschiedener Datenpunkte notwendig. Dies kann erreicht werden, indem Bezug auf die in Kapitel 2.1.1 dargestellten Zusammenhänge in Abfüll- und Verpackungsanlagen genommen wird (vgl. Bild 3). Abfüllanlagen-typische Bezeichnungen, wie Flaschentyp (WS_Bottle_Type), können in den allgemeineren Packgutttyp (WS_Packaging_Type) überführt werden usw. Eine Auflistung der so in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Anwendungszentrum für Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (Fraunhofer AVV) in Dresden verallgemeinerten Datenpunkte findet sich in Anhang G.

3.1.3 Festlegen der Datenpunkte für die Diagnose

Auf Basis der unter 3.1.1 beschriebenen Standards wurde in einem iterativen Prozess in Verbindung mit den unter 4.2 beschriebenen Ansätzen eine Teilmenge der möglichen Beobachtungen als Diagnose-Datenbasis festgelegt.

Für eine Verbesserung der in dieser Arbeit erstmalig angewendeten Methoden und eine damit verbundene bessere Qualität der Ergebnisse kann es möglich sein, dass in Zukunft zusätzliche Datenpunkte in die unten angegebene Struktur mit eingefügt werden. Grundsätzlich wurden folgende Datenpunkte identifiziert, die das Diagnoseergebnis bei den unten dargestellten Methoden positiv beeinflussen können:

- die Maschinenzustände nach WS (vgl. Anhang C und [163], Teil 2) oder eine Abbildung der vorliegenden Maschinenzustände auf diese Standards (vgl. Anhang H)
- die Einstellausbringungen der Maschinen
- Objektzähler, dabei auch alle Zähler über ausgeschleuste Objekte (siehe auch hierzu [163], Teil 2)
- Informationen über gesetzte mechanische Sperren
- ggf. Stauschalterbelegungen oder, wenn möglich, Pufferfüllungsgrade
- ggf. Förder- und Maschinengeschwindigkeiten

Zusätzlich sind auch folgende Parameter zu erfassen (sollten nach Möglichkeit auch nach WS in der Datenbank vorliegen):

- Parameter der einzelnen Maschinen (Nennausbringung, Kapazität, Zeit zum Voll- und Leerfahren, Totzeit)
- Parameter der einzelnen Transporteure (Kapazität, Totzeit, ggf. Geometrieinformationen)

Während die Parameter in eine Anlagenbeschreibung einfließen (vgl. 4.2), werden die anderen Datenpunkte in einer standardisierten Datenbankschnittstelle zur Verfügung gestellt. Die Attribute dieser Schnittstelle lauten wie folgt:

- Machine_ID (Format Integer)
- Value_ID (Format Integer)
- Start_Time (Format Integer [Unix-Time, ms seit 01.01.1970])
- End_Time (Format Integer [Unix-Time, ms seit 01.01.1970])
- Integer_Value (Format Integer)
- Real_Value (Format Real)
- Bool_Value (Format Boolean)

Über die Machine_ID und Value_ID wird dabei eindeutig der Datenpunkt festgelegt, der zwischen Start_Time und End_Time aktuell war. Eine beispielhafte Auflistung der einzelnen IDs in einer Konfigurationstabelle zeigt Anhang I. Da es sich bei allen Dateninhalten nur um Werte im Integer, Real oder Boolean Format handelt, wird der zugehörige Wert unter dem entsprechenden Attribut der Relation abgelegt. Der Wert des jeweils anderen Attributs ist NULL (vgl. die Beispieltabelle in Anhang J).

Die einzelnen herstellerepezifischen Datenbanken der Beispielanlagen (vgl. 3.5.1) wurden mit geeigneten SQL-(Structured Query Language)-Prozeduren in die Diagnose Datenbank überführt.

3.2 Verbreitung der standardisierten Datenerfassung

Um die Verbreitung und Akzeptanz der WS zu bewerten, wurde 2006, ein Jahr nach deren Veröffentlichung, eine internationale Umfrage unter Maschinen- und Anlagenbauern, Systemanbietern und Anwendern (Brauereien und Getränkeabfüllbetrieben) durchgeführt. Die Stichprobengröße der befragten Unternehmen betrug 700 und teilte sich folgendermaßen auf:

- Getränkeabfüllbetriebe: 500 Befragte
- Zulieferindustrie (Anlagen-/Maschinenbauer und Systemlieferanten): 200 Befragte

Die Rücklaufquote betrug rund 8 %, was einem typischen Wert für schriftliche Umfragen entspricht [141].

Nachfolgend sollen nur die für die vorliegende Arbeit wichtigsten Ergebnisse dargestellt werden.

Ein wichtiger Hinweis auf die Verbreitung der WS ist ein Vergleich mit der Bekanntheit anderer Richtlinien, die Standardisierungen für Abfüll- und Verpackungsmaschinen beinhalten. Hierzu wurde ein Vergleich mit den Regelwerken eines internationalen Standardisierungsgremiums, der OMAC (Open Modular Architecture Control) Users Group, durchgeführt. Die OMAC stellt einen Zusammenschluss namhafter Unternehmen dar. Sie besteht sowohl aus Anwendern als auch Herstellern von Maschinen sowie aus Technologieanbietern und Systemhäusern. Das Ziel der OMAC ist das Schaffen eines gemeinsamen Wissens- und Erfahrungspools zur Realisierung offener Kommunikationsstandards.

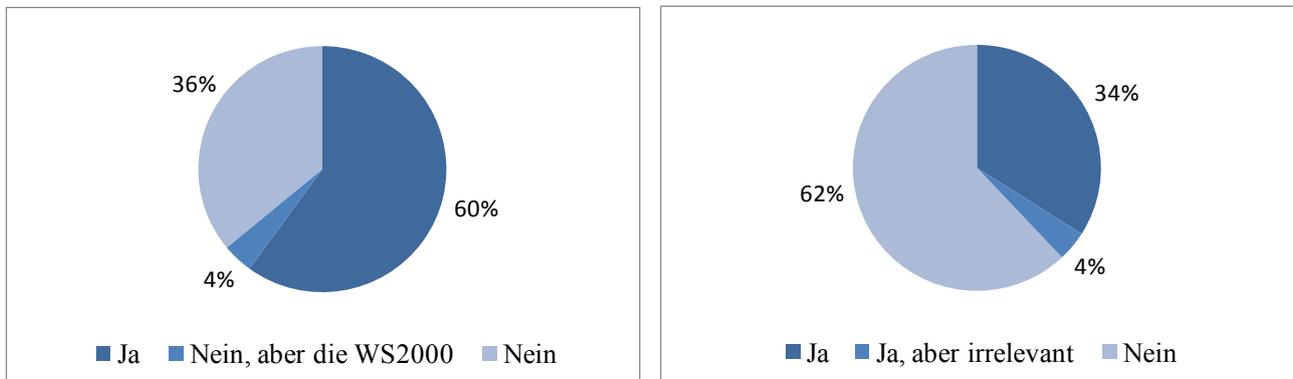


Bild 27: Ergebnisse zu den Fragen: „Kennen Sie die Weihenstephaner Standards 2005?“ (links) und „Kennen Sie die OMAC Guidelines?“ (rechts)

Hierbei unterteilt sich die OMAC in verschiedene Untergruppen, von denen vor allem die Gruppe PackML, die sich mit der Definition verschiedener Linientypen sowie eines State Models für die Betriebszustände von Abfüll- und Verpackungsmaschinen und Richtlinien für die Benennung von Datenpunkten beschäftigt, für die vorliegende Arbeit von Interesse ist [210], [211], [212], [213].

Bild 27 verdeutlicht, dass die Weihenstephaner Standards bereits ein Jahr nach der Veröffentlichung unter den Befragten eine größere Bekanntheit besaßen, als die im Jahr 2002 veröffentlichten OMAC Guidelines.

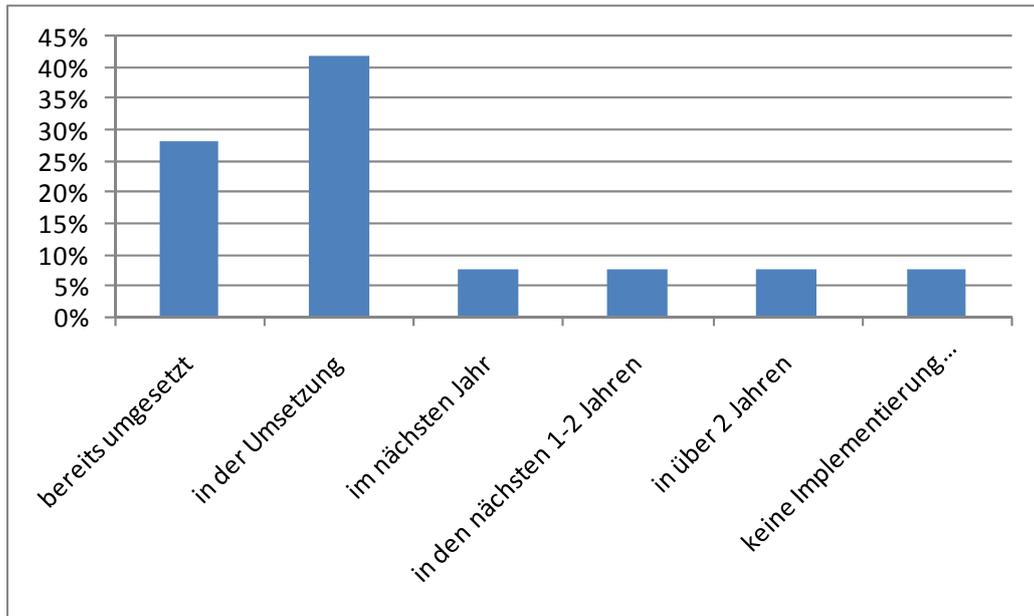


Bild 28: Ergebnisse zu der Frage „Wann planen Sie eine Implementierung der Weihenstephner Standards 2005?“

Dieser Indikator für eine schnelle Verbreitung wird durch den in Bild 28 dargestellten hohen Implementierungswillen bei den Befragten gestützt.

Dass auch die Erweiterung der WS auf den gesamten Bereich der Lebensmittelverpackungsanlagen in ähnlich schnellem Maße akzeptiert werden wird, lassen Einschätzungen von Fachleuten (vgl. Bild 29) und die Antworten auf die Fragen nach dem Wunsch einer Erweiterung der Standards in der Umfrage vermuten. Hier wünschen sich 55 % der Befragten, dass die Standards auch auf andere Bereiche übertragen werden. Namentlich wurden dabei vor allem vor- und nachgeschaltete Prozessbereiche in der Getränkeindustrie sowie die Lebensmittel- und Pharmabranche genannt.

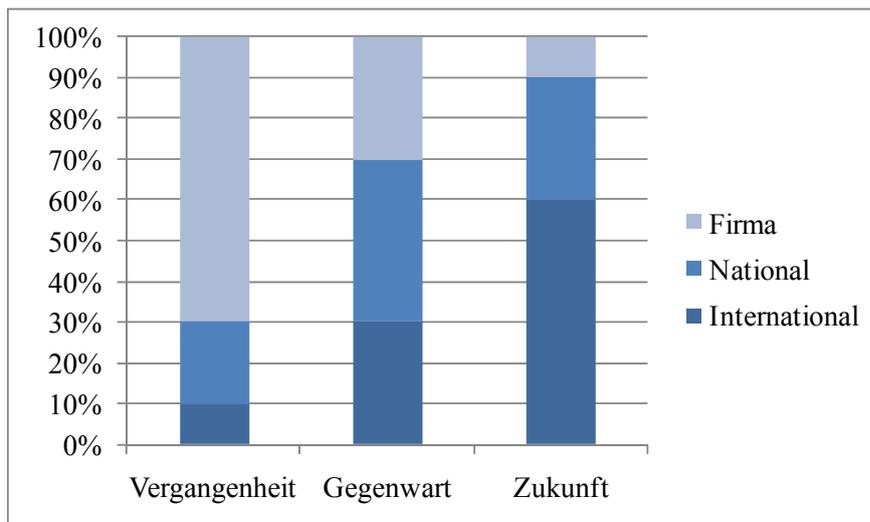


Bild 29: Bedeutung von Standards (Firmenstandards, nationalen und internationalen Standards) für Unternehmen nach [178]

Für die wirtschaftliche Bedeutung der Standardisierung für die Anwender sei beispielhaft die durch [135] dargestellte Kostenentwicklung bei BDES gezeigt. Bild 30 verdeutlicht, dass die Standardisierung einen erheblichen Beitrag zur Systemkostensenkung leistet. Dies bedeutet ferner, dass langfristig damit zu rechnen ist, dass eine größere Anzahl von BDE-Systemen in Lebensmittelverpackungsanlagen vorhanden sein wird. Zusammen mit der starken Akzeptanz der Standardisierung der Datenerfassung und -bereitstellung bedeutet dies, dass in Zukunft eine leistungsfähige Datenbasis für die Anwendung von Diagnosealgorithmen zur Verfügung steht.

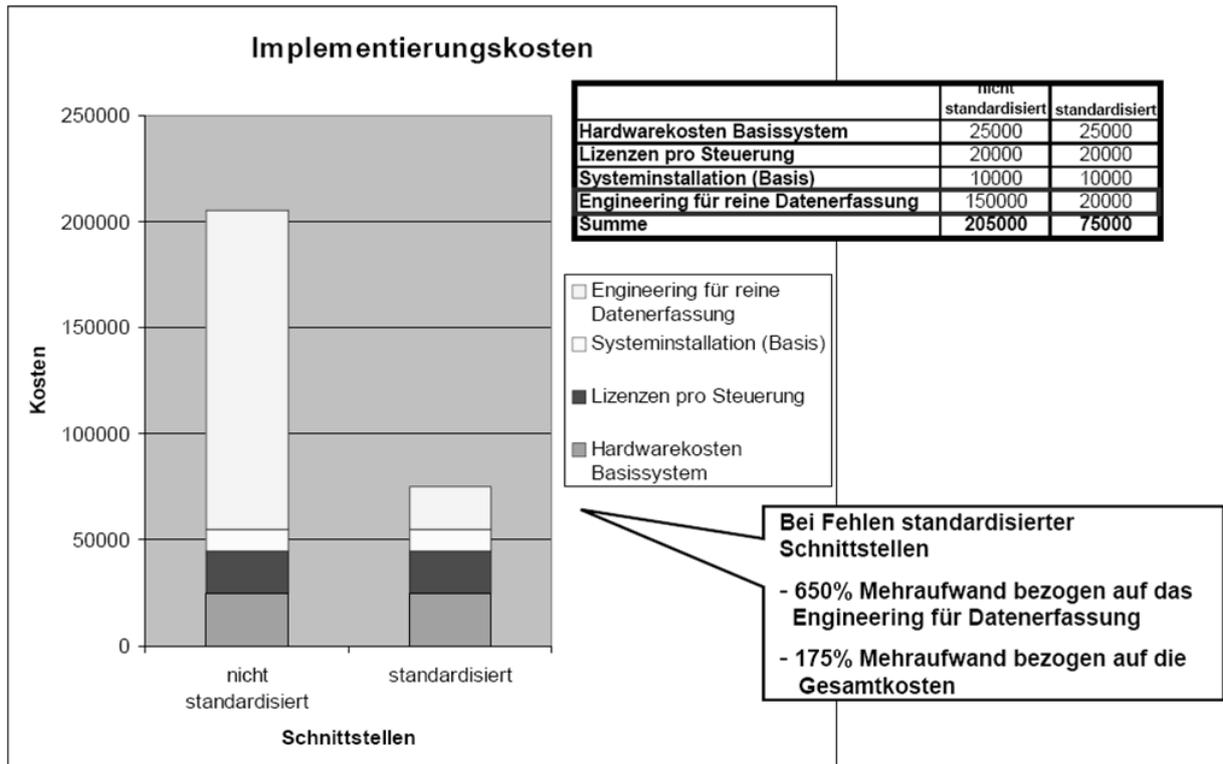


Bild 30: Implementierungskostenvergleich von BDES bei einer typischen Glas-Mehrweg-Abfüllanlage [135]

3.3 Statistische Untersuchungen zur Erfassung der Objektströme und Anlagenparameter

Um die für die Diagnose benötigten Daten in einer einfachen und vertrauenswürdigen Art und Weise bereitzustellen, waren einige statistische Untersuchungen notwendig. Im Folgenden wird untersucht, wie genau Objektströme in Anlagen mit der derzeitigen Sensortechnik erfasst und berechnet werden können und wie sich die geforderten Anlagenparameter möglichst einfach bestimmen lassen.

3.3.1 Direkte Messung der Objektströme

Wie aus Kapitel 3.1.3 hervorgeht, wird bei allen Maschinen in Lebensmittelverpackungsanlagen gefordert, dass die verarbeiteten Objekte gezählt werden. Bei kontinuierlichen Maschinen mit einsträngiger Zu- oder Abführung erfolgt dies im Allgemeinen durch Lichtschranken oder ähnliche Sensoren (vgl. Kapitel 2.1.2). Bei taktweise arbeitenden Maschinen, denen die Objekte mehrsträngig zu- oder abgeführt werden, werden häufig die Takte gezählt und mit der Anzahl der pro Takt verarbeiteten Objekte multipliziert. Über eine entsprechende Betrachtung der Anzahl der Maschinenzyklen ist dies auch bei nicht einsträngig eingebundenen kontinuierlichen Maschinen möglich.

Bei diesen Vorgehensweisen wird jedoch vorausgesetzt, dass die Maschinen auch jederzeit vollständig beschickt sind, bzw. die entsprechende Anzahl an Objekten verarbeiten. Dies kann jedoch nicht vorausgesetzt werden. Es wurden daher einzelne Maschinen aus Getränkeabfüllanlagen bezüglich der Abweichungen der tatsächlich verarbeiteten von den berechneten Objekten untersucht.

Dabei wurden zunächst einzelne Maschinen betrachtet, die über eine Kontrolle verfügen, ob alle verarbeitbaren Objekte vorhanden sind. Untersucht wurden exemplarisch eine Flaschen-Waschmaschine vom Typ Spiragrip und eine Setz-Einpackmaschine vom Typ Contipack der Firma Krones AG (jeweils in Fünffachbestimmung). Die Abweichung bei der Flaschen-Waschmaschine lag erwartungsgemäß bei 0. Bei der Setz-Einpackmaschine bestätigte eine Abweichung von unter 0,1 % ebenfalls die Erwartung, dass bei solchen Kontrollen die Anzahl verarbeiteter Objekte mit einem sehr geringen Fehler direkt aus Maschinendaten berechnet werden kann.

Als Beispiele für Maschinen ohne Objektkontrolle wurden in vier verschiedenen Anlagen drei Flaschen-Waschmaschinen anderer Bauart und drei Setz-Auspackmaschinen untersucht. Die Ergebnisse der Flaschen-Waschmaschinen sind in Bild 31 dargestellt. Dabei wird zwischen dem Einlauf und dem Auslauf unterschieden. Es ist hierbei anzumerken, dass die Abweichungen vor der Flaschen-Waschmaschine nicht direkt denen nach der Flaschen-Waschmaschine zugeordnet werden können, da es durch deren große Kapazität einen zeitlichen Versatz zwischen Aufnahme und Abgabe der Objekte gibt. Da es passieren kann, dass in der Flaschen-Waschmaschine aufgrund von Temperatursprüngen, mechanischer und chemischer Beanspruchung einige Flaschen platzen oder anderweitig beschädigt werden, ist der etwas höhere Anteil an Abweichungen nach der Maschine nicht verwunderlich. Auffallend sind die relativ großen Konfidenzintervalle (Vertrauensbereich für 95 % statistische Sicherheit bei einer t-

Student Verteilung). Selbst bei recht niedrigen mittleren Abweichungen ist daher eine genaue Bestimmung der Objektanzahl zu jedem Zeitpunkt rein rechnerisch nicht möglich.

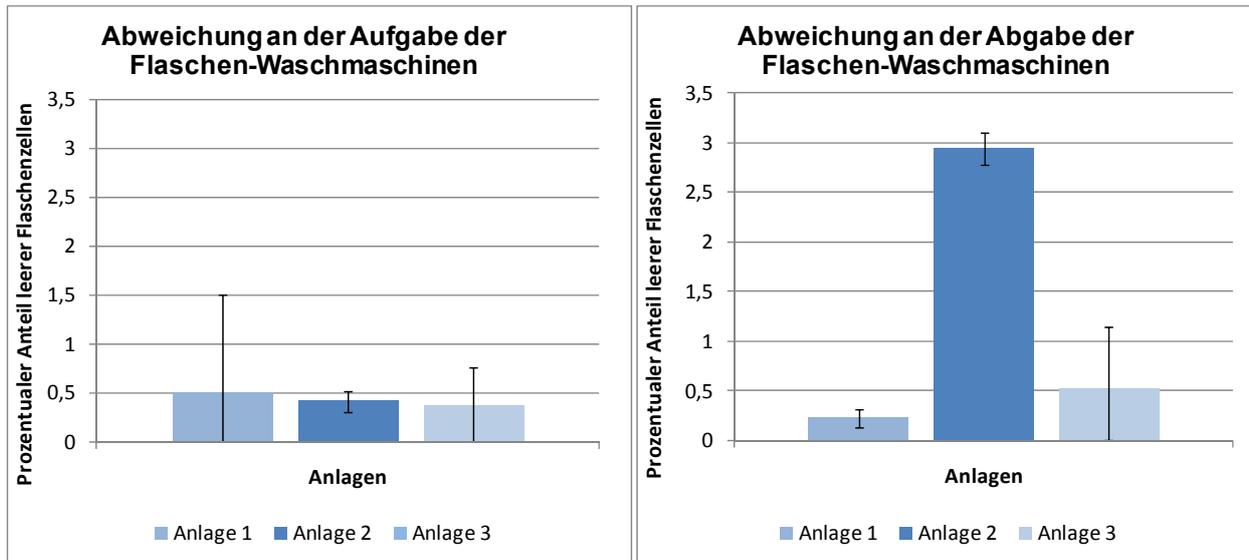


Bild 31: Mittelwerte bei einer Dreifachbestimmung der Anzahl leerer Flaschenzellen an der Auf- und Abgabe einer Flaschen-Waschmaschine (Vertrauensbereich 95 %)

Die Ergebnisse der Setz-Auspackmaschinen zeigt Bild 32. Die durch ein automatisches Inspektionssystem über mehrere Wochen aufgenommenen Werte zeigen einen stark unterschiedlichen Anteil an Leergefäßen in den Flaschenkästen. Auch hier sind die Konfidenzintervalle relativ groß.

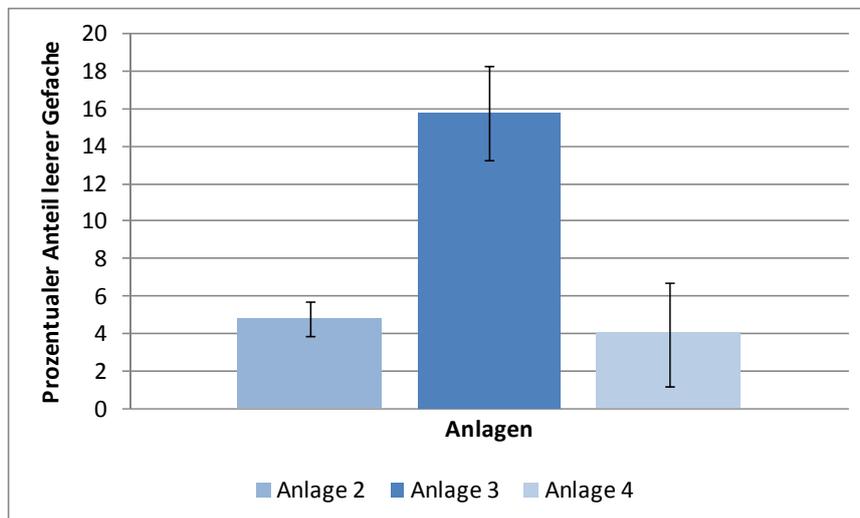


Bild 32: Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) bei der Mehrfachbestimmung (19-28 fach) leerer Gefäße von Flaschenkästen am Auspacker

Bei Anlagen, in denen keine Inspektionssysteme mit entsprechenden Zählern verfügbar sind, kann somit keine vertrauenswürdige Anzahl der ausgepackten Objekte berechnet werden.

Für eine exakte Bestimmung der Objektanzahl ist es daher notwendig, die Objekte an bestimmten Stellen in der Anlage mithilfe von Sensoren oder Sensorsystemen direkt zu zählen.

Der Messfehler bei solchen Systemen muss dabei, um einen Zusatznutzen zu generieren, kleiner als die aus den oben dargestellten Ergebnissen ersichtlichen Abweichungen sein.

3.3.2 Parameterabschätzung für Transporteure

Um die Kapazitäten und Totzeiten von Transporteuren direkt aus einem Anlagenplan bestimmen zu können, sind mehrere Anforderungen zu erfüllen. Die Totzeit bezeichnet die Zeitspanne, die ein Objekt bei leerem Transporteur von einer Maschine bis zur nachfolgenden benötigt (vgl. 4.1). Um diese aus dem Anlagenplan zu bestimmen, muss lediglich die Wegstrecke eines ungestörten Objekts (die Ideallinie) auf dem Transporteur bekannt sein. Anhand der Fördergeschwindigkeiten entlang dieser Ideallinie kann dann die Totzeit berechnet werden (vgl. 4.1). Ist diese Wegstrecke nicht bekannt und lässt sie sich auch aus der Geometrie des Transporteurs nicht eindeutig ermitteln, ist eine Messung der Totzeit sinnvoll.

Die Bestimmung der Kapazität der Puffer (im Folgenden: Pufferkapazität) aus dem Anlagenplan ist schwieriger. Hier kann aus der Geometrie des Puffers (Länge l_B * Breite $b_B = A_B$) und aus der Geometrie der Objekte (Fläche A_O) eine theoretische Anzahl berechnet werden:

$$K_P = \frac{A_B}{A_O}$$

Formel 3.1

Jedoch können die Objekte in den meisten Fällen die Fläche nicht vollständig füllen. Aufgrund der Geometrie der Objekte sind objektspezifische Porositäten zu erwarten.

Dabei kann man für zylinderförmige Objekte, wie Flaschen und Dosen, unter der Annahme einer dichtesten Zylinderpackung (Durchmesser d_O) und weitgehender Vernachlässigung der Randgebiete die Pufferkapazität K_P nach PROBST wie folgt berechnen [228]:

$$K_P = \frac{l_B}{d_O} \left[\left(\frac{b_B}{d_O} - 1 \right) \frac{2}{\sqrt{3}} + 1 \right]$$

Formel 3.2

Jedoch zeigten Versuche von RÄDLER, dass diese theoretische Pufferkapazität nicht erreichbar ist. Es muss daher eine „typische Porosität“ berücksichtigt werden, da sich die Objekte im Allgemeinen nicht in der optimalen Flächenausnutzung anordnen und Randgebiete auftreten [234].

$$K_P = \frac{A_B}{A_O} P_{B/O}$$

Formel 3.3

Diese Porosität wurde für die in den Beispielanlagen beförderten Objekte (Flaschen) näher untersucht.

Die Ergebnisse von RÄDLER zeigen, dass unterschiedliche Bandgeschwindigkeiten bei Glasflaschen keinen signifikanten Einfluss auf die Porosität des Flaschenpulks haben [234]. Daher wurde dieser Aspekt bei den durchgeführten Untersuchungen vernachlässigt. Es wurden statt-

dessen sowohl in der unter 3.4.1 beschriebenen Versuchsanlage als auch in realen Anlagen Versuche bei unterschiedlichen Pufferbreiten mit unterschiedlichen Verhältnissen Pufferbreite/Objektabmessung durchgeführt. Dabei liegt die Erwartung nahe, dass der Porositätsfaktor umso näher an 1 liegt, je weniger das Verhältnis von Pufferbreite zu Flaschendurchmesser von einem ganzzahligen Vielfachen abweicht, da sich die Flaschen dann in der theoretisch besten Zylinderpackung anordnen können.

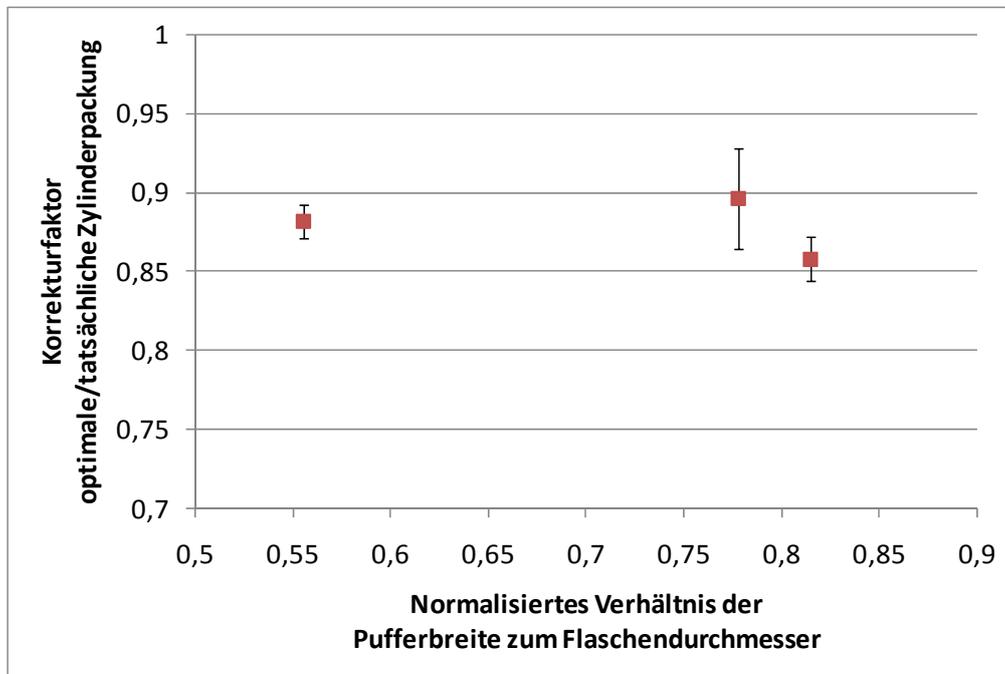


Bild 33: Mittelwerte und Vertrauensbereiche (95%) bei der Mehrfachbestimmung (4 -8 fach) des Porositätsfaktors in Abhängigkeit vom Verhältnis Pufferbreite zum Vielfachen des Flaschendurchmessers

Wie Bild 33 zeigt, hat die Abweichung von einem ganzzahligen Verhältnis zwischen Pufferbreite und Objektdurchmesser jedoch keinen signifikanten Einfluss.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden daher sowohl die Totzeiten als auch die Pufferkapazitäten der Transporteure gemessen, wenn dies möglich war. Hierzu wurden die Zeiten für den Objekttransport nach einem Mangelzustand, die genau der Totzeit des entsprechenden Transporteurs entspricht, mit einer Stoppuhr ermittelt. Zur Bestimmung der Kapazität wurden die Transportstrecken bis zum Erreichen der Staumeldung vollgefahren und die Anzahl der auf dem Transporteur befindlichen Objekte bestimmt. Da diese Messungen sehr zeitaufwendig sind und die Beispielanlagen während des normalen Produktionsbetriebs untersucht wurden, konnte dies häufig nur in Form von Einfachbestimmungen erfolgen. Konnte eine experimentelle Bestimmung nicht erfolgen, wurde für die Berechnung der Daten aus den Anlageplänen ein Porositätsfaktor 0,87 verwendet, der sowohl den Mittelwert aus den eigenen Untersuchungen als auch den Mittelwerten der Untersuchungen von RÄDLER darstellt [234].

3.4 Sensorsysteme zur Verbesserung der Datenqualität

Um den Mangel an Informationen in den Bereichen des Massentransports zu beseitigen (vgl. Kapitel 3.3.2), werden neue Sensoren bzw. Sensorsysteme benötigt, die es ermöglichen, auch im Pulk geförderte Objekte zuverlässig zu zählen. In den folgenden Kapiteln wird nach einer kurzen Darstellung der Versuchsanlage zur Sensorentwicklung ein Ansatz vorgestellt, der im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde. Das vorgestellte System bezieht sich dabei aufgrund der in dieser Arbeit betrachteten Beispielanlagen auf das Zählen von Flaschen oder ähnlicher Gebinde.

3.4.1 Beschreibung der Versuchsanlage zur Entwicklung von Sensoren und Sensorsystemen

Um neue Sensoren und Sensorsysteme für den Praxiseinsatz in Lebensmittelverpackungsanlagen zu entwickeln, wurde eine Flaschenförder-Versuchsanlage modifiziert und in Betrieb genommen. In der Anlage sind sowohl einsträngige Transportbereiche als auch Massentransporture vorhanden (vgl. Bild 34). Dies erlaubt, verschiedene Testszenarien zu untersuchen.

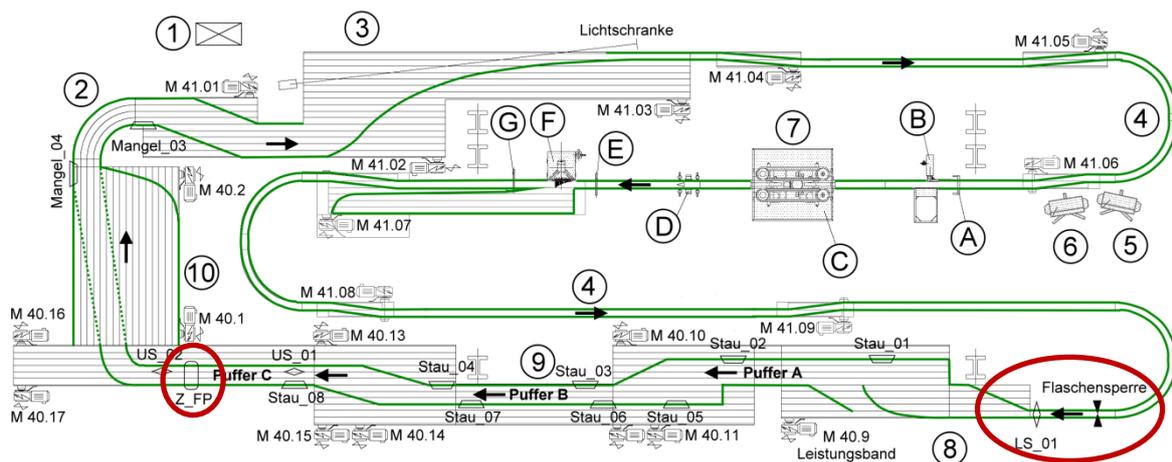


Bild 34: Versuchsanlage zur Sensorentwicklung mit hervorgehoben eingezeichneter Geländerführung; 1: Schaltschrank, 5 und 6: Bedienterminals, 2-4 und 8-10: verschiedene Transportabschnitte, A-G Komponenten der Inspektionsmaschine (detaillierte Beschreibung in Anhang K)

Die Anlage kann sowohl mit Glas- als auch mit PET-Flaschen beschickt werden, was es ermöglicht, die Sensoren und Sensorsysteme hinsichtlich ihrer Eignung bei unterschiedlichen Packmitteln zu untersuchen.

Die Steuerung der Anlage erfolgt über eine SPS vom Typ *Siemens Simatic S7 300 CPU 317-2 PN/DP*. Die Visualisierung und Bedienung wird mithilfe eines *Simatic Rack PC 840 V2* realisiert. Die frequenzgesteuerten Motoren in der Anlage sind mit der Maschinensteuerung über ein *Profibus DP*-Netzwerk verbunden. Sensoren können sowohl direkt als auch über das Interfacemodul *IMI51-1 High Feature* aus der Gruppe der dezentralen Peripheriegeräte *ET200S* mit der SPS verbunden werden. Die Maschinensteuerung kann durch den eingesetzten Kommunikationsprozessor mit übergeordneten Systemen auch via Ethernet kommunizieren, was eine Betriebsdatenerfassung nach den WS ermöglicht (siehe oben).

Für die Versuche zur Objektzählung können die Fördergeschwindigkeiten der Transporteure mittels der Drehzahlen der frequenzgeregelten Motoren über die Visualisierung einzeln oder in Gruppen eingestellt werden.

Während der Untersuchungen stellte sich heraus, dass sich die in Bild 34 mit Z_FP gekennzeichnete Stelle am besten für die Versuche zum Objektzählen eignet. An dieser Stelle der Anlage haben die Objekte mehrere Abschnitte eines Massentransporteurs mit unterschiedlichen Fördergeschwindigkeiten durchlaufen und befinden sich in einer von den Fördergeschwindigkeiten und der Geländerführung abhängigen, verteilten Anordnung. Dies entspricht dem typischen Verhalten in industriellen Anlagen. Die Flaschensperre und die Lichtschranke (LS_01 in Bild 34) am Übergang vom einsträngigen Transport zum Massentransport ermöglichen es, eine abgezählte Anzahl an Flaschen einlaufen zu lassen, so dass eine Überprüfung der Zählwerte an der Position Z_FP möglich ist.

Eine vergrößerte Darstellung der Versuchsanlage befindet sich in Anhang K.

3.4.2 Kombination von Einzelsensoren zu Sensorsystemen

Eine Strategie für das Zählen von Objekten im Pulk ist das Verwenden preiswerter Standardkomponenten, die mit einer Maschinensteuerung, die im Allgemeinen in den Anlagen schon vorhanden ist, zu einem Sensorsystem kombiniert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Algorithmus entwickelt, der mit dem klassischen Befehlsumfang einer SPS problemlos umgesetzt werden kann.

3.4.2.1 Auswertalgorithmus und Anforderungen an die Sensoren

Da es sich bei den Standardkomponenten um Einzelsensoren handelt, ist es für das Funktionsprinzip des Sensorsystems wichtig, dass der Abstand der Sensoren gewährleistet, dass keine Flasche zwischen zwei Sensoren hindurchlaufen kann, ohne dabei detektiert zu werden. Der Abstand der Sensoren s_s ergibt sich somit aus dem Mündungsdurchmesser der jeweiligen Flaschensorte (bzw. des ähnlichen Gebindes).

Im direkten Zusammenhang hiermit steht die Größe der Sensoren, die von der Flaschen- oder Gebindegeometrie abhängig ist. Somit existiert für die Sensoren eine flaschen- oder gebinde-spezifische Maximalgröße. Damit der entwickelte Algorithmus verwendbar ist, muss sichergestellt werden, dass neben den Sensoren, die eine Flasche oder ein ähnliches Gebinde detektieren, gleichzeitig ein Sensor nicht belegt ist. Ist dies nicht der Fall, kann nicht zwischen einem Gebinde, das zwei Sensoren belegt, und zwei Gebinden, die jeweils einen Sensor belegen, unterschieden werden.

Daraus folgt eine Formel zur Berechnung der Sensorgröße in Abhängigkeit ihres Abstands und der Gebindegeometrie:

$$2b_s + s_s < s_m$$

Formel 3.4

wobei b_s die Breite der Sensoren, s_s der Abstand zwischen den Sensoren und s_m der Abstand der Gebindemündungen bei der dichtesten Packung sind.

Zusätzlich zu diesem Zusammenhang muss auch eine gegenseitige Beeinflussung der Sensoren ausgeschlossen werden. Weitere entscheidende, physikalische Größen sind die Schaltfrequenz und der Messabstand der Sensoren. Während durch eine angemessene Schaltfrequenz gesichert werden muss, dass die bei maximaler Fördergeschwindigkeit durchlaufenden Behälter alle noch einzeln erkannt werden können, ist beim Messabstand zu beachten, dass er bei entsprechender Genauigkeit der Sensoren, groß genug sein muss, um auch bei umkippenden Behältern unter dem Sensorsystem Beschädigungen der Sensoren zu vermeiden. Zusätzlich ist es wünschenswert, dass die Sensoren verschiedene Packstoffe, wie PET und Glas, detektieren können.

Unter Berücksichtigung dieser Einflussgrößen können die Sensoren in eine entsprechende Haltevorrichtung eingebaut werden, die es erlaubt, das System z. B. in Form einer Brückenkonstruktion über dem Gebindestrom anzubringen. Die so erhaltenen Sensorsignale werden durch einen speziellen Algorithmus ausgewertet.

Der Algorithmus zur Auswertung der Signalzustände wurde mithilfe eines graphischen Modells erarbeitet, welches es erlaubt, den Durchlauf der Flaschen unter der Sensorbrücke zu verfolgen. Insgesamt lassen sich mehrere unterschiedliche Fälle bei der Sensorbelegung unterscheiden:

- Einzelkontakt: Die Flasche wird unabgelenkt unter den Sensoren hindurch transportiert und nur von einem Sensor erfasst.
- Doppelkontakt: Die Flasche wird unabgelenkt unter den Sensoren hindurch transportiert und von zwei nebeneinander liegenden Sensoren erfasst.
- Dreifachkontakt: Die Flasche prallt auf den Flaschenpulk, der sich direkt hinter den Sensoren gebildet hat, und wird seitlich abgelenkt. Dabei wird sie insgesamt von drei nebeneinander liegenden Sensoren erfasst (erster Fall des n-fach Kontakts).
- n-fach-Kontakt: Die Flasche prallt auf den Flaschenpulk, der sich direkt hinter den Sensoren gebildet hat, und wird seitlich abgelenkt. Dabei wird sie insgesamt von n nebeneinander liegenden Sensoren erfasst.

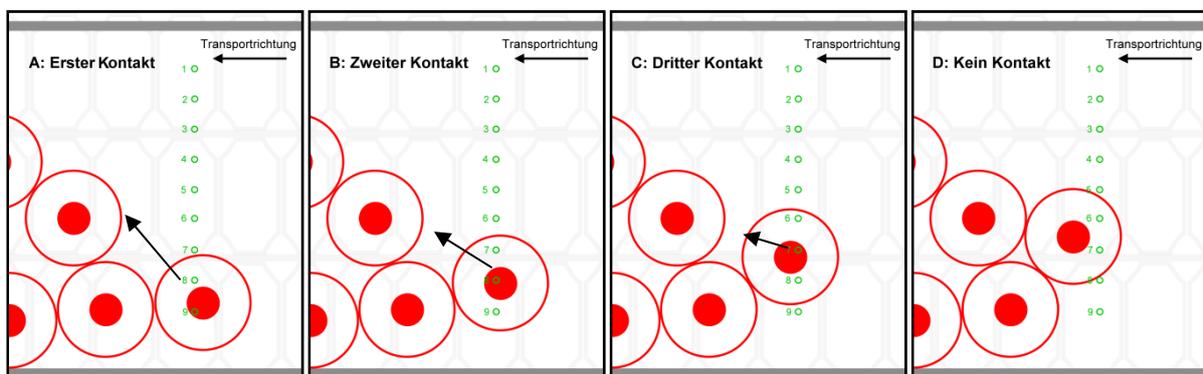


Bild 35: Dreifachkontakt einer Flasche durch seitliches Ablenken am Flaschenpulk (von links nach rechts)

Zur Verdeutlichung der Mehrfachkontakte wird der Dreifachkontakt in Bild 35 beispielhaft dargestellt.

Bei dem Transport von Flaschen oder ähnlicher Gebinde auf Massentransportern kann es neben dem oben gezeigten Effekt der Mehrfachbelegung durch das Verschieben der Gebinde auch zum Wackeln einzelner Flaschen oder Gebinde kommen. Ein solches Wackeln kann dazu führen, dass die Sensoren, unter denen sich die Flaschen befinden, kurzzeitig den Kontakt verlieren. Der Algorithmus muss daher auch eine gewisse Signalhaltezeit für die Sensoren vorsehen, damit wackelnde Gebinde nicht mehrfach gezählt werden.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich der in Anhang L in natürlichsprachlichem Pseudo-Code dargestellte Algorithmus. Um den Algorithmus zu testen, wurde ein Prototyp für das Detektieren von Flaschen in der in 3.4.1 beschriebenen Versuchsanlage entwickelt.

3.4.2.2 *Sensorauswahl*

Bei der Auswahl der Sensoren für den Prototyp wurden die oben beschriebenen allgemeinen sowie die speziell die Versuchsanlage betreffenden Anforderungen berücksichtigt. Für eine Berechnung von Formel 3.4 werden gebindebezogene Parameter benötigt. Tabelle 8 zeigt die für die Berechnung notwendigen Maße bei verschiedenen genormten und standardisierten Flaschen.

Tabelle 8: Eckdaten verschiedener Flaschenformen

Flaschenform und Nennvolumen in l	Mündungsdurchmesser außen max. in mm [48], [49], [75], [76]	Mündungsdurchmesser (Halsdurchgang) innen max. in mm [48], [49], [75], [76]	Flaschendurchmesser min. in mm
Vichy 0,2 [73]	26,8	16,5	53,3
Vichy 0,25 [73]	26,8	16,5	55,8
Vichy 0,33 [73]	26,8	16,5	60
Vichy Form 2 [74]	26,8	16,5	59,4
Euro-Form [78]	26,8	16,5	69,1
Euro-Form 2 [79]	26,8	16,5	69,1
Ale Form 0,33 [43]	26,8	17,5	59,7
Ale Form 0,5 [44]	26,8	17,5	67,1
Dosenform 0,33 [77]	26,8	17,5	64,7
Dosenform 0,5 [77]	26,8	17,5	69,7
NRW Form [42]	26,8	16,5	66,1
NRW Form Schraub. [42]	27,6 bzw. 30	19,5	66,1
Steinie mit E F 0,33 [80]	26,8	16,5	68,6
Steinie 0,33 [80]	26,8	17,5	69,4
Steinie 0,5 [80]	26,8	16,5	80,5
VdF Pfandflasche 0,7 [295]	27,6 (30 mit Gewinde)	19 bzw. 19,5	76
GDB PET 1,0 [249]	27,5	21,76	79,25

In der Tabelle sind die zum Entstehungszeitraum dieser Arbeit relevanten Flaschenformen hervorgehoben. Da in der Anlage Versuche mit 0,5-l-Glasflaschen und 1,0-l-PET Flaschen durchgeführt werden können, waren insbesondere diese in Betracht zu ziehen.

Grundsätzlich kommen für die berührungslose Detektion verschiedene Sensoren in Frage, die auch schon in Kapitel 2.1.2.1 näher beschrieben wurden. Aufgrund der speziellen Systemanforderungen, die auch in Tabelle 9 noch einmal zusammengefasst sind, scheidet jedoch alle nicht optischen Sensoren aus. Mit induktiven Sensoren ist es nicht möglich nicht-metallische Werkstoffe zu erkennen. Daher sind sie sowohl für offene als auch mit nicht-metallischen Verschlüssen verschlossene Behälter ungeeignet. Bei den kapazitiven Sensoren wirkt sich neben der großen Bauweise der Sensoren bei dem benötigten Messabstand auch eine starke gegenseitige Beeinflussung negativ aus.

Der Prototyp wurde daher mit optischen axialen Reflexrastern der Firma Schlüter Automation vom Typ SPM-30-592 kombiniert mit einer Glasfaseroptik SLG-18-R2/250P erstellt. Tabelle 9 zeigt, wie die ausgewählten Sensoren die oben dargelegten Anforderungen (in Kombination) erfüllen.

Tabelle 9: Anforderungen an die Einzelsensoren für das Sensorsystem

Anforderung	Reflexraster axial SPM-30-592	mit Glasfaseroptik SLG-18-R2/250P
Eignung für Glas, PET, Metall	✓	✓
Messabstand mindestens 1 cm	200 cm	5 cm
Breite des Sensors b_s , höchstens 1,125 cm (bei $s_s = 2,2$ cm und $s_m = 4,45$ cm)	3 cm	0,5 cm
Keine gegenseitige Beeinflussung	✓	✓
Schaltfrequenz mindestens 55 Hz (bei maximaler Objektgeschwindigkeit von 0,38 m/s)	100 Hz	100 Hz

Der Grenzwert für den Messabstand resultiert dabei aus den Abmessungen der Behälter. Die Werte s_s und s_m resultieren aus den in Formel 3.4 eingesetzten Werten der Tabelle 8.

Für die Schaltfrequenz wurde folgendermaßen eine theoretisch minimale Kontaktzeit ausgerechnet: Die auf der Versuchsstrecke realisierten Massentransportabschnitte werden mit einer maximalen Fördergeschwindigkeit von 0,38 m/s betrieben. Passiert (als Maximalanforderung) eine NRW-Flasche zwei Sensoren genau mittig, ergibt sich eine Kontaktstrecke von etwa 0,7 cm (vgl. Bild 36). In diesem Fall bleibt eine Kontaktzeit von 18,4 ms. Daraus ergibt sich direkt die minimale Schaltfrequenz von 54,3 Hz.

3.4.2.3 Konstruktive Gestaltung des Prototypen

Die ausgewählten Sensoren wurden in dem durch die Flaschengeometrie vorgegebenen Abstand s_m auf einer Schiene angeordnet. Diese ist mit einem Gestell verbunden, das es erlaubt, die Sensorleiste in der Höhe zu verstellen. Hierdurch ist es möglich, sowohl 0,5 l NRW-Flaschen als auch 1,0 l GDB PET Flaschen zu detektieren. Den Aufbau des Systems verdeutlicht Bild 37. Die Anbindung der Sensoren an die SPS erfolgte direkt über die E/A-Baugruppen.

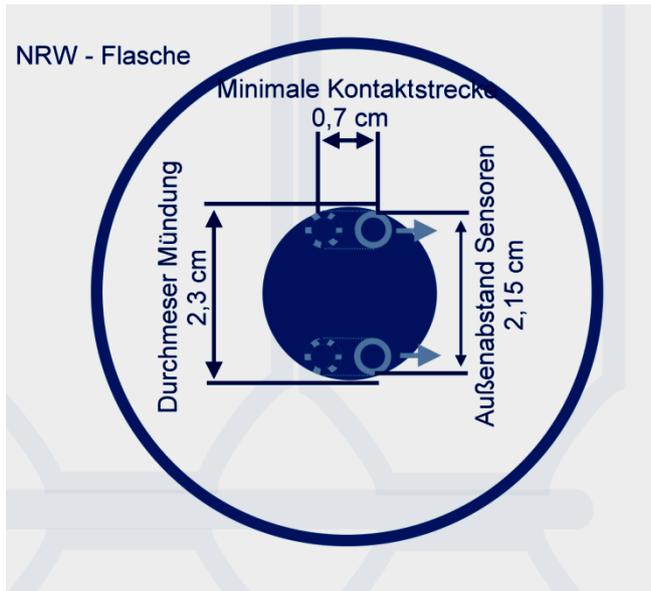


Bild 36: NRW-Flasche beim Passieren von zwei Sensoren

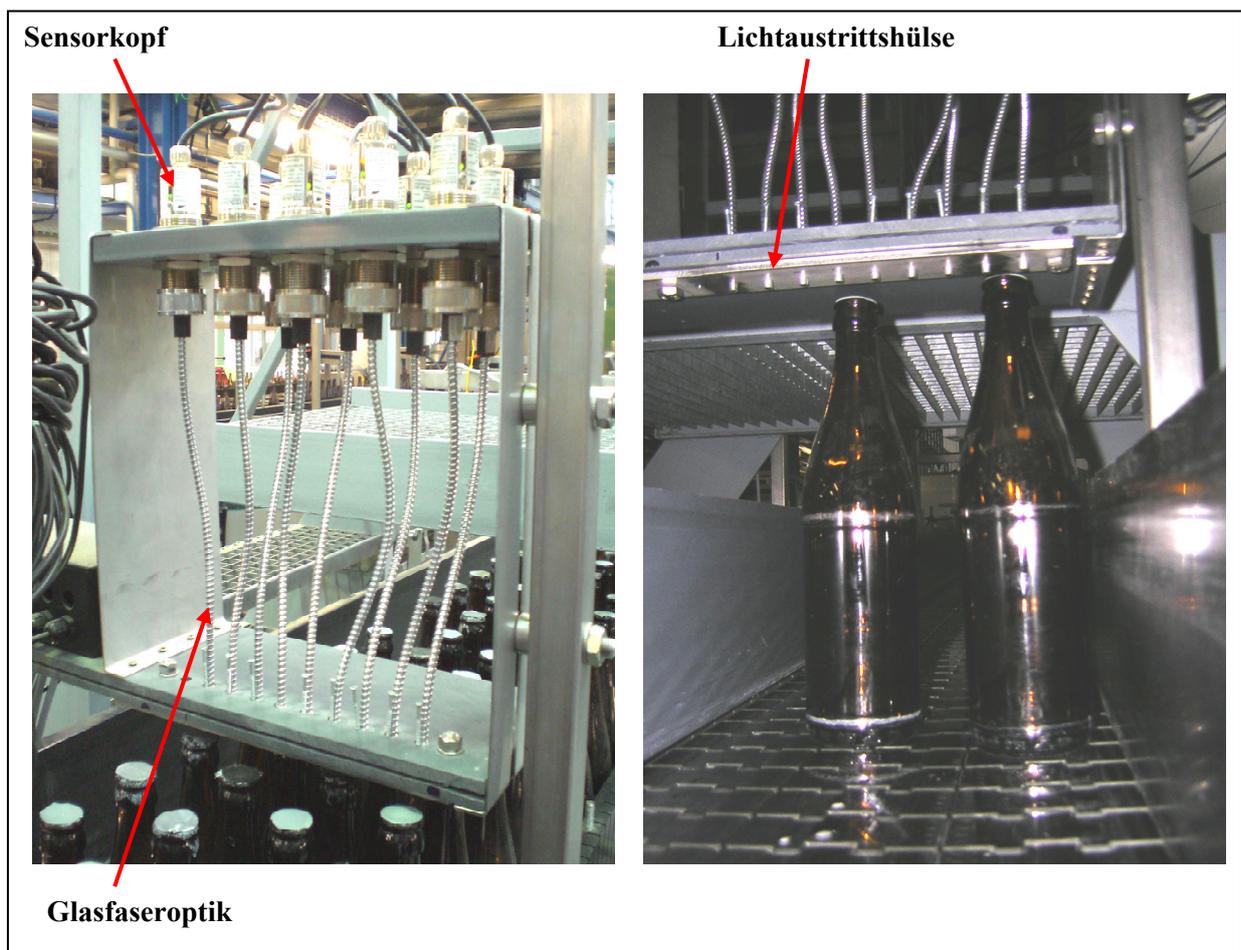


Bild 37: Prototyp des Sensorsystems

Aufgrund der kreisförmigen Gestaltung der Sensoren können diese bei offenen Behältern in der Mitte des Objekts den Kontakt verlieren, was zu einer Doppelzählung der Behälter führt. Der Prototyp ist in seiner derzeitigen Ausführung daher nur für geschlossene Flaschen geeig-

net. Eine Erweiterung auf offene Flaschen ist durch die Verwendung länglicher Sensoren theoretisch problemlos möglich. Bild 38 und Bild 39 verdeutlichen die Änderung der Sensorköpfe für eine solche Anordnung.

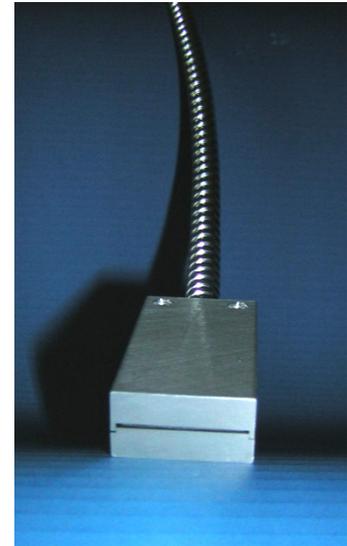
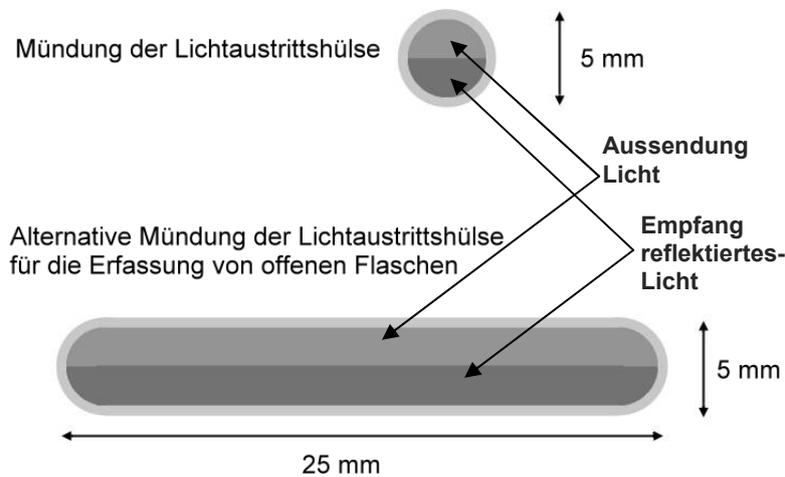


Bild 39: Prinzipielle Änderung der Lichtaustrittshülse des Reflextasters **Bild 38:** Prototyp für die Detektion offener Flaschen

In der vorliegenden Arbeit wurde auf eine Modifizierung des Systems zur Erkennung offener Flaschen verzichtet, da die Versuche mit geschlossenen Behälter für eine grundsätzliche Bewertung des Algorithmus' als ausreichend angesehen werden. Die Versuche wurden sowohl hinsichtlich variierender Signalhaltezeiten als auch in Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit als eine Fünffachbestimmung mit jeweils 1000 NRW Flaschen durchgeführt. Die Bewertung erfolgte durch Ermitteln der Differenz der durch das Sensorsystem gezählten Flaschen nach dem Massentransportabschnitt der Versuchsanlage (vgl. Bild 34) mit den am einsträngigen Eingang durch eine Lichtschranke gezählten Werten. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.1 dargestellt.

3.4.1 Untersuchung komplexer Einzelsensoren

Zusätzlich zu dem unter 3.4.2 dargestellten System wurden am Markt verfügbare komplexe Einzelsensoren auf ihre grundsätzliche Eignung für die vorliegende Problemstellung untersucht. Es ist anzumerken, dass die Auswertung der Sensoren nicht durch die in den Betrieben meist vorhandenen SPS mit übernommen werden können. Die hohe Komplexität der Algorithmen und die Menge der Daten erfordern eine spezielle Auswerteelektronik in Form von Industrie-PCs oder vergleichbaren Lösungen.

Im Lauf der Arbeit wurden verschiedene Sensoren untersucht, die jedoch den Anforderungen nicht genügten. Als Beispiel sei hierfür der Lasersensor LMS 400 der Firma SICK genannt (siehe [259] und [260]), der entweder nicht das benötigte Auflösungsverhalten bei ausreichender Frequenz oder eine zu niedrige Frequenz bei geeignetem Auflösungsverhalten erreichen konnte. Für die Versuche in der vorliegenden Arbeit wurde daher lediglich das unter 3.4.2 beschriebene Sensorsystem verwendet.

3.5 Testdatengenerierung

In diesem Kapitel werden die realen Anlagen sowie das Simulationsmodell vorgestellt, die für die Datenerfassung herangezogen wurden.

3.5.1 Datenerfassung an realen Beispielanlagen

Da sich die im Rahmen dieser Arbeit standardisierten Vorgaben für die Datenerfassung bisher lediglich in der Getränkeindustrie durchgesetzt haben, handelt es sich bei den Beispielanlagen um Getränkeabfüllanlagen.

3.5.1.1 Reale Anlage A

Bei der Anlage A handelt es sich um eine Abfüllanlage für 1-l-PET Mehrwegflaschen mit einer Nennausbringung von 32.500 Flaschen/h.

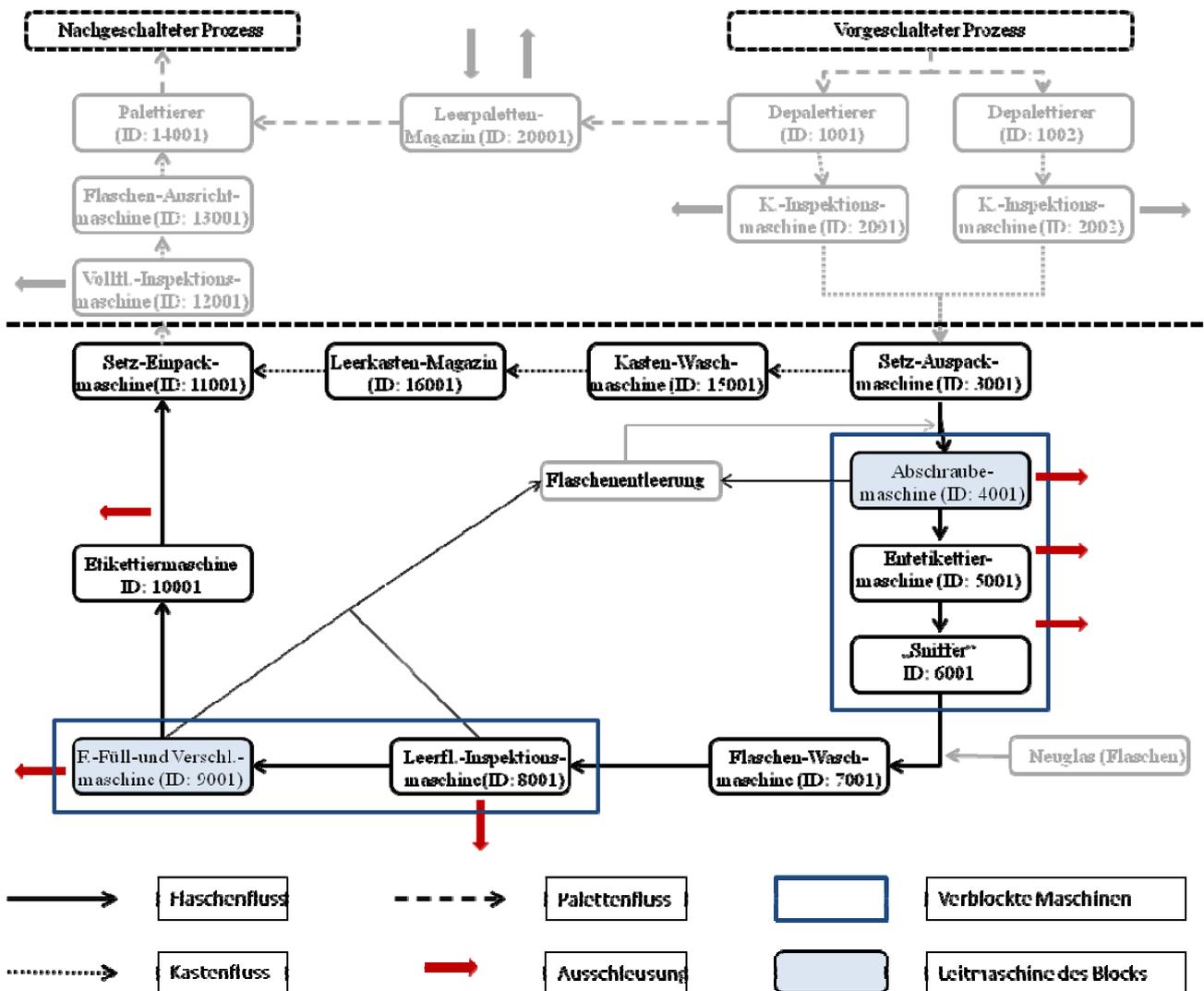


Bild 40: Anlagenschema der realen Anlage A

Der Aufbau und Objektfluss lassen sich durch Bild 40 verdeutlichen. Dabei verfügen die hellgrau dargestellten Aggregate über keine Anbindung an ein Betriebsdatenerfassungssystem.

Daher werden alle Maschinen vor der Setz-Auspackmaschine bzw. nach der Setz-Einpackmaschine zum vor- bzw. nachgeschalteten Prozess gezählt.

Ferner ist anzumerken, dass diese Anlage A nicht nach den WS, jedoch weitgehend nach dem Vorgänger dieser Standardisierung [303] ausgelegt wurde. Dies bedeutet, dass einige Datenpunkte entweder auf die entsprechenden WS Datenpunkte abgebildet werden mussten oder gar nicht zur Verfügung standen. Daher repräsentiert Anlage A eine unvollständige, fehlerbehaftete Datenbasis für die Diagnoseversuche.

Die Konfigurationstabellen, aus denen die Parameter der Anlage A hervorgehen (vgl. 4.2.1), sind in Anhang S enthalten.

3.5.1.2 Reale Anlage B:

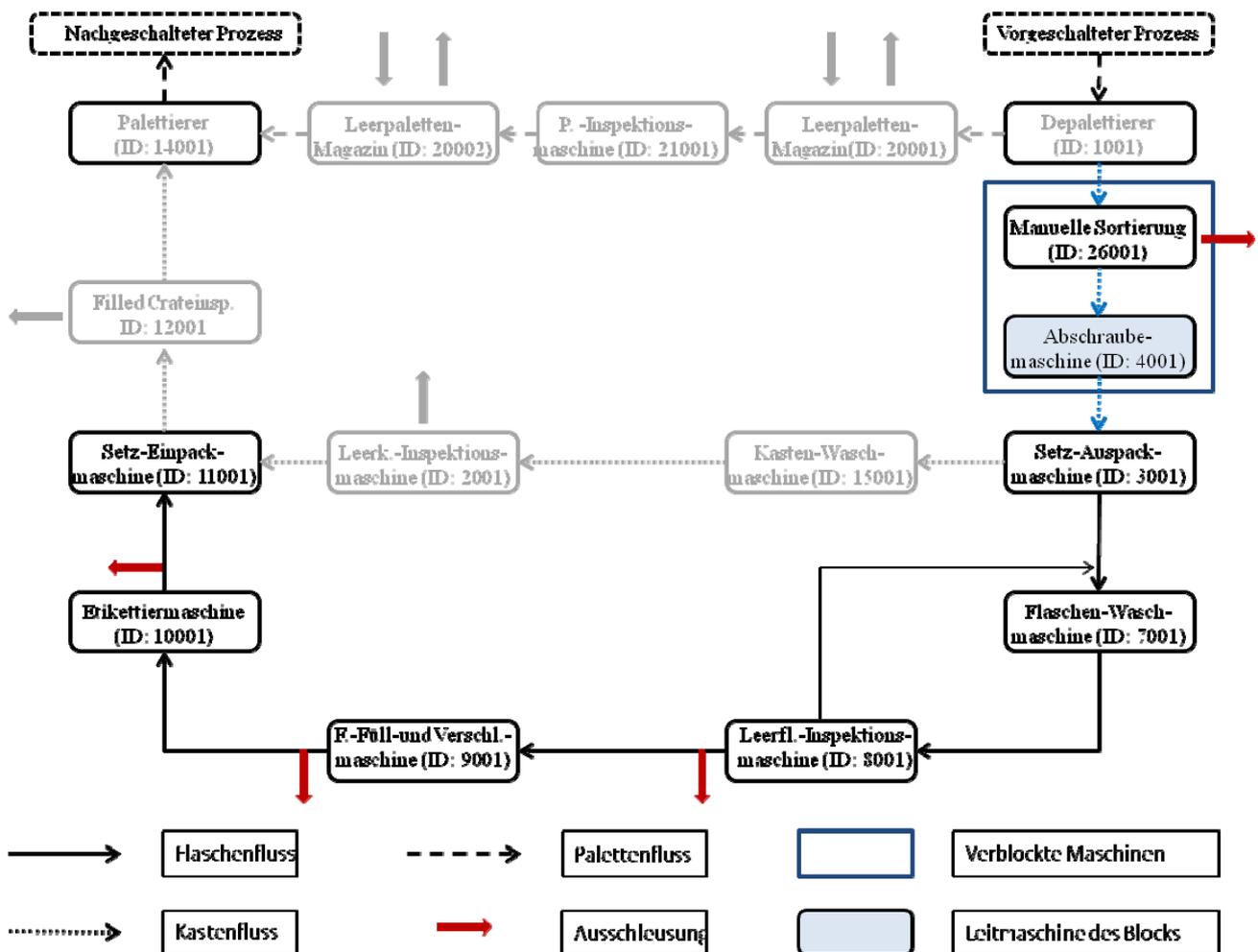


Bild 41: Anlagenschema der realen Anlage B

Bei der Anlage B handelt es sich um eine Abfülllinie für 0,5-l-NRW und -Ale Glas-Mehrwegflaschen mit einer Nennausbringung von 50.000 Flaschen. Auch hier verdeutlicht das Bild 41 den Aufbau und Objektfluss. Diese Anlage wurde praktisch vollständig nach den WS vorbereitet. Lediglich die hellgrau dargestellten Aggregate verfügen über keine Datener-

fassung nach diesen Standards. Anlage B repräsentiert damit eine nahezu fehlerfreie Datenbasis (Einschränkungen siehe 5.3).

Die Konfigurationstabellen, aus denen die Parameter der Anlage B hervorgehen (vgl. 4.2.1) sind in Anhang S enthalten.

3.5.2 Simulationsmodelle

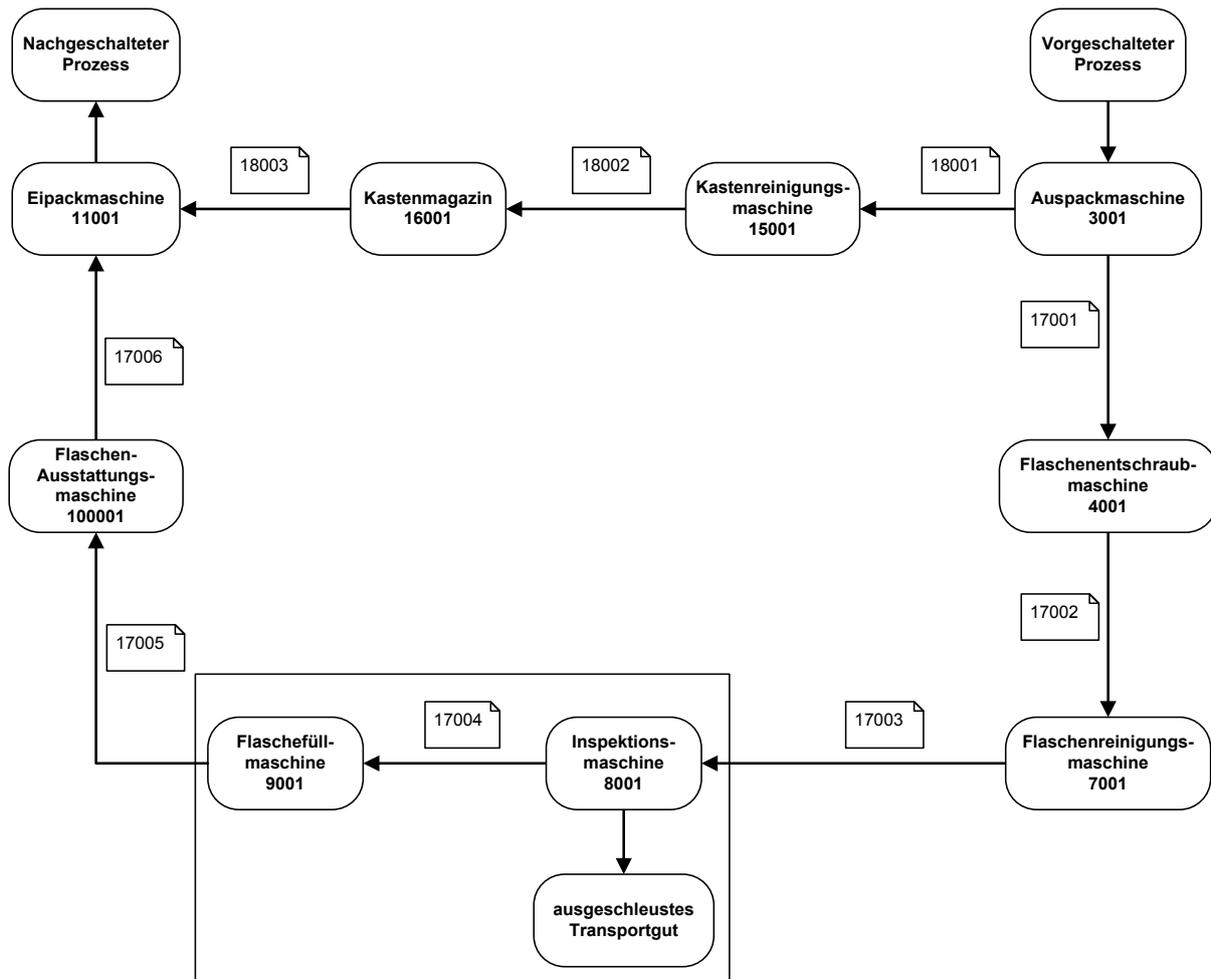


Bild 42: Anlagenschema des Simulationsmodells einer Getränkeabfüllanlage

Zusätzlich zu den realen Anlagen wurde am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (LVT) ein Simulationsmodell einer Getränkeabfüllanlage (Anlage C) erstellt. Das ereignisdiskrete Simulationsmodell wurde mit Hilfe der Software Plant Simulation der Firma Tecnomatix aus am LVT entwickelten und anhand realer Abfüllanlagen validierter Standardbausteinen erstellt, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll (vgl. z. B. [206]). Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass das Simulationsmodell das gleiche Verhalten zeigt wie die realen Vergleichsanlagen. Es handelt sich nicht um ein speziell auf die Problemstellung abgestimmtes sondern um ein generelles Verhaltensmodell für Getränkeabfüllanlagen, das in einer früheren Version auch schon von [300] zur Erprobung neuer Steuerungsstrategien für Getränkeabfüllanlagen genutzt wurde. Mit Hilfe der integrierten Datenbankschnittstelle kann die

Simulation alle geforderten Einträge für die unter 3.1.3 definierte Diagnosetabelle liefert. Da die Daten des Simulationsmodells zu 100% fehlerfrei sind, kann bei den Simulationsdaten von der optimalen Information ausgegangen werden. Sie eignen sich daher besonders gut zur Erprobung und Bewertung der entwickelten Methoden.

Eine schematische Darstellung des Simulationsmodells zeigt Bild 42. Die Konfigurationstabellen, aus denen die Parameter der Anlage C hervorgehen (vgl. 4.2.1) sind in Anhang S enthalten.

4. Ergebnisse der Modellierung und Algorithmisierung

4.1 Mathematisches Basismodell zur Stillstandsfortpflanzung

Wie in Kapitel 2.2 bereits dargelegt, existieren verschiedene mathematische Modellierungsansätze für Abfüll- und Verpackungsprozesse. Im vorliegenden Kapitel werden lediglich die mathematischen Zusammenhänge modelliert, die für die Zielsetzung der Arbeit und die ausgewählten Methoden von Interesse sind.

4.1.1 Einfache Störungen

Für die Diagnose von Lebensmittelverpackungsanlagen ist vor allem eine zeitliche Betrachtung der Stillstandsfortpflanzung von Interesse (vergleiche auch Bild 1 in Kapitel 1). Hierbei spielen folgende, in Kapitel 2.1.1 näher beschriebene Charakteristika der Maschinen und Transporteure eine Rolle:

- Speicherkapazität der Maschinen (konstant)
- Verhalten der Maschinen bei Stau oder Mangel: wird die Maschine bei einem kontrollierten Stopp leergefahren oder nicht
- Totzeit der Maschine: die Zeit, die eine Maschine für das Vollfahren benötigt
- Verzögerungszeiten für eine Stau- oder Mangelmeldung: teilweise existieren Verzögerungszeiten bei Belegung der den Stau oder Mangel identifizierenden Sensoren, um zu verhindern, dass kurzzeitige zufällige Belegungen eine Reaktion hervorrufen (konstant)
- Kapazität der Transporteure (konstant)
- Totzeit der Transporteure: die Zeit, die ein Objekt auf dem Transporteur benötigt, um von einer Maschine zu der nächsten Maschine zu gelangen

Für eine exakte Betrachtung der Stillstandsfortpflanzung spielt außerdem der Füllungsgrad der Transporteure eine Rolle. Er ist als Pufferfüllungsgrad f wie folgt definiert:

$$f = \frac{n_{zu} - n_{ab} + n_0 \pm n_{ext}}{n_{max}}$$

Formel 4.1

mit n_{zu} Anzahl der Objekte, die dem Transporteur zugeführt werden,
 n_{ab} Anzahl der Objekte, die von dem Transporteur abgeführt werden
 n_0 Anzahl der Objekte, die sich bereits auf dem Transporteur befunden haben
 n_{ext} Anzahl der Objekte, die auf dem Transporteur durch andere Ursachen als die verbundenen Maschinen entnommen (-) oder hinzugefügt (+) werden⁶
 n_{max} Anzahl der Objekte, die insgesamt vom Transporteur aufgenommen werden können; n_{max} entspricht somit der Kapazität des Transporteurs

weiterentwickelt nach [300]

⁶ Da n_{ext} im Allgemeinen sehr gering ist, wird es in den folgenden Formeln vernachlässigt

f stellt damit die anteilige Füllung des Transporteurs dar und legt fest, wie viele Objekte noch auf dem Transporteur zur Verfügung stehen bzw. wie viele Objekte noch Platz auf dem Transporteur haben.

Bei störungsfreiem Betrieb wird ein Objekt durch eine Maschine in der Zeit t_M bearbeitet:

$$t_M = \frac{K_M}{Q_{est}}$$

Formel 4.2

mit Q_{est} Einstellausbringung der Maschine
 K_M Kapazität der Maschine (max. Anzahl an Objekten in der Maschine)

Der Transport von einer Maschine zu einer anderen wird im störungsfreien Betrieb in der Totzeit des Transporteurs t_{tot} realisiert:

$$t_{tot} = \sum_{i=1}^n \frac{l_{Ti}}{v_{Ti}}$$

Formel 4.3

mit l_T Länge des Weges auf dem Transportabschnitt
 v_T Geschwindigkeit des Transportabschnitts

Dabei wird durch das Summenzeichen berücksichtigt, dass Transporteure im Allgemeinen aus n Abschnitten mit unterschiedlichen Abmessungen und Geschwindigkeiten bestehen. Hat der Transporteur zusätzlich eine Pufferfunktion, kann es passieren, dass sich ein Pulk von Objekten vor der abziehenden Maschine bildet. Die Transportzeit t_T verändert sich dadurch mit m Abschnitten unter dem Pulk zu:

$$t_T = t_{tot} - \sum_{i=1}^m \frac{l_{TPi}}{v_{Ti}} + \frac{n_p}{Q_{est}(M_{ab})}$$

Formel 4.4

mit l_{TP} Länge des Transportwegs unter dem Pulk
 n_p Anzahl der Objekte im Pulk
 M_{ab} Maschine, die dem Puffer/Transporteur nachgeschaltet ist
 M_{zu} Maschine, die dem Puffer/Transporteur vorgeschaltet ist

Dabei wird davon ausgegangen, dass die neu auf dem Pulk auftreffenden Objekte zeitlich nach den schon im Pulk befindlichen Flaschen verarbeitet werden. Damit berechnet sich n_p zu⁷:

⁷ Für eine bessere Übersichtlichkeit der Formeln wird die Multiplikation im weiteren Verlauf durch das Symbol * kenntlich gemacht.

$$n_p = f * K_p - Q_{est}(M_{zu}) * \left(\sum_{i=1}^n \frac{l_{Ti}}{v_{Ti}} - \sum_{i=1}^m \frac{l_{TPi}}{v_{Ti}} \right)$$

Formel 4.5

Tritt an einer Maschine eine Störung auf, so hängt es von der Störungsart und der Maschine ab, ob die Maschine noch leergefahren wird. Es wird im weiteren Verlauf der Arbeit angenommen, dass die Maschine nach dem Zeitpunkt der Störungsmeldung noch leergefahren wird, da dies bei dem Großteil der real auftretenden Fehler zutrifft. Ebenso verhält es sich bei Maschinen, die aufgrund eines Mangels an Objekten oder aufgrund eines Rückstaus von Objekten aus einem der Förderströme in einen Stillstand mit Mangel- oder Staumeldung wechseln. Hier werden die Meldungen auf der Basis von Sensorbelegungen (ggf. mit einer Verzögerungszeit des Sensors t_{VS} ⁸) ausgelöst. Das Leerfahren der Maschine benötigt dann noch eine Zeit t_{leer} :

$$t_{leer} = \frac{K_M}{Q_{est,leer}}$$

Formel 4.6

wobei angenommen wird, dass sich t_{leer} über eine konstante Einstellausbringung zum automatischen Leerfahren $Q_{est,leer}$ berechnet. Analoges gilt für die Zeit t_{voll} für das automatische Vollfahren der Maschine nach Beendigung des Stillstands mit der Einstellausbringung $Q_{est,voll}$:

$$t_{voll} = \frac{K_M}{Q_{est,voll}}$$

Formel 4.7

Folgt das Leer- oder Vollfahren einer Funktion der Anzahl der Objekte in der Maschine $f(n)$, so kann für die Berechnung der Zeit die mittlere Ausbringung $Q_{est,vleer,m}$ bzw. $Q_{est,voll,m}$ wie folgt berechnet und an Stelle der konstanten Einstellausbringungen in Formel 4.6 und Formel 4.7 eingesetzt werden:

$$Q_{est,voll/leer,m} = \frac{\int_0^{K_M} Q_{est} dn}{K_M}$$

Formel 4.8

Betrachtet man die Auswirkungen eines Maschinenstillstands auf die anderen Maschinen in der Anlage, so hängen diese im Wesentlichen davon ab, wie lange der Stillstand andauert und wie die Eigenschaften der Maschinen und der verbindenden Transporteure sind. Ein Stillstand der Maschine M hat dann keine direkte Auswirkung auf die nachfolgende Maschine $M+1$ (verbunden über Transporteur/Puffer $P+1$), solange er nicht länger als eine kritische Zeit $t_{krit, n}$ andauert:

⁸ Bei der Verzögerungszeit wird im weiteren Verlauf der Arbeit angenommen, dass sie sowohl bei der positiven als auch bei der negativen Flanke eines Sensorsignals abläuft und konstant ist. Bei einem anderen Verhalten muss dies durch entsprechend angepasste Verzögerungszeiten berücksichtigt werden.

$$t_{krit,n} = \frac{K_P(P+1) * f(P+1)}{Q_{est}(M+1)} + t_{VS} + t_{leer}(M+1) - t_{tot}(P+1) - t_{voll}(M+1)$$

Formel 4.9

mit K_P Kapazität des Transporteurs/Puffers (max. Anzahl an Objekten auf dem Transporteur/Puffer)

Für die dem Transporteur vorgeschaltete Maschine ergibt sich analog $t_{krit,v}$:

$$t_{krit,v} = \frac{K_P(P-1) * (1-f(P-1))}{Q_{est}(M-1)} + t_{VS} + t_{leer}(M-1) - t_{voll}(M-1)$$

Formel 4.10

Übersteigt die Stillstandsdauer eine dieser Zeiten, pflanzt sich der Stillstand entsprechend fort.

Es ist zu beachten, dass die Lage der Sensoren die Kapazitäten der Maschinen und Transporteure festlegt. Dies kann bei unterschiedlichen Sensoren zum Auslösen und zur Aufhebung eines Zustands unterschiedliche Kapazitäten bedingen. Aus Gründen der einfacheren Darstellung wird dies in den Formeln im weiteren Verlauf der Arbeit nicht explizit dargestellt, muss aber bei einer Umsetzung der Modelle in einen Algorithmus berücksichtigt werden.

Formel 4.2 - Formel 4.5 und Formel 4.9 - Formel 4.10 sind jedoch nur gültig, wenn von einem konstanten Wert der Einstellausbringungen und der Fördergeschwindigkeiten der Transporteure ausgegangen werden kann. Wie in Kapitel 2.1.2 dargelegt, werden Transporteure und Maschinen jedoch im Allgemeinen gesteuert.

Für die Betrachtung der Totzeit in Formel 4.3 ergibt sich daraus:

$$t_{tot} = \sum_{i=1}^n \int \frac{l_{Ti}}{v_{Ti}} dv_{Ti}$$

Formel 4.11

wobei v_T nach dem derzeitigen Stand der Technik eine von der Sensorbelegung des Transporteurs abhängige, diskrete Funktion des Füllungsgrads $f(f)$ ist. Jedoch sind, wie in 2.1.2 angedeutet, auch kontinuierliche Funktionen denkbar.

$$v_T = f(f)$$

Formel 4.12

Der Pufferfüllungsgrad selbst ändert sich nach Formel 4.1 über die Anzahl der zu- und abgeführten Behälter. Diese sind dabei wie folgt von den Ausbringungen der dem Puffer P vor- und nachgeschalteten Maschinen abhängig:

$$n_{zu} = \int Q_{est}(M_{zu}) dt$$

Formel 4.13

$$n_{ab} = \int Q_{est}(M_{ab}) dt$$

Formel 4.14

Mit Formel 4.1 und der Tatsache, dass n_{\max} und K_P einsetzungsgleich sind, ergibt sich daraus:

$$f = \frac{\int Q_{est}(M_{zu}) dt - \int Q_{est}(M_{ab}) dt - n_0}{K_P(P)}$$

Formel 4.15

Die Einstellausbringung Q_{est} wird in der Regel in Abhängigkeit vom Füllungsgrad der Transporteure bzw. Puffer gesteuert:

$$Q_{est} = f(f)$$

Formel 4.16

Nach derzeitigem Stand der Technik handelt es sich dabei um eine von der Sensorbelegung abhängige, diskrete Funktion (maschinenspezifisch). Jedoch sind auch hier kontinuierliche Funktionen denkbar.

Daraus ergibt sich für die Transportzeit nach Formel 4.4:

$$t_T = t_{tot} - \sum_{i=1}^m \int \int \frac{l_{TPi}}{v_{Ti}} dl_{TPi} dv_{Ti} + \frac{n_P}{\int Q_{est}(M_{ab}) dt}$$

Formel 4.17

mit:

$$n_P = \left(\int Q_{est}(M_{zu}) dt - \int Q_{est}(M_{ab}) dt - n_0 \right) - \frac{\int Q_{est}(M_{zu}) dt}{\int dt} \\ * \left(\sum_{i=1}^n \int \frac{l_{Ti}}{v_{Ti}} dv_{Ti} - \sum_{i=1}^n \int \int \frac{l_{TPi}}{v_{Ti}} dl_{TPi} dv_{Ti} \right)$$

Formel 4.18

wobei l_{TPi} eine Funktion ist, die von mehreren Parametern (Transporteur- bzw. Puffergeometrie, Geometrie der Objekte) sowie Variablen (Transportzeit bis zum Auftreffen auf den Pulk, Einstellausbringungen der beteiligten Maschinen) abhängt. Sie soll hier aufgrund der späteren Vereinfachungen nicht näher erörtert werden.

Formel 4.9 verändert sich damit zu:

$$t_{krit,n} = \frac{\int Q_{est}(M) dt - \int Q_{est}(M+1) dt - n_0}{\int Q_{est}(M+1) dt} + t_{VS} + t_{leer}(M+1) - t_{tot}(P+1) - t_{voll}(M+1)$$

Formel 4.19

und Formel 4.10 zu:

$$t_{krit,v} = \frac{K_P(P-1) - (\int Q_{est}(M-1) dt - \int Q_{est}(M) dt - n_0)}{\int Q_{est}(M-1) dt} + t_{VS} + t_{leer}(M-1) - t_{voll}(M-1)$$

Formel 4.20

Diese Überlegungen setzen voraus, dass die betrachtete Anlage nach dem in Kapitel 2.1 dargestellten Stand der Technik ausgelegt ist, was gewährleistet, dass im fehlerfreien Betrieb eine kontinuierliche und lückenlose Versorgung der Aggregate gesichert ist.

4.1.2 Störungen an parallelen Maschinen

Sind zu einer gestörten Maschine weitere Maschinen parallel angeordnet, so ändern sich die kritischen Zeiten, da die parallel arbeitenden Maschinen den Betrieb teilweise oder vollständig aufrecht erhalten können.

Eine schematische Darstellung n parallel arbeitender Maschinen bietet Bild 43.

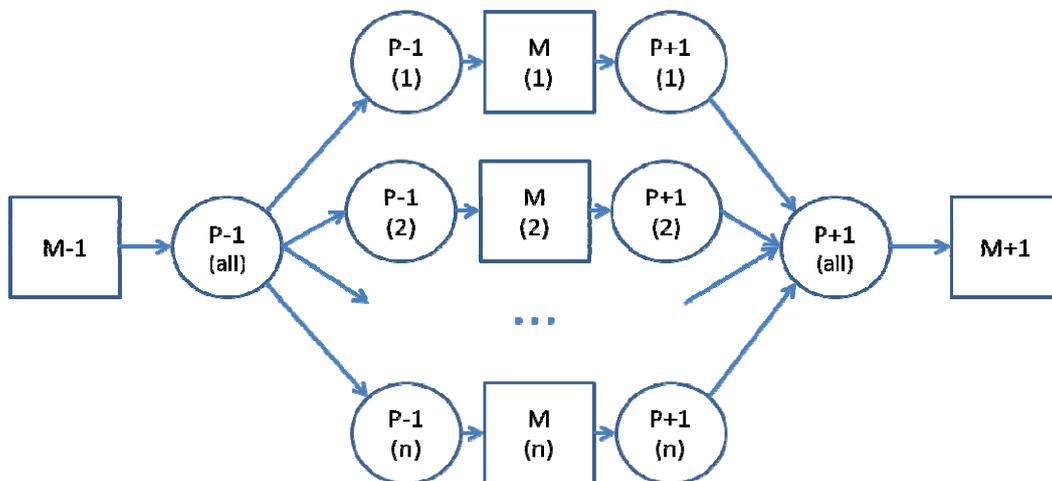


Bild 43: Parallele Maschinen M_1-M_n mit Puffern mit getrennten und gemeinsamen Abschnitten

Vor n parallelen Maschinen teilt sich der Transporteur/Puffer im Allgemeinen in n verschiedene Transportabschnitte, die die Objekte den einzelnen n parallelen Maschinen zuführen, auf. Diese verschiedenen Abschnitte verfügen über ihre eigenen n Kapazitäten K_P , die im Störfall der entsprechenden Maschine zusätzlich zu der Kapazität des gemeinsamen Abschnitts (unter Berücksichtigung der Füllungsgrade) zur Verfügung stehen. Analoges gilt für die den n parallelen Maschinen nachgeschalteten Transporteure/Puffer. Die getrennten n Transportabschnitte, die die Objekte der einzelnen Maschinen abführen, vereinigen sich wieder zu einem gemeinsamen Strom. Hierdurch stehen alle auf dem gemeinsamen Abschnitt sowie alle auf den n individuellen Transportabschnitten befindlichen Objekte (unter Berücksichtigung

sichtigung der Totzeiten) für die nachfolgende Maschine zur Verfügung. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass während des Stillstands einer parallelen Maschine die anderen $n - 1$ parallelen Maschinen weiterhin Objekte aus den vorgeschalteten Bereichen abziehen und sie den nachgeschalteten Bereichen zuführen.

Für das Fortpflanzen eines Stillstands an einer Maschine (M_1) von n parallelen Maschinen (M_i) auf die vorgeschaltete Maschine $M-1$ gilt daher (der Index „all“ steht für die gemeinsam genutzten Bereiche der Transporteure):

$$t_{krit,v,p} = \frac{(1 - f(P - 1)_{all}) * K_P(P - 1)_{all} + \sum_{i=1}^n ((1 - f(P - 1)_i) * K_P(P - 1)_i)}{Q_{est}(M - 1) - \sum_{i=2}^n Q_{est}(M_i)} + t_{VS} + t_{leer}(M - 1) - t_{voll}(M - 1)$$

$$\text{für } \sum_{i=2}^n Q_{est}(M_i) < Q_{est}(M - 1)$$

Formel 4.21

Für das Fortpflanzen des Stillstands auf die nachgeschaltete Maschine $M+1$ gilt:

$$t_{krit,n,p} = \frac{f(P + 1)_{all} * K_P(P + 1)_{all} + \sum_{i=1}^n f(P + 1)_i * K_P(P + 1)_i}{Q_{est}(M + 1) - \sum_{i=2}^n Q_{est}(M_i)} + t_{VS} + t_{leer}(M + 1) - t_{tot}(P + 1)_1 - t_{tot}(P + 1)_{all} - t_{voll}(M + 1)$$

$$\text{für } \sum_{i=2}^n Q_{est}(M_i) < Q_{est}(M + 1)$$

Formel 4.22

Unter Berücksichtigung variabler Einstellausbringungen ergibt sich aus Formel 4.21:

$$t_{krit,v,p} = \frac{\left(1 - \frac{\int Q_{est}(M - 1) dt - \sum_{i=1}^n \int Q_{est}(P - 1)_i dt - n_0}{K_P(P - 1)_{all}}\right) * K_P(P - 1)_{all}}{\frac{\int Q_{est}(M - 1) dt}{\int dt} - \sum_{i=2}^n \frac{\int Q_{est}(M_i) dt}{\int dt}} + \frac{\left(1 - \frac{\int Q_{est}(P - 1)_{all} dt - \sum_{i=1}^n \int Q_{est}(M)_i dt - n_0}{\sum_{i=1}^n K_P(P - 1)_i}\right) * \sum_{i=1}^n K_P(P - 1)_i}{\frac{\int Q_{est}(M - 1) dt}{\int dt} - \sum_{i=2}^n \frac{\int Q_{est}(M_i) dt}{\int dt}} + t_{VS} + t_{leer}(M - 1) - t_{voll}(M - 1)$$

$$\text{für } \sum_{i=2}^n Q_{est}(M_i) < Q_{est}(M - 1)$$

Formel 4.23

und aus Formel 4.22:

$t_{krit,n,p} =$

$$\frac{\sum_{i=1}^n \int Q_{est}(P+1)_i dt - \int Q_{est}(M+1) dt - n_0}{\frac{\int Q_{est}(M+1) dt}{\int dt} - \sum_{i=2}^n \frac{\int Q_{est}(M_i) dt}{\int dt}} + \frac{\sum_{i=1}^n \int Q_{est}(M_i) dt - \int Q_{est}(P+1)_{all} dt - n_0}{\frac{\int Q_{est}(M+1) dt}{\int dt} - \sum_{i=2}^n \frac{\int Q_{est}(M_i) dt}{\int dt}}$$

$$+ t_{VS} + t_{leer}(M+1) - t_{tot}(P+1)_1 - t_{tot}(P+1)_{all} - t_{voll}(M+1)$$

für $\sum_{i=2}^n Q_{est}(M_i) < Q_{est}(M+1)$

Formel 4.24

wobei die Einstellausbringung der Transporteure eine anlagentypische Funktion ist, die hier aufgrund der späteren Vereinfachungen nicht näher erörtert werden soll.

Ist die Summe der Einstellausbringungen der Maschinen M_2 bis M_n größer als die Einstellausbringung von $M-1$ bzw. $M+1$ wird der Ausfall der Maschine M_1 vollständig kompensiert.

Eine Kombination von Stillständen mehrerer Maschinen der gleichen Ebene ist analog zu berechnen.

Auch diese Betrachtungen setzen eine Auslegung nach dem Stand der Technik voraus, die sicherstellt, dass die Transporteure der parallelen Maschinen (M_2 bis M_n) die nachgeschaltete Maschine ($M+1$) lückenfrei versorgen.

4.1.3 Weitere Aspekte

In den bisherigen Formeln wird lediglich betrachtet, wie sich ein Stillstand nach fehlerfreiem Betrieb bei Anlagendesign nach Stand der Technik auswirkt. Jedoch können auch bei korrekter Anlagengestaltung Lücken im Objektfluss auftreten. Störungen, die nicht länger als t_{krit} sind, haben zwar keine direkte Auswirkung auf die angrenzenden Maschinen (vgl. 4.1.1 und 4.1.2), erzeugen jedoch Lücken auf dem nachgeschalteten Transporteur/Puffer, die durch die nachfolgenden Objekte geschlossen werden müssen. Arbeitet die Maschine länger als für das Schließen der Lücke benötigt wird, ergibt sich wieder ein kontinuierlicher Fluss. Geht die Maschine vor dem Schließen der ersten Lücke wieder in Stillstand, wird diese zwar noch geschlossen, bevor sie die nachgeschaltete Maschine erreicht, es entsteht jedoch eine neue Unterbrechung des Objektflusses. Für diese neue Lücke gelten wieder die gleichen Überlegungen wie für die erste, lediglich mit den aktuellen Variablen (f, Q_{est}, \dots).

Durch diese Überlegung wird deutlich, dass häufige, kurze Stillstände eines Aggregats zwar einen insgesamt störungsfreien Betrieb der Anlage möglich machen, die Transporteure mit Pufferfunktion jedoch praktisch zu ungepufferten Transporteuren degradieren können. Dadurch ist eine einfache Zuordnung eines Füllerstillstands zur letzten sich fortpflanzenden Ursache nicht immer zielführend. Es muss vielmehr festgelegt werden, ab welchem Füllungsgrad eine Verursachung anteilig dem Aggregat zuzurechnen ist, das den Füllungsgrad unter oder über einen gewissen Schwellenwert hat sinken oder steigen lassen. Wie aus Kapitel 2.1.1 ersichtlich, sind hier keine klaren Grenzen verfügbar. VOIGT schlägt jedoch in seiner Arbeit einen genetischen Algorithmus vor, mithilfe dessen die optimalen Pufferfüllungsgrade in ei-

ner gegebenen (simulierten) Anlage berechnet werden können [300]. Auf die anteilige Verursacherzuweisung an Stillständen wird bei den vorgestellten Diagnosemethoden näher eingegangen.

Ferner können Lücken dadurch entstehen, dass eine Anzahl Objekte $n_{\text{rejected_Objects}}(M)$ durch eine Maschine M aus der Linie ausgeschleust werden. Dabei werden nur in seltenen Fällen Lücken entstehen, die alleine ausreichend sind, um sich auf die nachfolgende Maschine auszuwirken. Die kritische Anzahl $n_{\text{krit}}(P+1)$ an Objekten, die auf einem Transporteur $P+1$ zwischen zwei Maschinen M und $M+1$ ausgeschleust werden kann, ohne dass sich dies auf $M+1$ auswirkt, berechnet sich zu:

$$n_{\text{krit}}(P+1) = \left(\int Q_{\text{est}}(M) dt - \int Q_{\text{est}}(M+1) dt - n_0 \right) - \sum_{i=1}^n \int \frac{l_{Ti}(P+1)}{v_{Ti}(P+1)} dv_{Ti} * \frac{\int Q_{\text{est}}(M) dt}{\int dt}$$

Formel 4.25

Jedoch ist auch bei einer kombinierten Lücke zu berücksichtigen, dass das Fortpflanzen dieser Lücke teilweise von den ausgeschleusten Objekten verursacht wird. Dabei ist die Ursache der Ausschleusung entscheiden dafür, welcher Maschine diese Lücken zuzurechnen sind. Nicht ausreichend gereinigte Objekte sind beispielsweise der Flaschen-Waschmaschine in der Linie anzulasten. Hierbei müsste jedoch auch noch unterschieden werden, ob die Verschmutzung überhaupt reinigbar war oder ob das Objekt so verschmutzt gewesen ist, dass eine Reinigung durch die Maschine gar nicht möglich war. In diesem Fall handelte es sich um eine anlage- bzw. maschinenfremde Störung, die anders zu behandeln wäre (vgl. Anhang A). Da diese Zuordnung eher einer Fehleridentifikation als einer Fehlerlokalisierung entspricht, wird sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Im Ausblick der Arbeit wird jedoch eine Erweiterung der Fehlerlokalisierung diskutiert.

Entsteht auf einem Transporteur eine Blockierung durch ein Verklemmen von Objekten oder externe Einflüsse oder ist ein Antrieb defekt, so müssen die Berechnungen aus 4.1.1 und 4.1.2 an die betroffenen Teilflächen und Füllungsgrade des Transporteurs/Puffers angepasst werden. Dazu muss die Lage der Blockierung oder des Antriebsfehlers bekannt sein, um die entsprechende Totzeit und die Kapazität des Abschnitts zu bestimmen. Dabei ist beim Antriebsfehler der entsprechende Abschnitt im Allgemeinen durch die Lage des defekten Antriebs bestimmbar. Bei der Blockierung stellt sich dies schwieriger dar. Hier müssten entsprechende (optische) Sensoren die Position der Blockierung detektieren. Zusätzlich ist für beide Fälle erforderlich, dass die genauen Füllungsgrade in den verschiedenen Abschnitten bekannt sind. Auch dies erfordert sehr genaue Beobachtungen der Pufferflächen. Die so theoretisch zu berechnenden Werte werden im Folgenden durch ein Sternchen gekennzeichnet (z. B.: $t_{\text{krit},n}^*$).

Wie aus den oben dargestellten Formeln hervorgeht, herrschen in Lebensmittelverpackungsanlagen komplexe Zusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen. Eine Lösung der Gleichungen wird sich daher an den verfügbaren Messgrößen aus der Anlage orientieren müssen. Hierbei sind sowohl vereinfachende Annahmen und Grenzwertbetrachtungen als auch zeitliche Diskretisierungen vorzunehmen. Die Diskretisierung wird sich hierbei häufig an den Aufzeichnungsintervallen der verfügbaren Anlagendaten orientieren.

4.2 Modelle und Algorithmen für die Diagnose von Abfüll- und Verpackungsanlagen

Aufbauend auf den im mathematischen Basismodell dargestellten, grundsätzlichen Zusammenhängen werden im Folgenden Modelle und Algorithmen entwickelt, die eine Fehlerlokalisierung in verketteten Lebensmittelverpackungsanlagen erlauben.

4.2.1 Erfahrungswissenbasierter Ansatz

In diesem Kapitel soll eine aus den in Kapitel 2.1 dargestellten Grundlagen und den mathematischen Zusammenhängen aus Kapitel 4.1 abgeleitete Regelbasis dargestellt werden. Zusätzlich wird ein Algorithmus zur Überprüfung der Regeln vorgestellt, bei dem es sich jedoch um eine konventionelle, nicht wissensbasierte Lösung handelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Regeln bei erfolgreicher Überprüfung in einem konventionellen Algorithmus auch als Wissensbasis in regelbasierten Systemen dienen können.

4.2.1.1 Anlagenunabhängige Regelbasis

Wie in Kapitel 2.3.2 erläutert, gibt es direkte Beziehungen zwischen einem regelbasierten Ansatz und einer Entscheidungsbaumlösung. Im Folgenden soll daher aufgrund der besseren Übersichtlichkeit eine graphische Darstellung der Regeln gewählt werden, die einem Entscheidungsbaum entspricht, wobei die generellen Beziehungen in Form eines gerichteten Graphen dargestellt sind und die Übergangsbedingungen an den Kanten stehen.

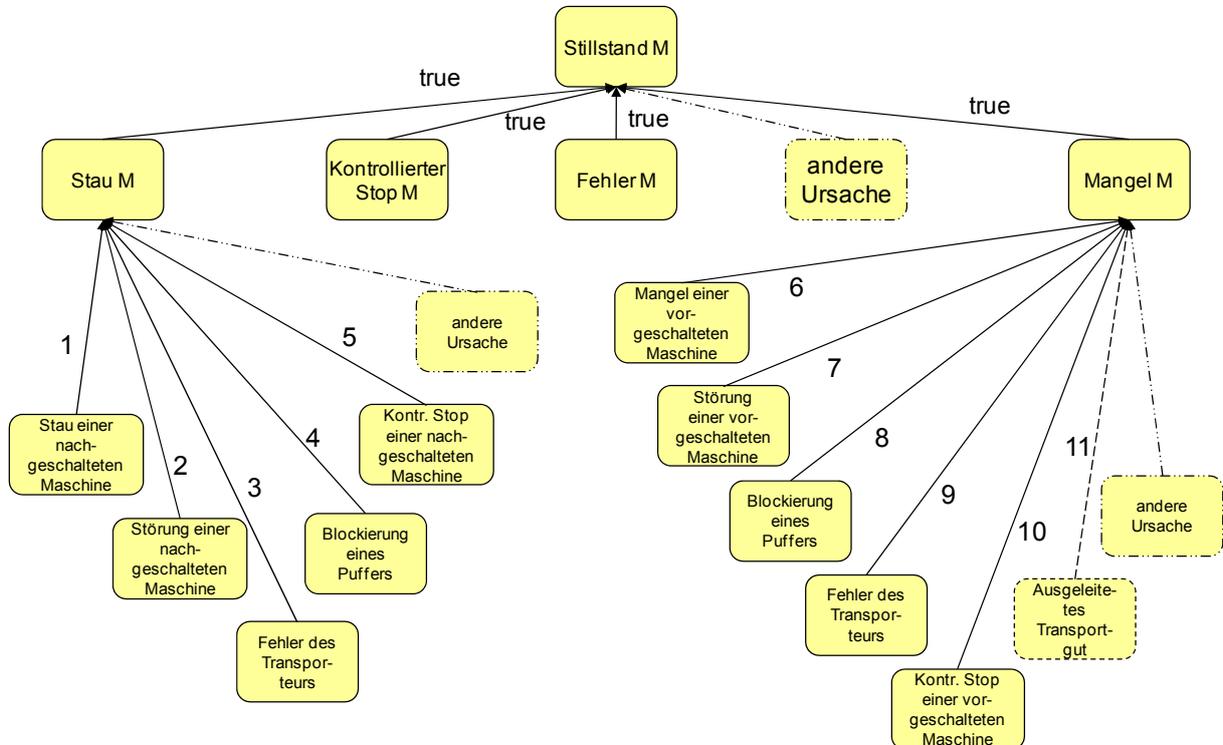


Bild 44: Grundsätzlicher Zusammenhang der Stillstandsfortpflanzung (zu Erläuterungen der Übergangsbedingungen an den Kanten siehe Tabelle 10)

Grundsätzlich lassen sich die Zusammenhänge zu jedem Zeitpunkt t dabei, wie in Bild 44 und Tabelle 10 beschrieben, exakt darstellen.

Hierbei stehen die vor- und nachgeschalteten Maschinen für sämtliche (auch parallelen) Maschinen im Haupt- und Nebenstrom. Die Bedingungen in Tabelle 10 sind dementsprechend auf die einzelnen Vor- und Nachfahren von M zu beziehen. Für jede dieser Maschinen kann dann erneut ein Baum wie in Bild 44 erzeugt werden.

Tabelle 10: Bedingungen zu Bild 44

Bedingungs- nr.	Bedingung (siehe auch Kapitel 3.5 und Anhang H) $t[\text{Zustand}(M)] = \text{Dauer des Zustands der Maschine } M$
1	If $t[\text{G_Tailback}(M+1)] > t_{\text{krit},v}$ bzw. $t_{\text{krit},v,p}$
2	If $t[\text{Failure}(M+1)] > t_{\text{krit},v}$ bzw. $t_{\text{krit},v,p}$
3	If $t[\text{Failure}(P+1)] > t_{\text{krit},v}^*$ bzw. $t_{\text{krit},v,p}^*$ ⁹
4	If $t[\text{Blockage}(P+1)] > t_{\text{krit},v}^*$ bzw. $t_{\text{krit},v,p}^*$
5	If $t[\text{C_No_Op}(M+1)] > t_{\text{krit},v}$ bzw. $t_{\text{krit},v,p}$
6	If $t[\text{G_Lack}(M-1)] > t_{\text{krit},n}$ bzw. $t_{\text{krit},n,p}$
7	If $t[\text{Failure}(M-1)] > t_{\text{krit},n}$ bzw. $t_{\text{krit},n,p}$
8	If $t[\text{Blockage}(P-1)] > t_{\text{krit},n}^*$ bzw. $t_{\text{krit},n,p}^*$
9	If $t[\text{Failure}(P-1)] > t_{\text{krit},n}^*$ bzw. $t_{\text{krit},n,p}^*$
10	If $t[\text{C_No_Op}(M-1)] > t_{\text{krit},n}$ bzw. $t_{\text{krit},n,p}$
11	If $n_{\text{rejected_Objects}}(M-1) > n_{\text{krit}}(P - 1)$

Diese allgemeine Betrachtung muss verändert werden, wenn es sich um die erste oder letzte Maschine in der Linie handelt. Bei der ersten Maschine in der Linie (z. B. ein Depalettier-Roboter) kann ein Mangel nur durch den vorgeschalteten Prozess (Vorgänger) ausgelöst werden, bei der letzten Maschine (z. B.: ein Palettier-Roboter) ein Stau nur durch den nachgeschalteten Prozess (Nachfolger). Die resultierenden Graphen zeigt Anhang M. Eine Erweiterung des Baums um zusätzlich identifizierte Probleme ist aufgrund der „*anderen Ursachen*“ jederzeit möglich.

Die dargestellte Herangehensweise von der Ursache zur Wirkung erfordert allerdings eine permanente Überwachung und Berechnung aller Variablen der einzelnen Formeln aus Kapitel 3.5. Dies ist jedoch sehr aufwendig und häufig, gerade bei den Pufferfüllungsgraden (vor allem in Bezug auf Blockierungen o. ä.), technisch bisher nicht realisierbar.

Sinnvoller ist daher, eine post-mortem-Analyse in Form einer Rückwärtsbetrachtung, die von der Wurzel ausgehend die einzelnen Wege zu den Blättern des Graphen betrachtet, durchzuführen. Daraus ergibt sich der in Bild 45 dargestellte Baum mit den in Tabelle 11 aufgeführten

⁹ Für die Bedeutung von $t_{\text{krit},v}^*$ bzw. $t_{\text{krit},v,p}^*$ und $t_{\text{krit},n}^*$ bzw. $t_{\text{krit},n,p}^*$ siehe Kapitel 4.1.3

ten, dazu gehörenden Bedingungen¹⁰. Auch dieser Baum stellt eine iterativ erweiterbare Regelbasis dar (die Blätter sind gegebenenfalls wieder Wurzeln neuer Bäume). Wie oben schon angedeutet, ergeben sich für die letzte und erste Maschine leicht abweichende Bäume (vgl. Anhang M). Da das Prinzip jedoch gleich bleibt, soll hierauf nicht gesondert eingegangen werden.

In Tabelle 11 wird davon ausgegangen, dass sich sämtliche Zeiten exakt bestimmen lassen oder ohne Verzögerungen usw. in der Datenbank erscheinen. Dies ist in der Realität jedoch nur mit gewissen statistischen Schwankungen möglich. Daher sind bei einer technischen Umsetzung sämtliche Zeiten um einen Sicherheitsfaktor S_F zu erweitern, der beispielsweise aus den Schwankungsbreiten der gemessenen Totzeiten etc. abgeleitet werden kann (siehe 4.2.1.6).

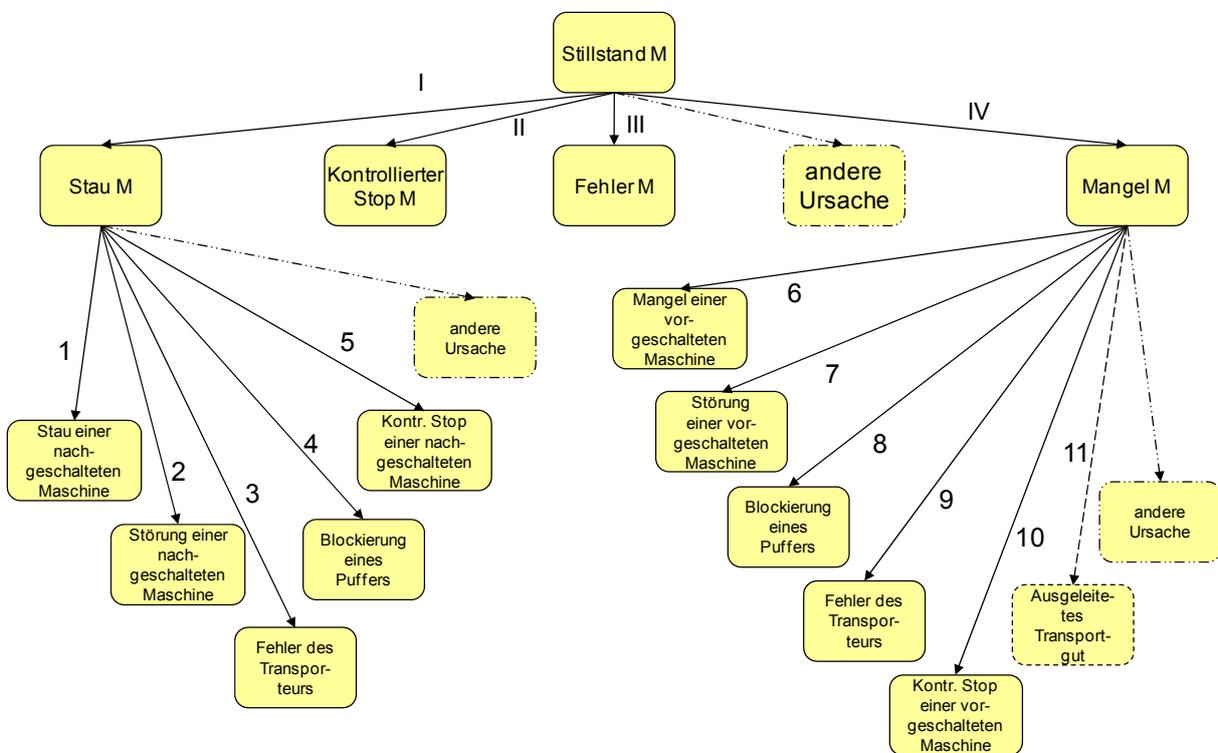


Bild 45: Entscheidungsbaum zur Ursachensuche für einen Stillstand

4.2.1.2 Erweiterung für die Bewertung mehrerer Verursacher

Die anhand dieser Regeln durchführbare Diagnose liefert den zeitlich letzten Verursacher für einen Stillstand an M. Für eine sinnvolle Bewertung und Optimierung einer Lebensmittelverpackungsanlage ist jedoch nicht nur der letzte Grund für den Stillstand des Zentralaggregats der Anlage entscheidend, sondern auch die Kombination der Fehler, die dazu führen konnte.

¹⁰ Es wird angenommen, dass eine Maschine erst leer läuft, nachdem sie Mangel, Stau usw. angezeigt hat (bei taktweise arbeitenden Maschinen ist die Leerlaufzeit = Null). Dies gilt auch für das Verhalten bei einem Fehler, da in der Realität nur selten Fehler auftreten, bei denen die Maschine nicht leerlaufen kann. Ebenso wird angenommen, dass die Maschine schon Betrieb anzeigt, wenn sie beginnt vollzufahren. Ein anderes Verhalten der Maschinen muss bei den Zeiten berücksichtigt werden.

Tabelle 11: Bedingungen zu Bild 45

Bedin- gungsnr.	Bedingung (siehe auch Kapitel 3.5 und Anhang H) $t_{\text{start/Ende}}(\text{Zustand}(M)) = \text{Start-/Endzeitpunkt des Zustands der Maschine } M$ Zustand(M) @ t = der Zustand der Maschine M zum Zeitpunkt t Zustand(M) @ (t ₁ , t ₂) = der Zustand der Maschine M in der Zeitspanne t ₁ bis t ₂
I	If G_Tailback(M) = true
II	If C_No_Op(M) = true
III	If Failure(M) = true
IV	If G_Lack(M) = true
1	If $t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M+1)) < t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))$ $\wedge t_{\text{ende}}(\text{G_Tailback}(M+1)) > t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))$
2	If $t_{\text{start}}(\text{Failure}(M+1)) < t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))$ $\wedge t_{\text{ende}}(\text{Failure}(M+1)) > t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))$
3	If $t_{\text{start}}(\text{Failure}(P+1)) < t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))$ $\wedge t_{\text{ende}}(\text{Failure}(P+1)) > t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))$
4	If $(\text{G_Lack}(M+1) @ (t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M)), (t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M)) + \int_0^{K_P} Q_{\text{est}}(M + 1) df / K_P(P + 1)) \wedge (\neg \text{Failure}(P+1) @ t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))) = \text{true}^{11}$
5	If $t_{\text{start}}(\text{C_No_Op}(M+1)) < t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))$ $\wedge t_{\text{ende}}(\text{C_No_Op}(M+1)) > t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))$
6	If $t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M-1)) < t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) - t_{\text{tot}}(P-1) - t_{\text{voll}}(M-1)$ $\wedge t_{\text{ende}}(\text{G_Lack}(M-1)) > t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) - t_{\text{tot}}(P-1) - t_{\text{voll}}(M-1)$
7	If $t_{\text{start}}(\text{Failure}(M-1)) < t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) - t_{\text{tot}}(P-1) - t_{\text{voll}}(M-1)$ $\wedge t_{\text{ende}}(\text{Failure}(M-1)) > t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) - t_{\text{tot}}(P-1) - t_{\text{voll}}(M-1)$
8	If $\text{G_Tailback}(M-1) @ (t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)), (t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) + \int_0^{K_P} Q_{\text{est}}(M - 1) df / K_P(P - 1)) \wedge \neg(\text{Failure}(P-1) @ t_{\text{start}}(\text{G_Tailback}(M))) = \text{true}^{11}$
9	If $t_{\text{start}}(\text{Failure}(P-1)) < t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) - t_{\text{tot}}(X) \wedge t_{\text{ende}}(\text{Failure}(P-1)) > t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) - t_{\text{tot}}(X)$, wobei X der Teil des Transporteurs hinter dem fehlerhaften Motor ist
10	If $t_{\text{start}}(\text{C_No_Op}(M-1)) < t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) - t_{\text{tot}}(P-1) - t_{\text{voll}}(M-1)$ $\wedge t_{\text{ende}}(\text{C_No_Op}(M-1)) > t_{\text{start}}(\text{G_Lack}(M)) - t_{\text{tot}}(P-1) - t_{\text{voll}}(M-1)$
11	If $\int_{G_Lack-t_{\text{tot}}}^{G_Lack} n_{\text{rejected_objects}}(M - 1) dt > \int_{G_Lack-t_{\text{tot}}}^{G_Lack} Q_{\text{est}}(M - 1) dt - \int_{G_Lack-t_{\text{tot}}}^{G_Lack} Q_{\text{est}}(M) dt^{12}$

¹¹ Dabei ist $Q_{\text{est}}(M)$ eine Funktion des Pufferfüllungsgrads f in den Grenzen 0 bis K_P (vgl. Kapitel 3.5)

¹² Hierbei wird angenommen, dass die Ausschleusung direkt hinter der Maschine erfolgt. Ausgeschleuste Objekte werden in der Realität selten alleine für einen Stillstand verantwortlich sein (siehe unten und Kapitel 4.1.3).

So muss neben der Identifikation des Stillstandsauslösers z. B. auch festgestellt werden, ob andere Ursachen dazu geführt haben, dass Puffer außerhalb ihrer bei fehlerfreiem Betrieb vorgesehenen, normalen Füllungsgrade lagen und daher die Störung des Auslösers nicht abgepuffert werden konnte.

Das ist immer dann der Fall, wenn vorhergehende Störungen in der Linie den Puffer gefüllt oder geleert haben und die Anlagensteuerung dies noch nicht wieder ausgeglichen hat (vgl. Kapitel 2.1.2.2). Die Puffer sind dadurch - über das durch die Steuerung bedingte „Atmen“ im störungsfreien Betrieb hinaus - aus dem Gleichgewicht gebracht.

Um diesen Fall zu berücksichtigen, müssen die einzelnen Stillstände entlang ihrer Fortpflanzungskette überprüft werden. Dazu wird Schritt für Schritt berechnet, ob die Stillstandsdauer an einer jeden Maschine in der Kette alleine ausgereicht hätte, um sich auf die jeweils nächste Maschine auszuwirken, wenn der Pufferfüllungsgrad auf dem verbindenden Transporteur im Normalbereich gelegen hätte.

Dazu wird in den Formeln für $t_{krit,n}$ und $t_{krit,v}$ aus 4.1 der variable Pufferfüllungsgrad f durch den konstanten, normalen Füllungsgrad f_n ersetzt. Dies bedeutet, dass $t_{krit,n/v}$ im Folgenden nicht der aktuellen Zeit entspricht, die eine Störung noch dauern kann, bis sie sich auf die angrenzenden Maschinen auswirkt, sondern einer konstanten kritischen Zeit, die bei konstantem normalem Füllungsgrad f_n zur Verfügung stünde. Zusätzlich wird das gleiche Verhalten der Maschinen wie in Kapitel 4.2.1.1 vorausgesetzt, was sich auf die Zeiten für das Voll-, Leerfahren usw. in den Formeln auswirkt.

Für eine Überprüfung eines Mangels oder Fehlers mit der Dauer $t[Downtime_0(M)]$, der zu einem Stillstand durch Mangel an der folgenden Maschine ($M+1$) führte, ergibt sich dann beispielsweise die Regel (andere Fälle sind analog zu behandeln, z. B. Stau mit $t_{krit,v}$ usw.)¹³:

$$\text{If } t[Downtime_0(M)] \geq (t_{krit,n})_0 \text{ then Ursachenanteil}(Downtime_0(M)) = 100\%$$

Regel 4.1

mit

$$(t_{krit,n})_0 = \frac{K_P(P+1) * f_n(P+1)}{\frac{\int_{t_{start}(Downtime_0(M))}^{t_{min}(M_0/M+1)} Q_{est}(M+1) dt}{t_{min}(M_0/M+1) - t_{start}(Downtime_0(M))}} - t_{tot}(P+1) - t_{voll}(M)$$

Formel 4.26

mit

$$t_{min}(M_i/M+1) = \min(t_{ende}(Downtime_i(M)), t_{start}(Downtime(M+1)))$$

$$\text{für } t_{start}(Downtime(M+1)) > t_{start}(Downtime_i(M))$$

Formel 4.27

¹³ Die Indizierung in den folgenden Formeln bezieht sich auf die zeitliche Reihenfolge der Stillstände und der damit verbundenen Werte

Gilt hingegen $t[\text{Downtime}_0(M)] < (t_{krit,n})_0$, bedeutet dies, dass der Transporteur/Puffer zwischen den Maschinen nicht $\geq f_n$ gefüllt war. Es muss somit ein früherer Stillstand in der Linie dazu geführt haben, dass der Transporteur unter seinen normalen Füllungsgrad entleert wurde. Daher muss zusätzlich ein weiterer Stillstand $\text{Downtime}_{-1}(M)$ betrachtet werden, der zeitlich vor $\text{Downtime}_0(M)$ lag. Dabei muss die über f_n berechnete theoretische Anzahl an Objekten auf dem Transporteur jedoch reduziert werden, damit der Einfluss der Stillstandszeit $\text{Downtime}_0(M)$ weiterhin berücksichtigt wird. Es werden daher die Objekte von der theoretischen Anzahl $f_n(P+1) * K_p(P+1)$ abgezogen, die in der Zeit von Beginn der Stillstandszeit $\text{Downtime}_0(M)$ bis zur Auslösung des Mangels an $M+1$ real durch $M+1$ vom Transporteur abgezogen wurden. Ging M wieder in Betrieb bevor $M+1$ in Mangel war, müssen die Objekte, die während der gesamten $\text{Downtime}_0(M)$ durch $M+1$ verarbeitet wurden, abgezogen werden. Hieraus berechnet sich ein neues $t_{krit,n}$. Die Betriebszeit zwischen den beiden Stillständen bleibt hingegen unberücksichtigt, da diese sich direkt auf den wirklichen Füllungsgrad des Puffers und damit auf das Ergebnis des Vergleichs von $t[\text{Downtime}_0(M)]$ mit dem mit f_n gebildeten $(t_{krit,n})_0$ auswirkt.

If $t[\text{Downtime}_{-1}(M)] \geq (t_{krit,n})_{-1}$

then $\text{Ursachenanteil}(\text{Downtime}_0(M)) = \frac{\int_{t_{start}(\text{Downtime}_0(M))}^{t_{min}(M_0/M+1)} Q_{est}(M+1) dt}{K_p(P+1) * f_n(P+1) - x}$

then $\text{Ursachenanteil}(\text{Downtime}_{-1}(M)) = 1 - \text{Ursachenanteil}(\text{Downtime}_0(M))$ ¹⁴

Regel 4.2

mit

$$(t_{krit,n})_{-1} = \frac{K_p(P+1) * f_n(P+1) - \int_{t_{start}(\text{Downtime}_0(M))}^{t_{min}(M_0/M+1)} Q_{est}(M+1) dt}{\frac{\int_{t_{start}(\text{Downtime}_{-1}(M))}^{t_{min}(M_{-1}/M+1)} Q_{est}(M+1) dt}{t_{min}(M_{-1}/M+1) - t_{start}(\text{Downtime}_{-1}(M))} - t_{tot}(P+1) - t_{voll}(M)}$$

Formel 4.28

wobei x die Anzahl der Objekte bezeichnet, die für einen lückenlosen Transport benötigt werden (lässt sich aus der Länge der Transportabschnitte und den Objektabmessungen sowie der für das Vollfahren von $M+1$ benötigten Anzahl an Objekten berechnen).

Reicht auch dieser Stillstand nicht aus, so ist die gleiche Vorgehensweise für k zeitlich vor $\text{Downtime}_0(M)$ liegende Stillstände bis zum Erreichen der oben dargestellten Bedingung anzuwenden.

¹⁴ Die zwei Konklusionen entsprechen einer verkürzte Darstellung der Regeln

If $t[\text{Downtime}_{-k}(M)] \geq (t_{krit,n})_{-k}$

$$\text{then Ursachenanteil}(\text{Downtime}_0(M)) = \frac{\int_{t_{start}(\text{Downtime}_0(M))}^{t_{min}(M_0/M+1)} Q_{est}(M+1) dt}{K_P(P+1) * f_n(P+1) - x}$$

$$\text{then Ursachenanteil}(\text{Downtime}_{i=-1\dots-k+1}(M)) = \frac{\int_{t_{start}(\text{Downtime}_i(M))}^{t_{min}(M_i/M+1)} Q_{est}(M+1) dt}{K_P(P+1) * f_n(P+1) - x}$$

$$\text{then Ursachenanteil}(\text{Downtime}_{-k}(M)) = 1 - \sum_{i=-k+1}^0 \text{Ursachenanteil}(\text{Downtime}_i(M))$$

Regel 4.3

mit

$$(t_{krit,n})_{-k} = \frac{K_P(P+1) * f_n(P+1) - \sum_{i=-k+1}^0 \int_{t_{start}(\text{Downtime}_i(M))}^{t_{min}(M_i/M+1)} Q_{est}(M+1) dt}{\frac{\int_{t_{start}(\text{Downtime}_{-k}(M))}^{t_{min}(M_{-k}/M+1)} Q_{est}(M+1) dt}{t_{min}(M_{-k}/M+1) - t_{start}(\text{Downtime}_{-k}(M))} - t_{tot}(P+1) - t_{voll}(M)}$$

Formel 4.29

Dabei ist jeder der k Stillstände entlang der Fortpflanzungskette in gleicher Weise bis zu dem/den Verursacher/n zurückzuverfolgen. Dies lässt sich (auch analog für die anderen Fälle) einfach in iterativ anwendbare Regeln überführen.

Sind in der Anlage parallele Maschinen mit gleicher Funktion enthalten (bzw. Maschinen, die gemeinsame Transporteurabschnitte nutzen), wird die Berechnung komplexer (vgl. auch Kapitel 4.1.2 und Bild 43). Betrachtet man den Transporteur hinter n parallelen Maschinen, von denen sich eine Maschine M_x im Stillstand befindet, so muss bei der Berechnung der Zeiten sowohl die Menge der Objekte, die das folgende Aggregat abgeführten hat, als auch die Menge, die die n-1 parallelen Maschinen M_i zugeführten haben, berücksichtigt werden. Bei der Betrachtung des Transporteurs vor den parallelen Maschinen müssen neben den durch das vorherige Aggregat zugeführten auch die durch die n-1 parallelen Maschinen M_i abgeführten Objekte mit in die Berechnung einfließen. Hierdurch ergibt sich für die Maschine M_x und ihre n-1 parallelen Maschinen M_i , wenn lediglich M_x in der betrachteten Zeit einen Stillstand hat¹⁵:

If $t[\text{Downtime}_0(M_x)] \geq (t_{krit,n,p})_0 \wedge \text{Operating}(M_i) @ (t_{krit,n,p})_0$

then Ursachenanteil}(\text{Downtime}_0(M_x)) = 100 %

Regel 4.4

¹⁵ Es werden im Folgenden keine temporallogischen Formulierungen sondern die in Tabelle 10 und Tabelle 11 definierten Ausdrücke für zeitliche Bezüge verwendet.

mit

$$(t_{krit,n,p})_0 = \frac{f_n(P+1)_{all} * K_P(P+1)_{all} + \sum_{i=1}^n f_n(P+1)_i * K_P(P+1)_i}{\frac{\int Q_{est}(M+1)dt}{\int dt} - \sum_{i=1}^n \frac{\int Q_{est}(M_i)dt}{\int dt}} - t_{tot}(P+1)_x - t_{tot}(P+1)_{all} - t_{voll}(M_x)$$

Formel 4.30

Auf das Einfügen der Grenzen der Integrale wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle verzichtet. Sie sind analog zu den in Formel 4.26 bis Formel 4.29 zu definieren.

Gilt der erste Teil der Bedingung aus Regel 4.4 nicht, so muss nach weiteren Stillständen gesucht werden. Dabei wird der Stillstand der n parallelen Maschinen gewählt, dessen Ende dem $t_{start}(Downtime_0(M_x))$ zeitlich am nächsten liegt. Hierbei kann es sich um einen Stillstand aller n Maschinen handeln. Die Berechnung der Bedingung und der Ursachenanteile erfolgt dabei analog zu der oben dargestellten Vorgehensweise bei nicht parallelen Maschinen.

Komplizierter wird die Berechnung, wenn der zweite Teil der Bedingung aus Regel 4.4 für einen der Stillstände nicht gültig ist. In diesem Fall befinden sich während der Zeit des k-ten Stillstands der aktuell betrachteten Maschine M_x auch eine oder mehrere der n-1 parallelen Maschinen M_i im Stillstand. Dies muss beim Errechnen des Ursachenanteils berücksichtigt werden. Hierfür muss zunächst berechnet werden, wie lange das theoretische $(t_{krit,n/p})_{Rest}$ nach den bisher berechneten Anteilen noch ist. Dies erfolgt durch folgende Formel:

$$(t_{krit,n,p})_{Rest} = \frac{n_{Rest}}{\frac{\int_{t_{min}(M_x-k/M-1)}^{t_{min}(M_x-k/M-1)} Q_{est}(M+1)dt}{(t_{krit,n,p})_{Rest}} - \sum_{i=1}^n \frac{\int_{t_{min}(M_x-k/M-1)}^{t_{min}(M_x-k/M-1)} Q_{est}(M_i)dt}{(t_{krit,n,p})_{Rest}}} - t_{tot}(P+1)_x - t_{tot}(P+1)_{all} - t_{voll}(M_x)$$

Formel 4.31

wobei

$$n_{Rest} = f_n(P+1)_{all} * K_P(P+1)_{all} + \sum_{i=1}^n f_n(P+1)_i * K_P(P+1)_i - \sum_{i=-k+1}^1 \int_{t_{start}(Downtime_i(M))}^{t_{min}(M_{xi}/M+1)} Q_{est}(M+1) dt + \sum_{i=-k+1}^1 \left(\sum_{j=1}^n \int_{t_{start}(Downtime_i(M))}^{t_{min}(M_{xi}/M+1)} Q_{est}(M_j) dt \right)$$

Formel 4.32

Die Lösung dieser Gleichung kann dabei nur iterativ erfolgen. Mit dem so berechneten Wert werden dann ebenfalls iterativ die Anteile der einzelnen Stillstandszeiten bestimmt. Die Vorgehensweise lässt sich an Bild 46 verdeutlichen:

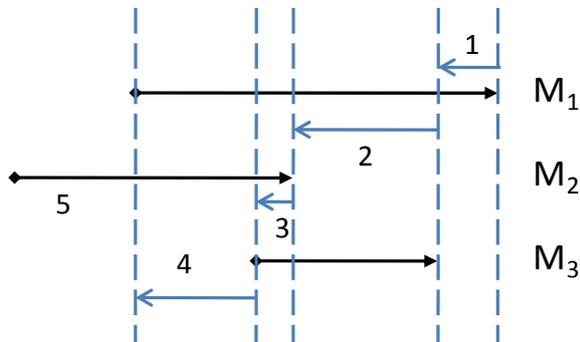


Bild 46: Berechnung der Anteile bei parallelen Stillständen, $n=2, m=4$

Die betrachtete Stillstandszeit $Downtime_k(M_x)$ wird in verschiedene Bereiche eingeteilt, wobei die Anfangs- und Endzeiten der Stillstände der zu M_x (in Bild 46 ist dies die Maschine M_1) parallelen Maschinen M_i (im ersten Schritt M_2 und M_3) die Bereichsgrenzen definieren¹⁶. Dies teilt den k -ten Stillstand in m logische Abschnitte Bereich₁ bis Bereich _{m} ein, in denen die n Maschinen jeweils einen definierten Zustand besitzen. Damit werden die Anteile der Maschinen an der Stillstandsverursachung iterativ berechnet.

Dabei wird zunächst der Anteil bestimmt, bei dem lediglich M_x einen Stillstand hat (in Bild 46 Bereich 1 für M_1).

$$Anteil_1(M_x) = Anteil_1(gesamt) = \frac{t[Bereich_1]}{(t_{krit,n,p})_{Rest}}$$

Formel 4.33

mit

$$t[Bereich_1] = t_{ende}(Downtime_{-k-1}(M_i)) - t_{ende}(Downtime_{-k}(M_x))$$

mit

$$Bereich_1 = Downtime(M_x) \wedge Operating(M_i)$$

Formel 4.34

Ist der Anteil größer als 1, ist der Ursachenanteil von $M_x = 100\%$ und von allen anderen Maschinen $M_i = 0$. Ist dies nicht der Fall, so müssen die nächsten $m-1$ Abschnitte untersucht werden, in denen sich Stillstandszeiten der n parallelen Maschinen überschneiden (in Bild 46 die Bereiche 2-4). Die Anteile berechnen sich für jeden der $m-1$ Schritte über die Hilfsgröße $Anteil_m(gesamt)$ wie folgt:

$$Anteil_m(gesamt) = \frac{t[Bereich_m]}{(t_{krit,n,p})_{Rest}} * n_{M_{Down}} @ t[Bereich_m]$$

Formel 4.35

mit

¹⁶ Für den Fall, dass schon bei der initialen Suche nach dem letzten Versursacher mehrere parallele Maschinen M_i als Verursacher identifiziert werden, wird unter M_x die Maschine mit der kürzesten Dauer $t_{start}(Downtime(M_i))$ bis $t_{min}(M_x/M+1)$ verstanden.

$$t[\text{Bereich}_m] = t_{\text{ende}}(\text{Bereich}_m) - t_{\text{start}}(\text{Bereich}_m) = \\ (t_{\text{start}}(\text{Bereich}_{m-1})) - \max(t_{\text{start}}(\text{Downtime}_{\leq-k}(M_{1\dots n})), t_{\text{ende}}(\text{Downtime}_{\leq-k}(M_{1\dots n})))$$

mit

$$t_{\text{start}}(\text{Downtime}_{\leq-k}(M_{1\dots n})) \wedge t_{\text{ende}}(\text{Downtime}_{\leq-k}(M_{1\dots n})) < t_{\text{start}}(t(\text{Bereich}_{m-1}))$$

Formel 4.36

wobei Bereich_m eine Konjunktion der Zustände aller n Maschinen in einer bestimmten Zeitspanne ist (vgl. Bereich_1 in Formel 4.34) und $n_{\mathbf{M}_{\text{Down}}}$ die Anzahl der n parallelen Maschinen bezeichnet, die sich im Stillstand befinden.

Für jeden der m Schritte wird überprüft, ob die Summe der bisherigen Anteile ≥ 1 ist. Ist dies der Fall, so berechnen sich die einzelnen Anteile der Maschinen \mathbf{M}_{Down} , die zur Zeitspanne $t[\text{Bereich}_m]$ im Stillstand sind, für den Schritt m zu:

$$\text{Anteil}_m(M_n) = \frac{1 - (\sum_{i=1}^{m-1} \text{Anteil}_i(\text{gesamt}))}{n_{\mathbf{M}_{\text{Down}}} @ t[\text{Bereich}_m]}, \quad M_n \in \mathbf{M}_{\text{Down}}$$

Formel 4.37

Ist auch für den Schritt m die Summe der bisherigen Anteile < 1 , so berechnen sich die einzelnen Anteile zu:

$$\text{Anteil}_m(M_n) = \frac{\frac{\text{Anteil}_m(\text{gesamt})}{(t_{\text{krit},n,p})_{\text{Rest}}}}{n_{\mathbf{M}_{\text{Down}}} @ t[\text{Bereich}_m]}, \quad M_n \in \mathbf{M}_{\text{Down}}$$

Formel 4.38

Für die Anteile der parallelen Maschinen, die nicht zu \mathbf{M}_{Down} gehören, gilt:

$$\text{Anteil}_m(M_n) = 0, \quad M_n \notin \mathbf{M}_{\text{Down}}$$

Formel 4.39

Um die Gesamtanteile der einzelnen parallelen Maschinen zu berechnen, müssen dann lediglich noch die Summen der einzelnen m Stufen berechnet werden.

$$\text{Ursachenanteil}(M_n) = \sum_{i=1}^m \text{Anteil}_i(M_n)$$

Formel 4.40

Diese Gleichungen lassen sich einfach in iterativ anwendbare Regeln überführen (siehe oben).

In gleicher Weise lässt sich auch der Anteil an der Stillstandsverursachung durch ausgeschleuste Objekte berechnen. Die Ausschleusung kann dabei wie eine parallele Maschine betrachtet werden, deren Ausbringung durch die pro Zeiteinheit ausgeschleusten Objekte bestimmt wird.

Da die Position und die Dauer einer Blockierung auf einem Transporteur nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht zu ermitteln sind, kann eine genaue Berechnung der Anteile an der Stillstandsverursachung bei Blockierungen nicht erfolgen. Im linearen Fall (ohne parallele Maschinen) wird im weiteren Verlauf der Arbeit davon ausgegangen, dass die Blockierung die alleinige Ursache für den Stillstand ist, falls sie als Verursacher identifiziert wurde. Wird eine Blockierung bei parallelen Maschinen als Ursache ermittelt, gilt das gleiche, falls nicht mehrere Verursacher zur gleichen Zeitspanne gefunden wurden. Ist dies der Fall, wird, wie oben erläutert, eine Aufteilung der Ursachenanteile durchgeführt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Blockierung während des gesamten Betrachtungszeitraums vorgelegen hat.

4.2.1.3 *Veränderung der Ursachen während des Stillstands des Zentralaggregats*

Während die grundsätzliche Verursachung des Stillstands des Zentralaggregats auf mehrere Aggregate verteilt werden kann (siehe 4.2.1.2), wird die Dauer im Allgemeinen vom letzten Verursacher bestimmt. Allerdings ist auch eine Veränderung der Ursache während des Stillstands denkbar.

So kann beispielsweise während eines Mangelzustands am Zentralaggregat M , der durch einen Fehler an der Maschine $M-2$ ausgelöst wurde, die Maschine $M-1$ aus ihrem Mangelzustand ebenfalls in einen Fehlerzustand wechseln. Liegt dieser Fehlerzustand ausreichend lange an oder wechselt $M-2$ ausreichend lange vor $M-1$ aus dem Fehler wieder in Betrieb, so ist $M-1$ auch für einen Teil der Stillstandsdauer von M verantwortlich. Um diese Einflüsse zu berechnen, ist folgendermaßen vorzugehen:

Für die Maschinen M_i in der Fortpflanzungskette des Verursachers des Stillstands am Zentralaggregat werden für die Dauer $t_{start}(Downtime(M))$ bis $t_{ende}(Downtime(M))$ mit den entsprechenden Zeitversätzen (Totzeiten usw.) die Betriebszustände überprüft. Ergibt sich in diesem Zeitfenster ein Betriebszustandswechsel zu einem Fehler ($Failure(M_x)$) oder kontrollierten Stopp ($C_No_Op(M_x)$), also zu einer maschineneigenen Stillstandszeit ($Own_Downtime(M_x)$), an einer Maschine $M_x \in M_i$ zwischen dem Verursacher und dem Zentralaggregat, muss dieser Stillstand auf seine Wirksamkeit für die Stillstandsdauer überprüft werden. Dabei sind die Puffer zwischen der Maschine M_x und dem Zentralaggregat als mit $(K_P)_i * (f_n)_i$ gefüllt zu betrachten. Ist der ursprüngliche Verursacher für die gesamte Dauer der $Own_Downtime(M_x)$ ebenfalls in dem Zustand $Own_Downtime$, muss überprüft werden, wie lange ungeplante Zustände ($Failure(M_x)$) bei M_x anliegen. Ist die Dauer von $Failure(M_x)$ nicht ausreichend, damit sich dieser Zustand theoretisch bis zum Zentralaggregat durchschlägt (kaskadierte Berechnung anhand $(t_{krit,n/v})_i$ mit den fixen Pufferfüllungsgraden $(f_n)_i$, siehe 4.2.1.2), kann diese Stillstandszeit von M_x vernachlässigt werden. Andernfalls ist ab dem theoretischen Zeitpunkt, zu dem sich der Stillstand ausgewirkt hätte, eine Mitverursachung an der Dauer des Maschinenstillstands am Zentralaggregat durch M_x gegeben. Der Anteil berechnet sich, wie auch bei der anteiligen Stillstandsverursachung, über die Anzahl der gleichzeitig in wirksamer $Own_Downtime$ befindlichen Maschinen.

Ist der ursprüngliche Verursacher bereits wieder für eine längere Dauer als die entsprechenden Totzeiten und Vollfahrzeiten der Puffer und Maschinen zwischen ursprünglichem Verur-

sacher und Zentralaggregat in Betrieb, dann muss ab dieser Zeit unabhängig von der Art der $Own_Downtime(M_x)$ der Rest der Dauer des Stillstands des Zentralaggregats zu 100 % M_x zugerechnet werden (unter der Voraussetzung, dass sich keine andere Maschine in einer wirk-samen $Own-Downtime$ befindet). Die Gesamtanteile an der Stördauer des Zentralaggregats ergeben sich durch Aufsummieren der einzelnen anteiligen Zeiten (siehe auch anteilige Still-standsverursachung in 4.2.1.2).

Wegen der Analogie zu den oben dargestellten Sachverhalten wird auf eine Darstellung in Formeln und Regeln an dieser Stelle verzichtet.

4.2.1.4 *Bewertung vermindelter Ausbringungen des Zentralaggregats*

Da nicht nur der Stillstand des Zentralaggregats wirkungsgradmindernd ist, sondern auch des-sen Minderausbringungen, müssen diese ebenfalls untersucht werden, um deren Verursacher ausfindig zu machen. Dabei liegen der Diagnose der Minderausbringungen die gleichen Über-legungen zugrunde, die auch bei einem Stillstand die Verursacherzuordnung bedingen.

Für die verminderte Ausbringung gibt es im Allgemeinen zwei mögliche Gründe:

1. Zum einen ist es möglich, dass bei vor- oder nachgeschalteten parallelen Maschinen der Stillstand einer dieser Maschinen dazu führt, dass ein geringerer Durchsatz des Zentralaggregats durch die Steuerung eingestellt wird. Dieser Fall ist insofern trivial, als dass der auslösenden Maschine (oder der für deren Zustand verantwortlichen Ma-schine im Up- oder Downstream der Anlage) die Verminderung der Ausbringung an-zulasten ist.
2. Zum anderen kann eine Maschine heruntergeregelt werden, wenn der Füllungsgrad des vorgeschalteten Puffers einen bestimmten Wert unterschreitet bzw. der des nach-geschalteten Puffers einen bestimmten Wert überschreitet. Hierbei sind auch mehrere Stufen denkbar. Im Allgemeinen werden diese Grenzwerte der Pufferfüllungsgrade, ebenso wie die Mangel- und Stausituation, durch Sensoren in Form induktiver Wipp-schalter detektiert. Ist dies der Fall, so wird lediglich die Lage dieser Sensoren benö-tigt, um analog zur Mangel- und Stausituation mit entsprechend verkürzter Totzeit die Ursache für das Herunterregeln ausfindig zu machen. Wird der Füllungsgrad über an-dere Sensoren, wie z. B. den in Kapitel 3.4 beschriebenen, „global“ bestimmt, kann an die Stelle der Totzeit für die Sensoren die entsprechende Transportzeit nach Formel 4.4 gesetzt werden. Dabei ist n_p die Anzahl der Objekte, die sich aus dem Grenzwert-Füllungsgrad für die entsprechende Stufe multipliziert mit der Kapazität des Transpor-teurs ergibt, und Q_{est} die bereits verminderte Einstellausbringung des Zentralaggregats. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Anlage nach dem Stand der Technik gesteuert wird, so dass ein möglichst schneller Transport der Objekte von ei-ner Maschine zur nächsten erfolgt.

Auch hier wird aus Gründen der Analogie zu den oben dargestellten Sachverhalten auf eine Darstellung in Formeln und Regeln verzichtet.

4.2.1.5 *Bewertung aller Betriebszustände nach ihrem Störungspotential*

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, alle aufgetretenen Fehler in der Anlage auf ihre potentielle Auswirkung auf das Zentralaggregat zu untersuchen. Hierzu wird ein gegebener Normal-Pufferfüllungsgrad f_n und das fehlerfreie Verhalten aller anderen Aggregate angenommen. Für die Bewertung müssen dann lediglich die in Bild 44 und Tabelle 10 dargestellten Regelwege mit den vorgegebenen Pufferfüllungsgraden $(f_n)_i$ für alle i Puffer zwischen den Maschinen berechnet werden. Dies stellt jedoch eine Maschinenanalyse unabhängig vom Laufzeitverhalten der Anlage in dem betrachteten Zeitraum dar. Spezialfälle, wie Blockierungen, ausgeschleuste Güter, etc., können hierbei ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Allerdings ist auch diese Betrachtung besser als eine rein statistische Bewertung der Störhäufigkeit und Stördauer der Maschinen geeignet, um Schwachstellen in der Anlage aufzudecken.

4.2.1.6 *Anwendung der Regeln in einem „klassischen“ nicht wissensbasierten Tool*

Aufgrund der iterativen Vorgehensweise wurde entschieden, die Regeln nicht in einem wissensbasierten Tool, wie z. B. CLIPS, einzupflegen und dieses entsprechend zu erweitern, sondern einen konventionellen Algorithmus zur Überprüfung der Regeln zu verwenden, der keine klare Trennung der Wissensbasis von der Inferenz vorsieht. Die Regeln sind vielmehr Bestandteil des Algorithmus. Bei einer erfolgreichen Überprüfung kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Regeln auch als Wissensbasis für regelbasierte Systeme verwendbar sind. Das Tool für die Diagnose benötigt neben einer Datenbank mit Betriebsdaten eine Anlagenbeschreibung in Form einer Tabelle mit folgenden Daten (vgl. auch Anhang S)

- Informationen über die einzelnen Maschinen
 - mach_ID (Format Integer): Sechsstellige Kennung der Maschine (Ziffer 1-3 Typ der Maschine, Ziffer 4 – 6 Nummer der Maschine; vgl. 3.1.3 und Anhang I)
 - description (Format String): Natürlichsprachliche Beschreibung der Maschine
 - central_assembly (Format Boolean): Identifikation des Zentralaggregats (Wert = 1 => Zentralaggregat)
 - part_of_block (Format Integer): Laufende Nummer für Bestandteile eines Blocks (da hier im Allgemeinen lediglich das Leitaggregat des Blocks die Betriebszustände anzeigt)
 - td_block (Format Integer): Totzeit innerhalb des Blocks in s
 - Kp_block (Format Integer): Kapazität des Blocks in Objekten
 - block_leader (Format Boolean): Identifikation Leitaggregat des Blocks (Wert = 1 => Leitaggregat)
- Informationen über die einzelnen Verbindungen
 - source (Format Integer): mach_ID der Quell-Maschine einer Verbindung
 - target (Format Integer): mach_ID der Ziel-Maschine einer Verbindung
 - Kp (Format Integer): Kapazität der Verbindung in Objekten
 - td (Format Integer): Totzeit der Verbindung in s
 - main_source (Format Boolean): Identifikation des Hauptstroms für die Quell-Maschine (Wert = 1 => Hauptstrom)

- main_target (Format Boolean): Identifikation des Hauptstroms für die Ziel-Maschine (Wert = 1 => Hauptstrom)
- MDS_source (Format Integer): Nennausbringung (Machine Design Speed) der Quell-Maschine in Objekten/Stunde
- MDS_target (Format Integer): Nennausbringung (Machine Design Speed) der Ziel-Maschine in Objekten/Stunde

Grundsätzlich arbeitet das Tool in der in Bild 47 in Form eines Unified Modeling Language (UML) Anwendungsfall-Diagramms dargestellten Weise. Dabei wird durch den Bediener ein Zeitraum für die Diagnose ausgewählt, in dem die bisher nicht standardisiert vorliegenden, herstellereigenen Datenbanken in die Standardtabelle transformiert werden (vgl. 3.1.3).

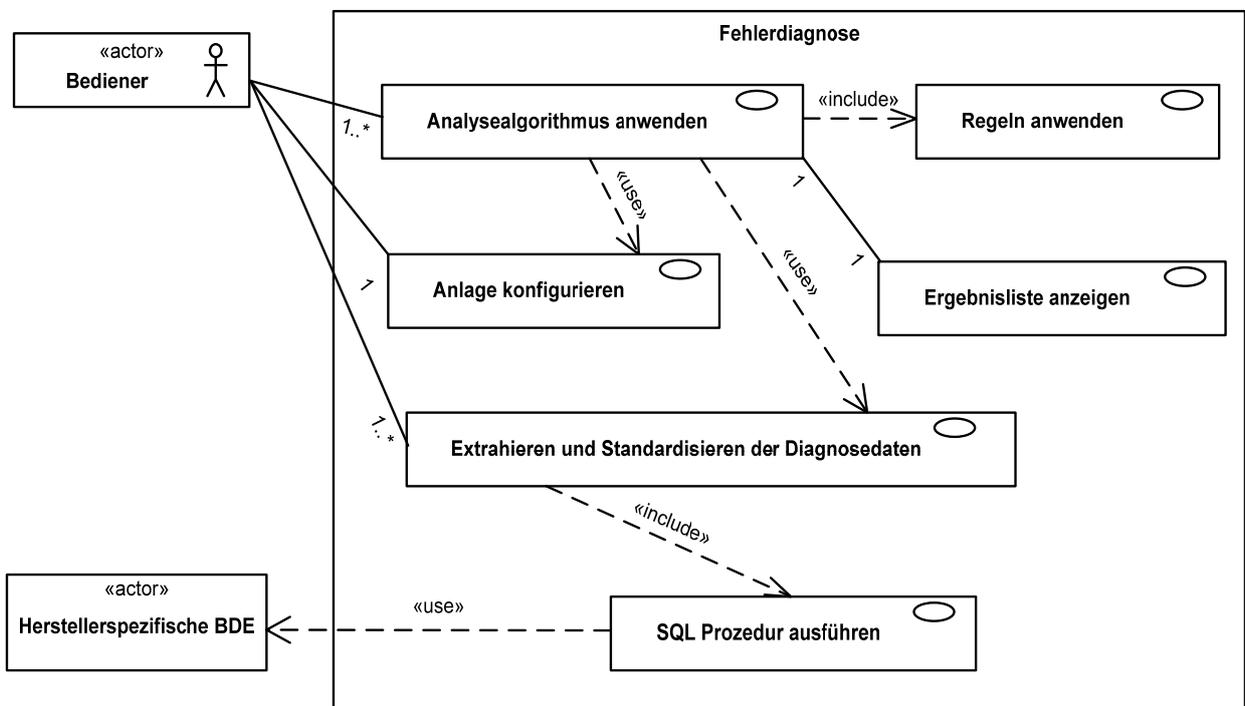


Bild 47: Aufbau des Diagnosetools als UML Anwendungsfall-Diagramm

Mit Hilfe der Anlagenbeschreibung (in Form der durch den Benutzer ausgefüllten Konfigurationstabellen für Maschinen und Verbindungen) produziert der Analysealgorithmus unter Verwendung der Regeln eine Ergebnisliste. In dieser Liste sind alle Stillstände des Zentralaggregats und ihre Verursacher aufgeführt. Der Algorithmus kann dabei entweder die Regeln zur Bestimmung des letzten Verursachers für den Stillstand oder zur anteiligen Berechnung der Verursachung verwenden.

Folgende Aktivitätsdiagramme verdeutlichen den Ablauf des im Tool umgesetzten Algorithmus zur Identifikation des zeitlich letzten Verursachers. Dabei wird im Hauptprogramm (vgl. Bild 48) zunächst für den Diagnosezeitraum eine Liste mit allen Stillständen des Zentralaggregats aus der standardisierten Diagnosetabelle erstellt (vgl. Bild 49).

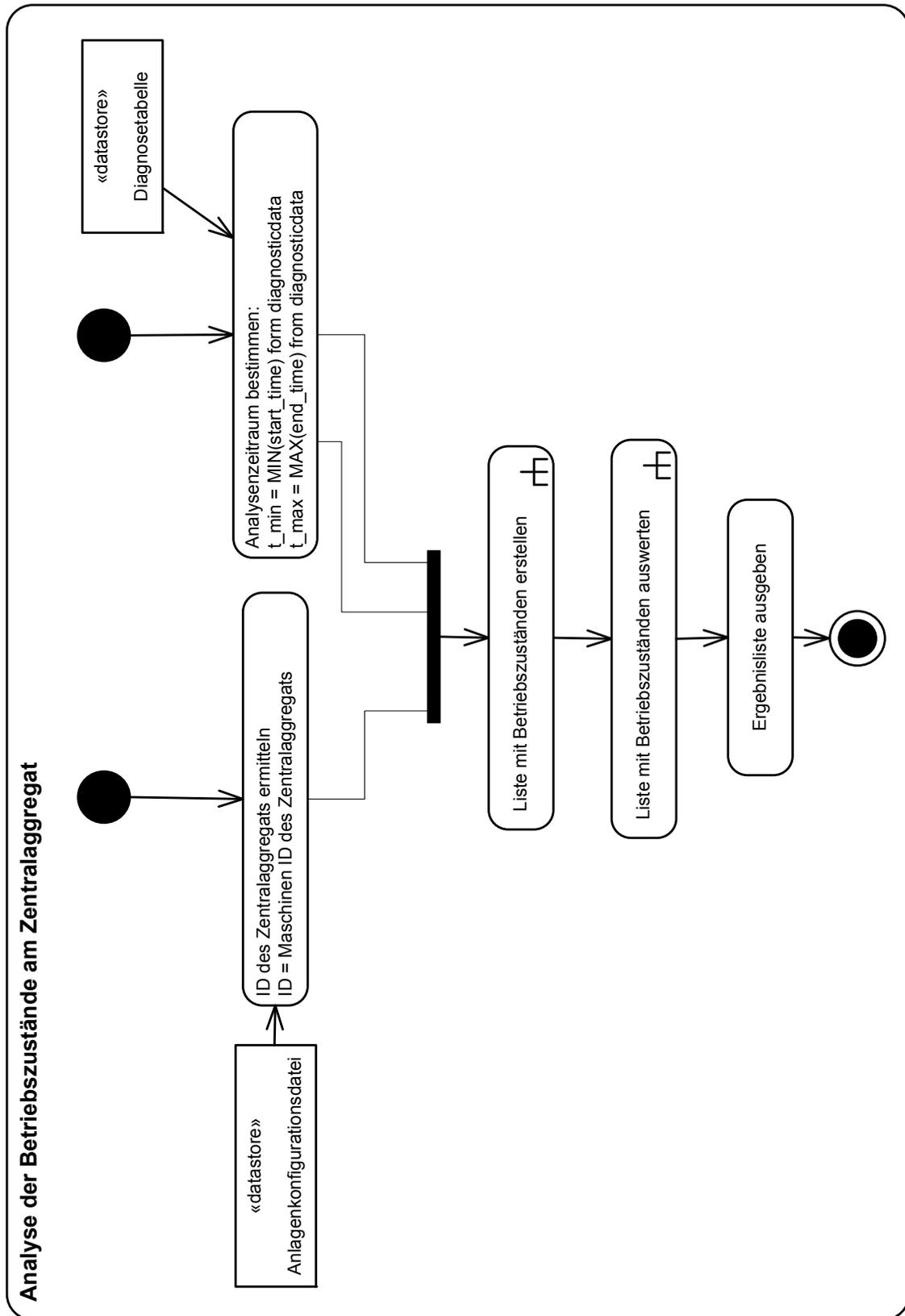


Bild 48: Aktivitätsdiagramm des Ablaufs des Hauptprogramms (diagnosticdata entspricht der standardisierten Diagnosetabelle mit den entsprechenden Variablen; vgl. Anhang I und Anhang J)

Diese Liste wird dann Eintrag für Eintrag abgearbeitet. Dabei wird jeder einzelne Stillstand daraufhin untersucht, ob es sich um einen eigens verschuldeten Fehler oder kontrollierten Stopp, einen Stau- oder Mangelfall oder um eine andere Ursache (wie z. B. einen Fehler des Transporteurs etc.) handelt (vgl. Bild 50 und Bild 51). Die Berücksichtigung von Minderausbringungen ist in der derzeitigen Version des Tools nicht implementiert. Während die durch die Maschine selbst verursachten Stillstände zu einem Eintrag in die Ergebnisliste führen, müssen Stau und Mangelfälle weiter untersucht werden.

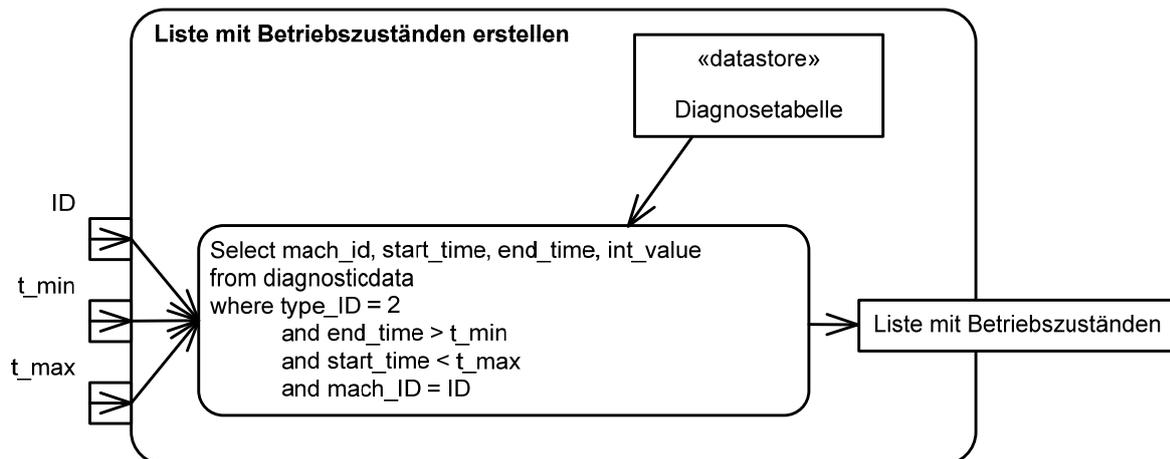


Bild 49: Funktion zum Erstellen der Liste mit Betriebszuständen für ein über ID identifiziertes Aggregat im Zeitraum t_{\min} bis t_{\max} (diagnosticdata entspricht der standardisierten Diagnosetabelle mit den entsprechenden Variablen; vgl. Anhang I und Anhang J)

Bevor eine der Funktionen zur Auswertung dieser Fälle aufgerufen wird, sieht das Tool jedoch noch eine Überprüfung auf einen Fehler innerhalb eines Maschinenblocks vor. Diese Überprüfung könnte entfallen, wenn alle Maschinen die in den WS definierten Betriebszustände annehmen könnten (vgl. Anhang C). Da sich in der Praxis jedoch gezeigt hat, dass dies bei Blockaggregaten häufig nicht der Fall ist, sondern lediglich die Leitmaschine des Blocks diese Betriebszustände anzeigt, wurde dies im derzeitigen Tool berücksichtigt. Auf den genauen Ablauf der Blockanalyse wird hier nicht näher eingegangen sondern auf Anhang N verwiesen.

Bei Aufruf der Stau- oder Mangelfunktion wird zunächst eine Liste mit allen Nachfolgern bzw. Vorgängern der betrachteten Maschine erstellt (vgl. Bild 52 und Bild 53 für das Beispiel Mangel/Vorgänger und Anhang N für Stau/Nachfolger).

Diese wird ebenfalls für jeden Eintrag (jede Maschine) in dem mithilfe der Startzeit des auslösenden Stillstands und den entsprechen Tot- und Sicherheitszeiten berechneten Zeitraum auf ihre Betriebszustände untersucht. Dies wird so lange fortgesetzt, bis eine Ursache in Form eines von einer Maschine selbst verursachten Stillstands gefunden wird. Es handelt sich dabei somit um rekursive Funktionsaufrufe, die die Fortpflanzung eines Fehlers oder Maschinenstopps zurückverfolgen. Sollte die Funktion die letzte bzw. erste Maschine mit Datenerfassung in einer Linie erreichen, wird der Fehler dem nach- bzw. vorgeschalteten Prozess zugeschrieben.

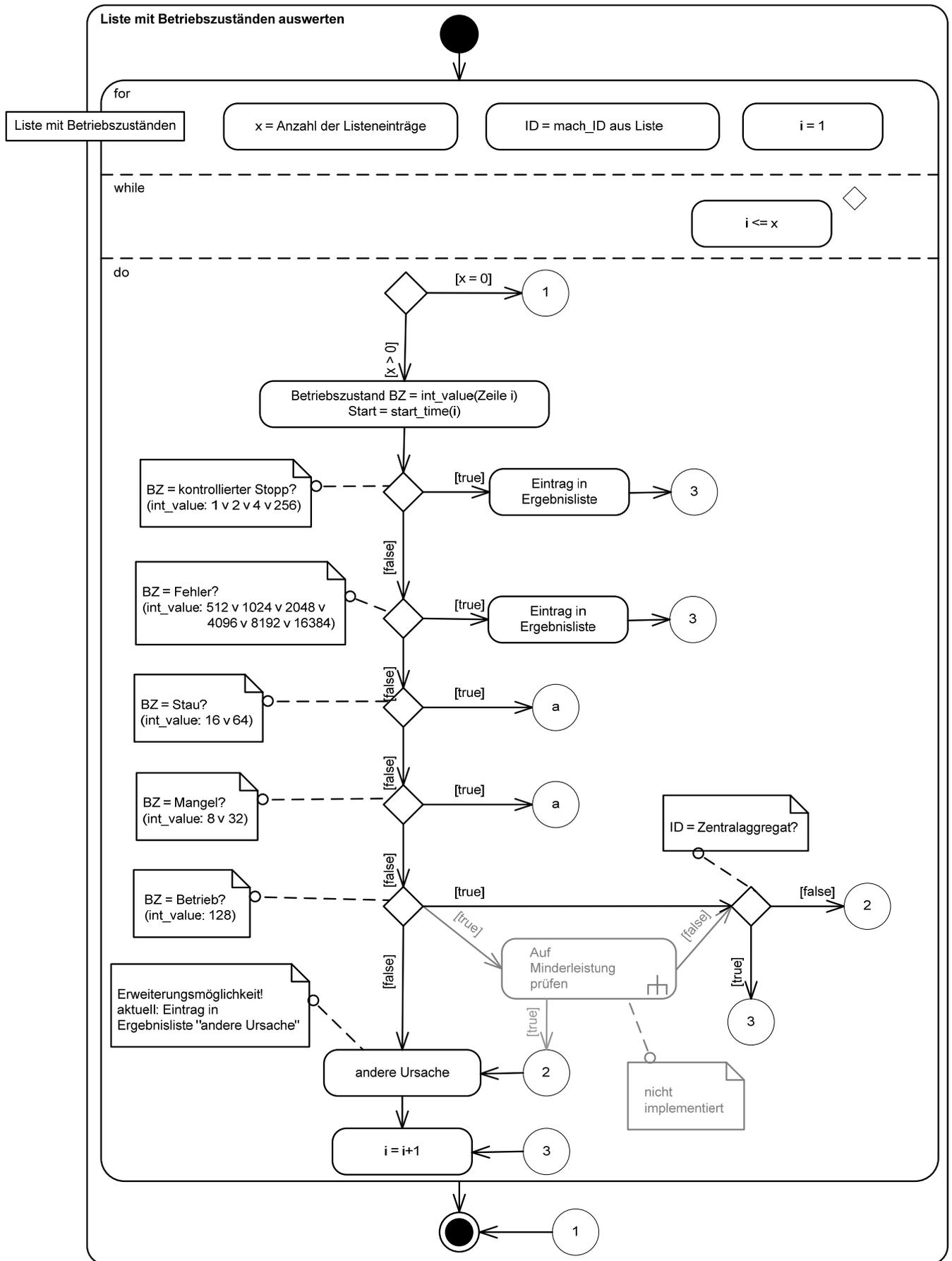


Bild 50: Aktivitätsdiagramm der Funktion zum Auswerten der Betriebszustände einer erstellten Liste – Teil 1

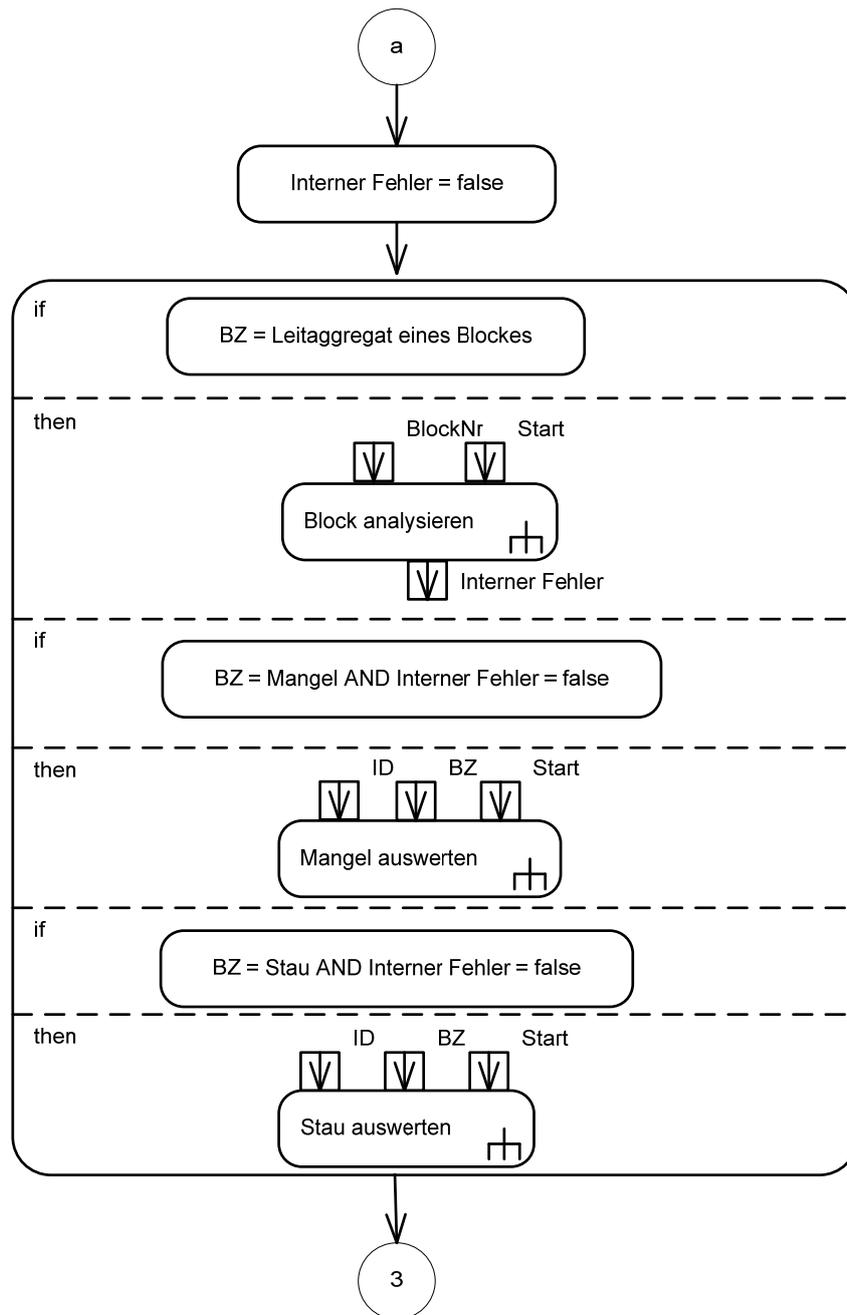


Bild 51: Aktivitätsdiagramm der Funktion zum Auswerten der Betriebszustände einer erstellten Liste – Teil 2

Um zu vermeiden, dass sich eine Endlosrekursion ergibt, wird bei Eintritt in die Staufunktion (bzw. Mangelfunktion) zunächst überprüft, ob der Aufruf aus der der Mangelfunktion (bzw. Staufunktion) erfolgt ist. Ist dies der Fall, kann es sich bei der Ursache hierfür lediglich um einen Fehler des Transporteurs oder eine Blockierung auf diesem handeln. In jedem Fall muss der Fehler auf dem Transporteur zwischen den Maschinen mit dem Stau- und Mangelzustand liegen. Der im Tool umgesetzte Algorithmus sichert somit das Auffinden der in der Arbeit beschriebenen Ursachen für die Stillstände des Zentralaggregats im betrachteten Diagnosezeitraum.

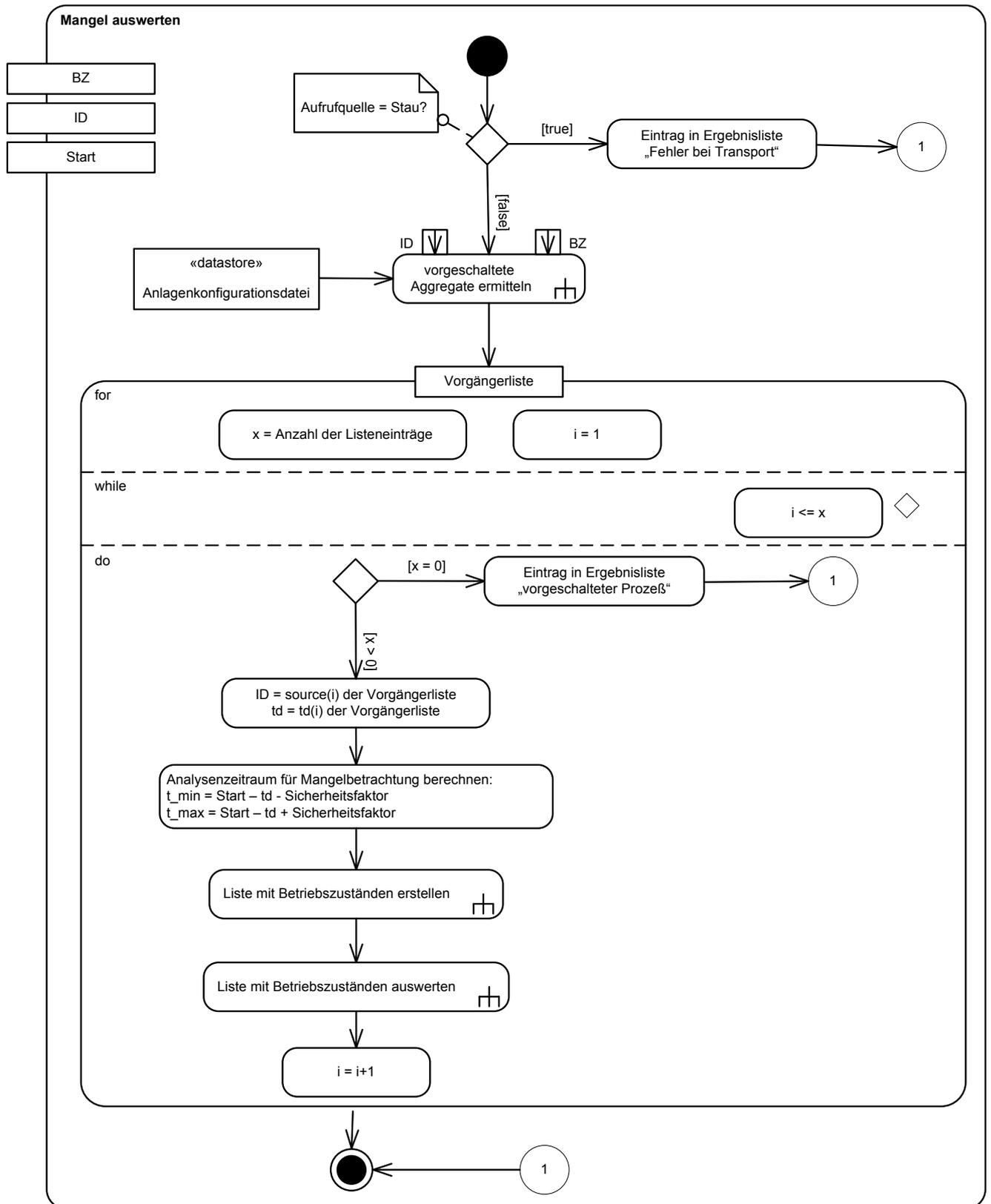


Bild 52: Aktivitätsdiagramm der Funktion zur Überprüfung von Mangelzuständen einer Maschine „ID“ mit dem Betriebszustand „BZ“ bei einem Stillstand mit der Startzeit „Start“

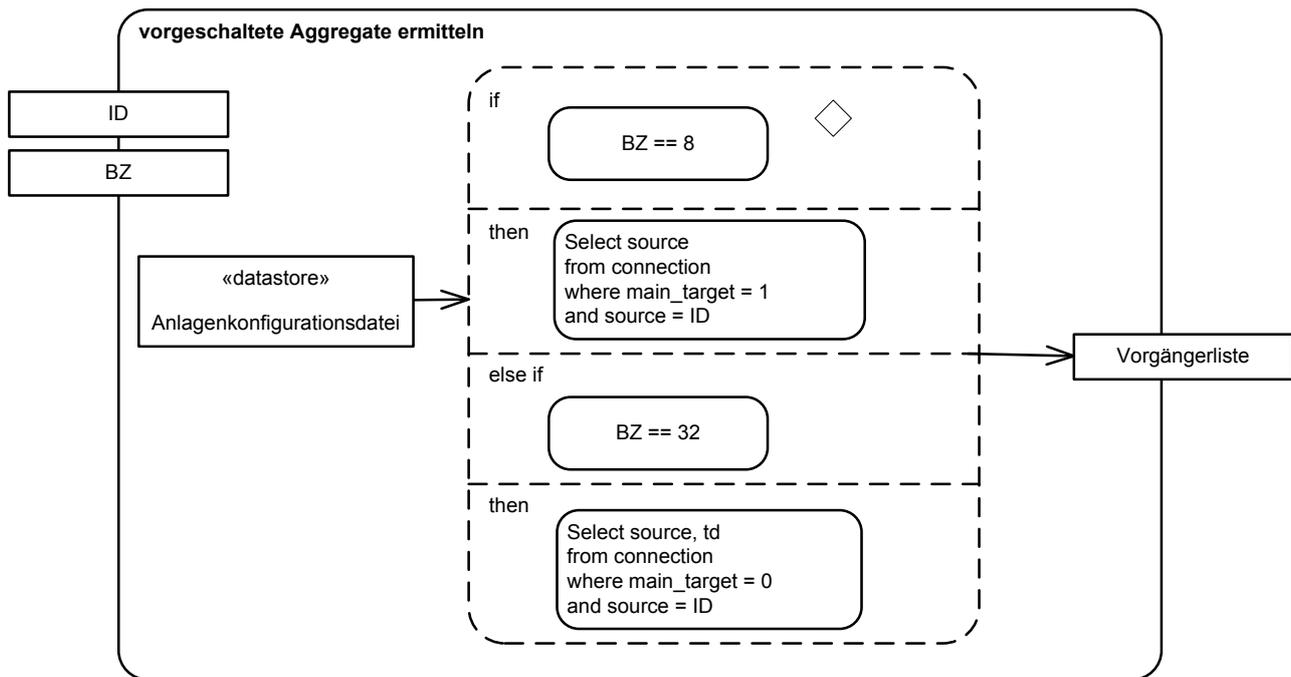


Bild 53: Aktivitätsdiagramm der Funktion zum Ermitteln der vorgeschalteten Aggregate einer Maschine ID mit dem Betriebszustand BZ (1 und 0 sind hierbei als true und false zu verstehen)

Zusätzlich zu dem hier dargestellten Algorithmus zum Bestimmen des zeitlich letzten Verursachers eines Stillstands wurde auch die in 4.2.1.2 beschriebene anteilige Stillstandsverursachung in einem Diagnosetool umgesetzt. Da hierzu der beschriebene Algorithmus lediglich um die in 4.2.1.2 ausführlich dargestellte Berechnung der Verursacheranteile erweitert wurde, wird auf eine detaillierte Darstellung an dieser Stelle verzichtet und auf Anhang O verwiesen. Anzumerken ist lediglich, dass in der derzeitigen Version auch hier weder Minderausbringungen berücksichtigt werden noch eine detailliertere Betrachtung anderer Ursachen (wie Fehler auf Transporteuren etc.) implementiert ist. Beim Auffinden solcher Fehler bricht das derzeitige Tool die Diagnose ab und schreibt die Anteile der bis zu den Spezialfällen gefundenen Verursacher in die Ergebnistabelle.

4.2.2 Modellbasierte Diagnose

4.2.2.1 Numerisches Modell und Simulation

Auch wenn viele modellbasierte Systeme mit qualitativen Modellen arbeiten [61], ist die Grundlage der Modellierung häufig ein quantitatives mathematisches Modell, wie beispielsweise ein System aus Differentialgleichungen [3]. Im Folgenden wird daher ein aus den mathematischen Formeln in 3.5 abgeleitetes numerisches Verhaltensmodell dargestellt und anhand der Umsetzung in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink[®] validiert (vgl. auch [266]).

Bei der Auswahl der Modellierungsmethode wurde ein Komponenten-orientierter Ansatz gewählt. Dies liegt zum einen in den unter 2.3.4.3 vorgestellten Systemen und Anwendungen begründet, zum anderen entspricht die Entwicklung von Komponenten dem intuitiven Emp-

finden eines mit Anlagen beschäftigten Ingenieurs, da jede Anlage eine Ansammlung von verbundenen Einzelkomponenten darstellt. Bei der Komponenten-orientierten Modellierung sind Randbedingungen zu beachten, um einen breiten Einsatz und eine Wiederverwendung der Modelle zu ermöglichen: Die Modellierung muss kontextfrei erfolgen. Dies bedeutet, dass lediglich das physikalische Verhalten einer Komponente modelliert wird und keinerlei Annahmen getroffen werden dürfen, die die Komponente in einen impliziten Zusammenhang setzt. Der Zusammenhang zwischen mehreren Komponenten ergibt sich aus der Systemstruktur (vgl. 2.3.4). Zu diesem Zweck verfügen die Komponenten über verschiedene Elemente, die sie charakterisieren:

- Parameter, die die Konstanten in den Gleichungssystemen repräsentieren
- State Variables, die sich auf Basis der Gleichungssysteme dynamisch ändern können
- Terminals/Interfaces, die die Verbindungskanäle zwischen den einzelnen Komponenten darstellen
- Mode Assignments (MA, vgl. 2.3.4), die die verschiedenen Verhaltensweisen der Komponenten symbolisieren. Da in der vorliegenden Arbeit lediglich eine Fehlerlokalisierung durchgeführt werden soll, handelt es sich bei den MA ausschließlich um die Zustände *okay* und *–okay*

Folgend werden die einzelnen Komponentenmodelle vorgestellt, die zusammen mit der Gruppe Model-Based Systems & Qualitative Reasoning des Lehrstuhls für Informatik IX der TU München (MQM) entwickelt wurden.

Material Transporter (MT)

Bei der Modellierung der Einzelkomponenten für Abfüll- und Verpackungsanlagen wurde darauf geachtet, möglichst generische Modelle zu erarbeiten. Auf Basis der unter 2.1.1 dargestellten, grundsätzlichen Funktionen von Maschinen und Transporteuren in Verpackungsanlagen wurde eine Komponente geschaffen, die die wesentlichen Aspekte beider Anlagenelemente in sich vereinigt. Die grundsätzliche Überlegung dazu ist, dass sowohl Maschinen als auch Transporteure Objekte befördern. Während sich die Transporteure dabei hauptsächlich darin unterscheiden, ob und wie sie Objekte puffern können, kommt bei den Maschinen noch der Aspekt der Objekt-Manipulation hinzu. Diese Manipulation ist aber aufgrund der oben erläuterten Beschränkung bei den Mode Assignments zunächst unbedeutend und kann daher in dem Komponentenmodell weitgehend unberücksichtigt bleiben.

Da in mehreren Arbeiten nachgewiesen werden konnte, dass diskrete Transportprozesse auch in geeigneter Weise durch kontinuierliche Modelle abgebildet werden können (siehe z. B. [18] und [278]), soll bei dem Komponentenmodell des MT ein flussorientierter Ansatz gewählt werden. Dies hat den zusätzlichen Vorteil, dass theoretische Objektflüsse auch über die Maschinengeschwindigkeiten und die Fördergeschwindigkeiten der Transporteure berechnet werden können, was vor allem da notwendig ist, wo exakte Zählwerte fehlen. Die State Va-

riables, Parameters und Interfaces für das Komponenten-Modell MT sind in Tabelle 12 aufgeführt¹⁷.

Zusätzlich zu der Konvention, dass alle Flüsse in eine Komponente hinein positiv und alle Flüsse aus einer Komponente heraus negativ sind, wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Es wird keine detaillierte Beschreibung der Verteilung der Elemente auf dem Transporteur/Puffer oder in der Maschine benötigt, um das qualitative Verhalten der Komponente zu beschreiben.
2. Die Objekte folgen einem typischen Weg über den Transporteur, sofern sie nicht durch andere Objekte auf dem Transporteur daran gehindert werden.
3. Die transportierten Objekte sind Stückgüter und in ihrer räumlichen Ausdehnung unveränderlich ($in.d_0 = out.d_0$) (das Erzeugen neuer Packungen durch Kombinationen von Packungen aus einer früheren Prozess-Stufe mit einer neuen Verpackung oder das Auflösen von Packungen zu Packmitteln und Verpackung und die daraus resultierenden Änderungen sind davon nicht betroffen, sie werden in der Komponente Combine Element bzw. Separate Element speziell behandelt).
4. Die transportierten Objekte verändern sich nicht über den Transportprozess und sind bei einer Komponente alle vom gleichen Typ ($in.type = out.type$, siehe auch 3.).
5. Die Kapazität der Komponente (C_{MT}) ist konstant. Sie kann unter der Annahme, dass sie eine Funktion der zur Verfügung stehenden Fläche und der Ausdehnung der Objekte ist, wie unter 3.3.2 dargestellt, berechnet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Fläche jederzeit vollständig für die Objekte zur Verfügung steht. Bei Komponenten mit einer festen Anzahl von Objekten, wie beispielsweise einer Maschine ist C_{MT} die maximale Anzahl an Objekten in der Maschine.
6. Die Richtung des Transports innerhalb einer Komponente ist konstant.
7. Es ist keine explizite Modellierung der Steuerung enthalten.

Zur besseren Erklärung von Tabelle 12 und Annahme 1. dient Bild 54:

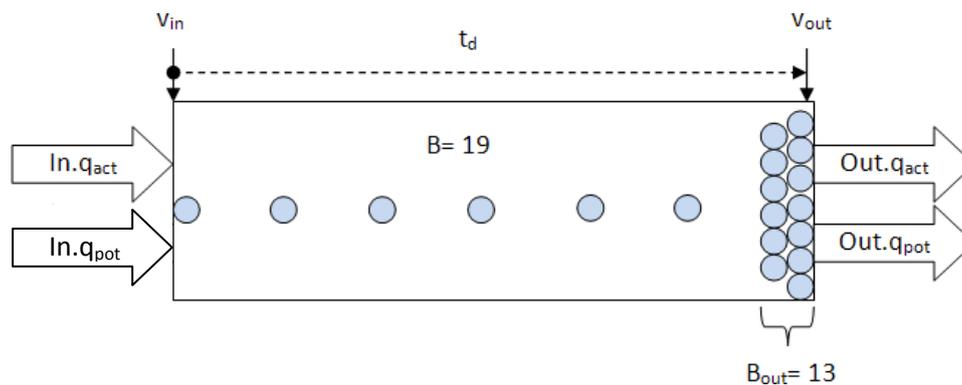
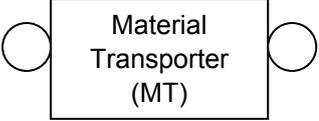


Bild 54: Bildhafte Darstellung der Komponente MT in Form eines Puffers

¹⁷ Da sich die Variablen der Komponenten-Modelle von den in Kapitel 3.5 und 4.2.1 aufgeführten Variablen bei gleichem Namen inhaltlich teilweise unterscheiden können, wurden an dieser Stelle neue Bezeichner eingeführt.

Tabelle 12: State Variables, Parameters und Interfaces des MT

Material Transporter		
		
State Variables		Domains
B	Anzahl gespeicherter Objekte	$=\{0, \dots, C_{MT}\}$ C_{MT} =Kapazität von MT
B_{out}	Anzahl gespeicherter Objekte, die am Ausgang verfügbar sind	$=\{0, \dots, C_{MT}\}$ C_{MT} = Kapazität von MT
Bar_{IN}	mechanische Sperre am Eingang	$=\{0, 1\}$ 1= Barriere gesetzt
Bar_{OUT}	mechanische Sperre am Ausgang	$=\{0, 1\}$ 1= Barriere gesetzt
v_{in}	Geschwindigkeit des Objektflusses in die Komponente [m/s]	$=\{R_0^+\}$
v_{out}	Geschwindigkeit des Objektflusses aus der Komponente [m/s]	$=\{R_0^+\}$
t_d	"Totzeit" [s]	$=\{R_0^+\}$
Parameters		
A_b	Fläche der Komponente [m ²]	$=\{R_0^+\}$
c_{por}	Porositätskorrekturfaktor	$=\{0, \dots, 1\}$
$f_{in,i}$	Verteilungsfunktion der Objekte an den i Eingängen der Komponente	$=\{0, \dots, 1\}$
$f_{out,i}$	Verteilungsfunktion der Objekte an den i Ausgängen der Komponente	$=\{0, \dots, 1\}$
Interfaces		
$in.A_e$	Projektionsfläche der Objekte [m ²]	$=\{R_0^+\}$
$out.A_e$	Projektionsfläche der Objekte [m ²]	$=\{R_0^+\}$
$in.d_0$	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung am Eingang [m]	$=\{R_0^+\}$
$out.d_0$	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung am Ausgang [m]	$=\{R_0^+\}$
$in.q_{pot}$	potentieller Fluss in MT [^{elements} /s]	$=\{0, \dots, v_{in} / in.d_0\}$
$out.q_{pot}$	potentieller Fluss aus MT [^{elements} /s]	$=\{0, \dots, -v_{out} / out.d_0\}$
$in.q_{act}$	aktueller Fluss in MT [^{elements} /s]	$=\{0, \dots, v_{in} / in.d_0\}$
$out.q_{act}$	aktueller Fluss aus MT [^{elements} /s]	$=\{0, \dots, -v_{out} / out.d_0\}$
$in.type$	Objekttyp am Eingang	$=\{objects\}$ in der Anlage vorkommende
$out.type$	Objekttyp am Ausgang	$=\{objects\}$ Objekte, z. B. Flaschen, Kästen, ...

B_{out} ist dabei eine virtuelle Größe, die die Objekte beziffert, die potentiell am Ausgang der Komponente verfügbar sind. Dies sind genau die Elemente, die sich mindestens für die Dauer der Totzeit t_d auf dem Transporteur befinden. Die Totzeit ist damit unter Annahme 2. als die typische Zeit definiert, die ein Objekt vom Eingang einer Komponente bis zum Ausgang der Komponente benötigt¹⁸.

Hierdurch lassen sich alle unter 2.1.1 beschriebenen Transporteure bzw. Puffer und auch sämtliche Maschinen auf der Abstraktionsebene des Modells ausreichend genau beschreiben. Aufgrund der kontextfreien Modellierung wird bei den Flüssen zwischen einem potentiellen ($in.q_{pot}$ und $out.q_{pot}$) und einem tatsächlichen, aktuellen Fluss ($in.q_{act}$ und $out.q_{act}$) der Komponente unterschieden. Der potentielle Fluss stellt dabei den Fluss dar, den die Komponente ohne Berücksichtigung des strukturellen Zusammenhangs annehmen könnte. Der aktuelle Fluss repräsentiert den tatsächlichen Fluss im Zusammenspiel mit anderen Komponenten (siehe unten).

Aus den Anforderungen 3.-5. folgt für Komponenten ohne eine durch die Funktion o. Ä. festgelegte Anzahl an Objekten (vgl. auch 3.3.2):

$$C_{MT} = \frac{A_b}{in.A_e} * c_{por}, \quad c_{por} = f(in.type)$$

Formel 4.41

Das Modell für den *okay*-Modus lässt sich dann außerdem wie folgt formalisieren (siehe auch Tabelle 12):

$$\frac{dB}{dt} = out.q_{act} + in.q_{act}$$

Formel 4.42

$$\frac{dB_{out}}{dt} = out.q_{act}(t) + in.q_{act}(t - t_d)$$

Formel 4.43

Bei k Eingängen der Komponente für einen Objekttyp gilt ($i \in k$):

$$\forall i \quad in_i.q_{pot}(t) = \begin{cases} \frac{v_{in,i}(t)}{in.d_0} * (1 - Bar_{IN,i}(t)) & \text{if } B(t) < C_{MT} \\ \min\left(\frac{v_{in,i}(t)}{in.d_0} * (1 - Bar_{IN,i}(t)), -f_{in,i} * out.q_{act}(t)\right) & \text{if } B(t) = C_{MT} \end{cases}$$

wobei $\sum_{i=1}^k f_{in,i} = 1$

Formel 4.44

¹⁸ t_d entspricht hier dem t_{ot} aus Kapitel 3.5 und wird im Folgenden als konstant angenommen, für eine detailliertere Betrachtung kann t_d auch wie t_T aus Kapitel 3.5 berechnet werden.

Bei l Ausgängen der Komponente für einen Objekttyp gilt ($i \in l$):

$$\forall i - out_i \cdot q_{pot}(t) = \begin{cases} \frac{v_{out,i}(t)}{out \cdot d_0} * (1 - Bar_{OUT,i}(t)) & \text{if } B_{out}(t) \geq 1 \\ \min\left(\frac{v_{out,i}(t)}{out \cdot d_0} * (1 - Bar_{OUT,i}(t)), f_{out,i} * in \cdot q_{act}(t - t_d)\right) & \text{if } B_{out}(t) < 1 \end{cases}$$

wobei $\sum_{i=1}^l f_{out,i} = 1$

Formel 4.45

Das bedeutet, dass die Anzahl der Objekte in der Komponente von den pro Zeiteinheit zu- und abgeführten Objekten bestimmt wird. Die Anzahl der am Ausgang der Komponente verfügbaren Objekte hängt von den abgeführten und den vor der Totzeit zugeführten Objekten ab. Ein MT kann potentiell Objekte mit der vorgegebenen Geschwindigkeit der Komponente aufnehmen, so lange MT nicht vollständig gefüllt ist und keine mechanische Sperre dies verhindert. Ist die Kapazität von MT ausgeschöpft, ist der Objektfluss das Minimum des über die Geschwindigkeit bestimmten Flusses in die Komponente und des aktuellen Flusses aus ihr heraus, wiederum unter der Annahme, dass keine mechanische Sperre dies beeinflusst. Analoges gilt für den Objektfluss am Ausgang unter Berücksichtigung von B_{out} ¹⁹.

Transportation Connector (TC)

In der MT-Komponente werden aufgrund der kontextfreien Betrachtungsweise lediglich die potentiellen Flüsse in die Komponente und aus ihr heraus betrachtet. Die aktuellen Flüsse hängen neben diesen potentiellen auch von den mit dem MT verbundenen anderen MT ab. Um dies zu berücksichtigen, wurde eine Komponente TC modelliert. Da es sich um eine virtuelle Komponente handelt, besteht sie lediglich aus Interfaces, die in Tabelle 13 dargestellt sind. Die dabei verwendeten Indizes beziehen sich auf die Lage des betrachteten MT. MT_{n+1} bezeichnet beispielsweise die MT_n direkt nachfolgende Komponente. Die TC-Komponente befindet sich immer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ebenen.

Das Modell für den *okay*-Modus des TC lässt sich folgendermaßen formalisieren:

$$-MT_n \cdot out \cdot q_{act} = \min(-MT_n \cdot out \cdot q_{pot}, MT_{n+1} \cdot in \cdot q_{pot})$$

Formel 4.46

$$MT_n \cdot out \cdot q_{act} = -MT_{n+1} \cdot in \cdot q_{act}$$

Formel 4.47

Das bedeutet, dass der aktuelle Fluss aus einer Komponente das Minimum ihres potentiellen Flusses und des potentiellen Flusses in die nächste Komponente ist¹⁹. Zusätzlich gilt das Prinzip der Masseerhaltung: alles was aus einer Komponente hinaus fließt, fließt in die nächste Komponente hinein. Das Ausschleusen von Elementen kann dabei als Verbindung zu einer nachfolgenden Komponente mit unendlich großer Kapazität modelliert werden (diese Komponente entspricht dann dem tatsächlichen Container o. Ä. für ausgeschleuste Objekte).

¹⁹ Hierbei ist zu berücksichtigen, dass definitionsgemäß die Flüsse aus einer Komponente negativ sind!

Tabelle 13: Interfaces des TC

Transportation Connector		
		
KEINE STATE VARIABLES, KEINE PARAMETERS	DOMAINS	
INTERFACES		
<i>in.A_e</i>	Projektionsfläche der Objekte [m ²]	={R ₀ ⁺ }
<i>out.A_e</i>	Projektionsfläche der Objekte [m ²]	={R ₀ ⁺ }
<i>in.d₀</i>	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung	={R ₀ ⁺ }
<i>out.d₀</i>	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung [m]	={R ₀ ⁺ }
<i>MT_n.in.q_{pot}</i>	potentieller Fluss in MT _n [elements/s]	={0,...,v _{in} / in.d ₀ }
<i>MT_n.out.q_{pot}</i>	potentieller Fluss aus MT _n [elements/s]	={0,...,-v _{out} / out.d ₀ }
<i>MT_n.in.q_{act}</i>	aktueller Fluss in MT _n [elements/s]	={0,...,v _{in} / in.d ₀ }
<i>MT_n.out.q_{act}</i>	aktueller Fluss aus MT _n [elements/s]	={0,...,-v _{out} / out.d ₀ }
<i>in.type</i>	Objekttyp am Eingang	={objects} in der Anlage vorkommende
<i>out.type</i>	Objekttyp am Ausgang	={objects} Objekte, z. B. Flaschen, Kästen

Das Modell muss komplexer dargestellt werden, wenn auch parallele Komponenten modelliert werden sollen. Die resultierenden Formeln lassen sich an Bild 55 verdeutlichen. Der aktuelle Output einer parallelen Komponenten der Menge paralleler MT einer Ebene **A** hängt von der Summe der aktuellen Outputs der *o* parallelen MT in der gleichen Ebene (*n*) und von der Summe der Inputs der *m* parallelen MT in der folgenden Ebene (*n+1*) ab. Unter Berücksichtigung von *k* Ein- und *l* Ausgängen (desselben Objekttyps) ergibt sich daraus:

$$\forall x \in \mathbf{A} \quad -MTx_n \cdot out \cdot q_{act} =$$

$$\min \left(- \sum_{i \in l} (MTx_n \cdot out_i \cdot q_{pot}), \left(\sum_{i \in m} \sum_{j \in k} (MTi_{n+1} \cdot in_j \cdot q_{pot}) + \sum_{i \in o} \sum_{j \in l} (MTi_n \cdot out_j \cdot q_{act}) \right) \right)$$

Formel 4.48

$$\forall x \in \mathbf{A} \quad MTx_n \cdot out \cdot q_{act} = - \sum_{i \in m} \sum_{j \in k} (MTi_{n+1} \cdot in_j \cdot q_{act}) - \sum_{i \in o} \sum_{j \in l} (MTi_n \cdot out_j \cdot q_{act})$$

Formel 4.49

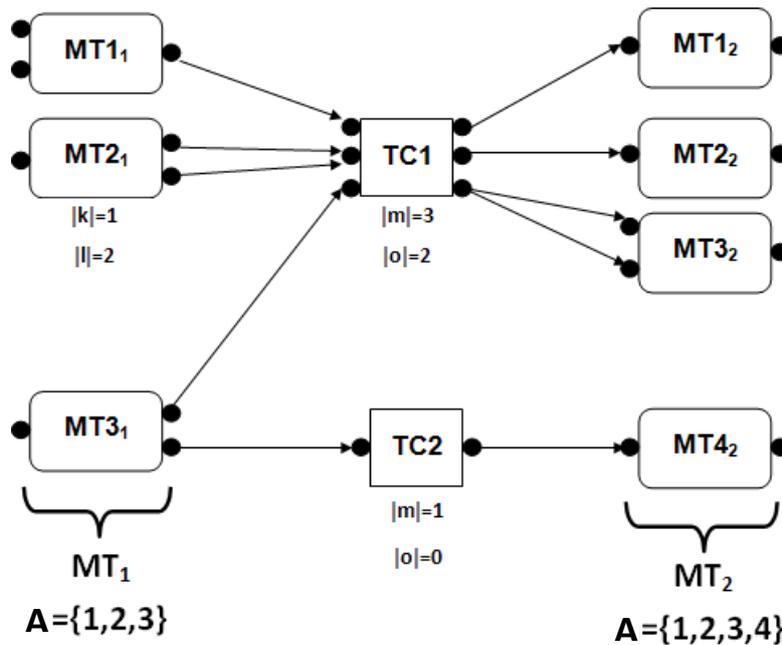


Bild 55: Beispiel für den Einsatz der TC-Komponente bei drei parallelen MT in der Ebene n und vier parallelen MT in der Ebene n+1 mit verschiedenen vielen Ein- und Ausgängen für denselben Objekttyp

Aus Bild 55 geht hervor, dass jede Gruppe paralleler MT mit genau einem TC mit den entsprechenden nachfolgenden MT verbunden werden muss. Das bedeutet nicht, dass jeder MT mit nur einem TC verbunden sein kann. Die Verteilung des Flusses zwischen den Interfaces ist in den MT-Komponente selbst über die Parameter $f_{in,i}$ und $f_{out,i}$ bestimmt.

Combine Element (CE)

Die bisherigen Modellkomponenten sind nur dazu geeignet, Anlagen zu modellieren, in denen Objekte des gleichen Typs bzw. Packungen einer bestimmten Prozess-Stufe verarbeitet werden. Wie unter 2.1.1 und 2.2 bereits angedeutet, bestehen Lebensmittelverpackungsanlagen jedoch aus mehreren Haupt- und Nebenströmen, die als Packgut und Verpackung verschiedener Prozess-Stufen dienen. Es wird daher eine Komponente benötigt, die die Kombination von zwei Objekttypen zu einem neuen Objekttyp ermöglicht. Hierzu wurde die Komponente CE modelliert, deren State Variables, Parameters und Interfaces in Tabelle 14 dargestellt sind (eine Alternative zu diesem Modell ist in Anhang Q enthalten). Wie bisher wurde bei der Modellierung ein flussorientierter Ansatz verfolgt, und es wurden folgende zusätzliche Annahmen getroffen:

1. Die zu kombinierenden Objekte können gleichzeitig in die Komponente aufgenommen werden.
2. Die Eingangsgeschwindigkeiten v_i sind voneinander unabhängig.
3. Der Kombinationsprozess findet ohne Totzeit statt ($t_d=0$).

Während Annahmen 1. und 2. dazu dienen, dass Maschinen aus Lebensmittelverpackungsanlagen, die diesen Annahmen widersprechen, nicht ungewollt miteinbezogen werden (falls solche Maschinen existieren, muss für sie ein eigenes Komponentenmodell erstellt werden), ist Annahme 3. eine reine Designentscheidung. Die CE-Komponente führt mit der Kombina-

tion einen rein funktionellen Schritt in dem Modell durch und ist keine real existierende Komponente. Sie kann nur in Zusammenhang mit MT-Komponenten auftreten (und ersetzt diese nicht). Die Totzeit für den Prozess-Schritt ist dabei in den MT-Komponenten bereits enthalten.

Tabelle 14: State Variables, Parameters und Interfaces des CE

Combine Element		
STATE VARIABLES		DOMAINS
B_i	Anzahl gespeicherter Objekte des Typs $in_i.type$	$=\{0, \dots, n_i\}$
v_i	Geschwindigkeit des Objektflusses in die Komponente am Eingang in_i [m/s]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
v_{out}	Geschwindigkeit des Objektflusses aus der Komponente [m/s]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
PARAMETERS		
n_i	Anzahl der Objekte am Eingang in_i ($in_i.type$) die ein Objekt am Ausgang out ($out.type$) bilden	$=\{\mathbb{N}^+\}$
INTERFACES		
$in_i.A_e$	Projektionsfläche der Objekte [m ²]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
$out.A_e$	Projektionsfläche der Objekte [m ²]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
$in_i.d_0$	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung [m]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
$out.d_0$	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung [m]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
$in_i.q_{pot}$	potentielle Flüsse in CE [$\frac{elements}{s}$]	$=\{0, \dots, v_{in} / in.d_0\}$
$out.q_{pot}$	potentieller Fluss aus CE [$\frac{elements}{s}$]	$=\{0, \dots, -v_{out} / out.d_0\}$
$in_i.q_{act}$	aktuelle Flüsse in CE [$\frac{elements}{s}$]	$=\{0, \dots, v_{in} / in.d_0\}$
$out.q_{act}$	aktueller Fluss aus CE [$\frac{elements}{s}$]	$=\{0, \dots, -v_{out} / out.d_0\}$
$in_i.type$	Objekttyp am Eingang in_i	$=\{objects\}$ in der Anlage vorkommende
$out.type$	Objekttyp am Ausgang	$=\{objects\}$ Objekte, z. B. Flaschen, Kästen

Aufgrund der starken Ähnlichkeit (vor allem aufgrund der Verwendung gleicher Interfaces) mit den bereits existierenden Komponenten kann das CE problemlos über die TC mit anderen MT, CE oder SE (siehe unten) verbunden werden.

Das Modell für den *okay*-Modus des CE lässt sich folgendermaßen formalisieren:

$$\forall i \text{ in}_i \cdot q_{pot}(t) = \begin{cases} \frac{v_i(t)}{\text{in}_i \cdot d_0} & \text{if } B_i(t) < n_i \\ \min\left(\frac{v_i(t)}{\text{in}_i \cdot d_0}, -\text{out} \cdot q_{act}(t) * n_i\right) & \text{if } B_i(t) = n_i \end{cases}$$

Formel 4.50

$$\forall i \frac{dB_i}{dt} = \text{out} \cdot q_{act} * n_i + \text{in}_i \cdot q_{act}$$

Formel 4.51

$$-\text{out} \cdot q_{pot}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } \exists i B_i(t) < n_i \\ \frac{v_{out}(t)}{\text{out} \cdot d_0} & \text{if } \forall i B_i(t) = n_i \end{cases}$$

Formel 4.52

Das bedeutet, dass der potentielle Fluss in die Komponente von der Geschwindigkeit des Flusses der einzelnen Objekttypen in die Komponente abhängt, solange deren theoretische Puffer n_i , deren Größen der Anzahl der für die Kombination benötigten Elemente entsprechen, nicht gefüllt sind. Sind die Puffer voll und damit die zu kombinierenden Elemente in ausreichender Menge vorhanden, so wird der Fluss in die Komponente zusätzlich vom Fluss aus der Komponente begrenzt. Der potentielle Fluss aus der Komponente ist so lange Null, wie nicht ausreichend Objekte für den Kombinations-Schritt zur Verfügung stehen. Sind die benötigten Objekte vorhanden, hängt er von der Output-Geschwindigkeit der Komponente ab.

Separate Element (SE)

Das SE wurde als Gegenstück zum CE modelliert, da in Lebensmittelverpackungsanlagen bestehende Packungen auch wieder in ihre Komponenten aufgetrennt werden (z. B.: das Trennen eines Leergutkastens in Flaschen und Kasten). Im Wesentlichen handelt es sich daher um eine Inversion des CE, was auch in Tabelle 15 und den Annahmen zu dieser Komponente deutlich wird:

1. Die zu trennenden Objekte können die Komponente gleichzeitig verlassen.
2. Die Ausgangsgeschwindigkeiten v_i sind voneinander unabhängig.
3. Der Trennungsprozess findet ohne Totzeit statt ($t_d=0$).

Auf eine nähere Erläuterung wird aus Analogiegründen zu CE verzichtet.

Tabelle 15: State Variables, Parameters und Interfaces des SE

Separate Element		
STATE VARIABLES		DOMAINS
B_i	Anzahl gespeicherter Objekte des Typs $out_i.type$	$=\{0, \dots, n_i\}$
v_i	Geschwindigkeit des Objektflusses aus der Komponente am Ausgang out_i [m/s]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
v_{in}	Geschwindigkeit des Objektflusses in die Komponente [m/s]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
PARAMETERS		
n_i	Anzahl der Objekte am Ausgang out_i ($out_i.type$) die aus einem Objekt am Eingang in ($in.type$) gebildet werden	$=\{\mathbb{N}^+\}$
INTERFACES		
$in.A_e$	Projektionsfläche der Objekte [m^2]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
$out_i.A_e$	Projektionsfläche der Objekte [m^2]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
$in.d_0$	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung [m]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
$out_i.d_0$	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung [m]	$=\{\mathbb{R}_0^+\}$
$in.q_{pot}$	potentieller Fluss in SE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, v_{in} / in.d_0\}$
$out_i.q_{pot}$	potentielle Flüsse aus SE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, -v_i / out_i.d_0\}$
$in.q_{act}$	aktueller Fluss in SE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, v_{in} / in.d_0\}$
$out_i.q_{act}$	aktuelle Flüsse aus SE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, -v_i / out_i.d_0\}$
$out_i.type$	Objekttypen am Ausgang out_i	$=\{objects\}$ in der Anlage vorkommende
$in.type$	Objekttypen am Eingang	$=\{objects\}$ Objekte, z. B. Flaschen, Kästen

Das Modell für den *okay*-Modus des SE lässt sich folgendermaßen formalisieren:

$$in. q_{pot}(t) = \begin{cases} \frac{v_{in}(t)}{in. d_0} & \text{if } \forall i B_i(t) < n_i \\ \min\left(\frac{v_{in}(t)}{in. d_0}, \frac{-out_i. q_{act}(t)}{n_i}\right) & \text{if } \exists i B_i(t) = n_i \end{cases}$$

Formel 4.53

$$\forall i \frac{dB_i}{dt} = out_i. q_{act} + in. q_{act} * n_i$$

Formel 4.54

$$\forall i - out_i. q_{pot}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } B_i(t) < n_i \\ \frac{v_i(t)}{out_i. d_0} & \text{if } B_i(t) = n_i \end{cases}$$

Formel 4.55

Auf eine nähere Erläuterung wird aus Analogiegründen zu CE verzichtet.

Simulation zur Modellvalidierung

Um die Komponenten zu validieren, wurden ihre Modelle in MATLAB/Simulink[®] erstellt und verschiedenen Simulationsversuchen unterzogen. Bei MATLAB/Simulink[®] handelt es sich um ein leistungsfähiges Tool des Unternehmens „The Mathworks“, das auch schon in anderen Bereichen, wie z. B. bei der Simulation einer konventionellen Stauregelung von Verpackungsmaschinen, seine prinzipielle Anwendbarkeit für Probleme aus Abfüll- und Verpackungsanlagen gezeigt hat [28]. MATLAB[®] leitet sich von dem Wort **Matrix Laboratory** ab, was darauf hindeutet, dass die Umgebung für die Berechnung von Matrizen entwickelt wurde. Simulink[®] stellt dabei eine graphische Oberfläche für das Modellieren von (Differential-) Gleichungen mithilfe hierarchisch organisierter Blöcke dar. Hiermit können komplexe Modelle aufgebaut und mithilfe eines Differentialgleichungslösers zeitlich diskretisiert gelöst werden. In der vorliegenden Arbeit wurde das Runge-Kutta-Verfahren mit konstanten Zeitschritten von 1 s zur Lösung der Differentialgleichungen ausgewählt. Für nähere Informationen siehe z. B. [222].

Ein Beispiel für das Simulink-Modell des MT zeigt Bild 56. Dabei ist das Modell zur besseren Übersichtlichkeit in einzelne Subsysteme (entsprechen im Wesentlichen den einzelnen Formeln) gegliedert. Bild 57 zeigt das Subsystem für die Berechnung des Wertes für die Variable B der Objekte im MT.

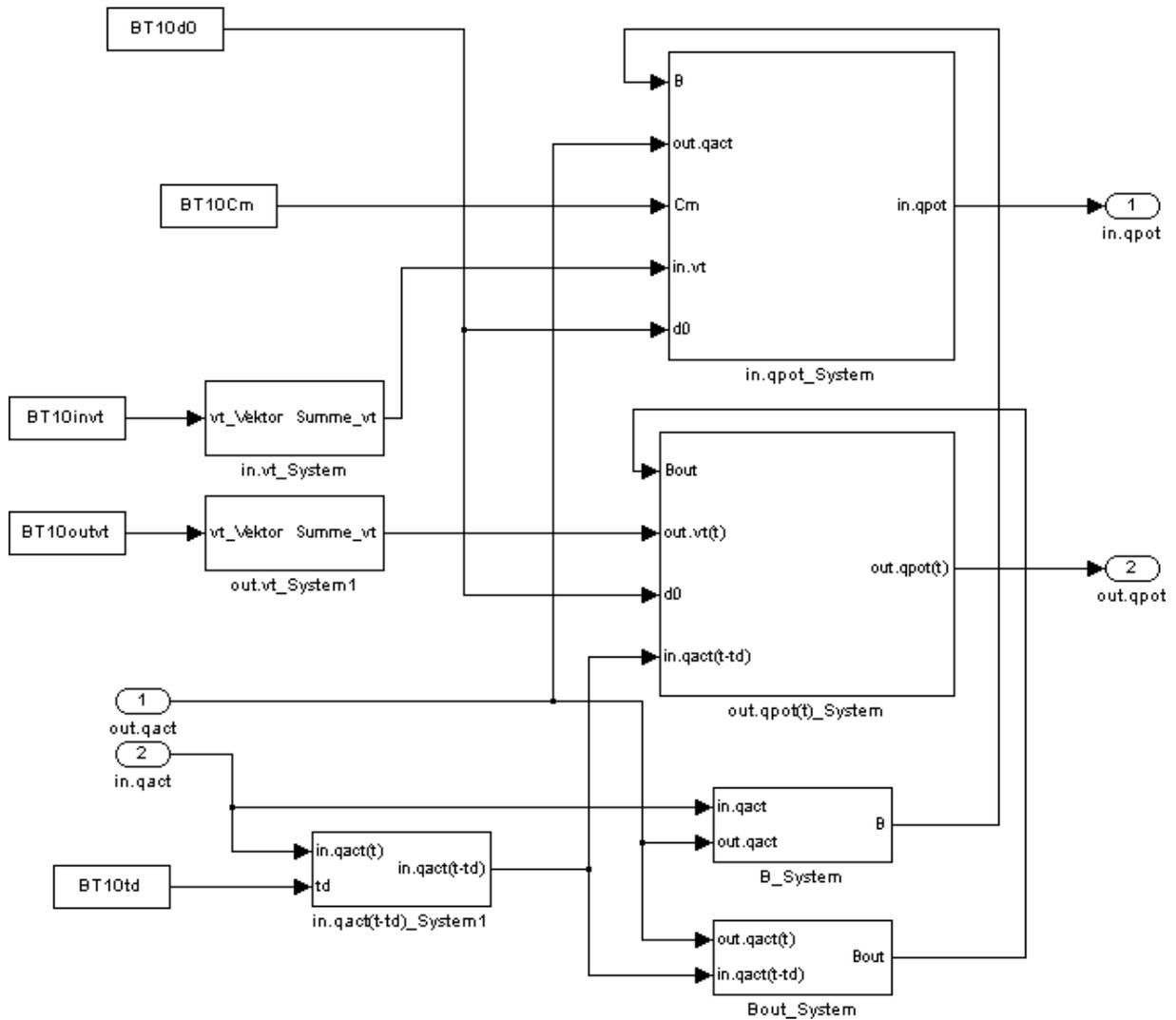


Bild 56: Simulink Modell der Komponente MT

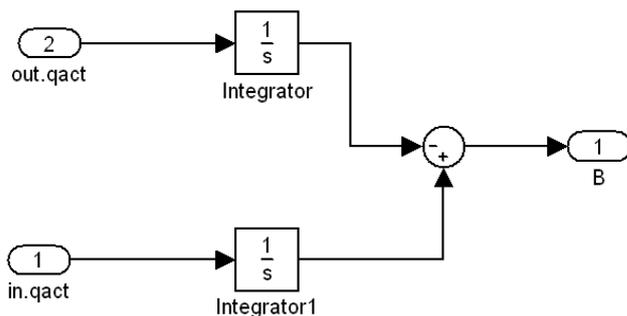


Bild 57: Simulink Modell des B-Subsystems

Bei den Simulationsstudien wurden sowohl die einzelnen Komponenten untersucht als auch ein Simulationsmodell der Beispielanlage A, die aus den Einzelkomponenten nachgebildet wurde (vgl. Anhang P). Neben dem generellen Verhalten der Komponenten und der Modellanlage wurden vor allem die Stillstandsfortpflanzung durch Stau- und Mangelfortpflanzungen validiert. Die Ergebnisse der Validierung werden in Kapitel 5.2 erläutert und diskutiert.

4.2.2.2 Qualitative Modelle und Herausfaktorisieren des Zeitbezugs für die Nutzung einer kommerziellen Diagnosemaschine

Für die Verwendung der kommerziellen Diagnosemaschine RAZ'R der Firma OCC'M Software GmbH mussten die numerischen Modelle in passende qualitative Modelle umgewandelt werden. Dies wurde durch das MQM durchgeführt.

Qualitative Modelle

Qualitative Modelle zielen darauf ab, technische Systeme nicht mathematisch, sondern auf einer konzeptionellen, begrifflichen Ebene zu betrachten [61]. Zusätzlich wird das Schließen mit unvollständiger Information vereinfacht.

Hierzu wird eine Abstraktion des Verhaltensmodells durchgeführt. Häufig wird als Abstraktion die Repräsentation der Variablen oder ihrer Ableitungen durch reine Vorzeichen genutzt [268]. Eine weitere Möglichkeit ist, über das Vorzeichen die Abweichung einer aktuellen Variablen x_{act} zu ihrem erwarteten Referenzwert x_{ref} darzustellen:

$$x_{ref}: [\Delta x] := x_{act} - x_{ref}$$

Formel 4.56

Dadurch wird ausgedrückt, ob ein Wert höher, niedriger oder genau wie erwartet ist [61].

Es wurden sowohl ein auf Vorzeichen basierendes als auch ein auf qualitativen Abweichungen basierendes, abstraktes Modell erstellt. Für die vorliegende Arbeit wurde das Vorzeichen basierende Modell verwendet. Das Abweichungs-Modell ist in [265] dargestellt.

Ein erstes, aus dem numerischen Modell abgeleitetes, auf Vorzeichen basierendes Modell zur Detektion von Stillständen einer „zentralen“ MT (z. B.: einer Füll- und Dosiermaschine in einer Lebensmittelverpackungsanlage) aufgrund von Fehlern anderer Komponenten wird im Folgenden dargestellt. Da es sich um ein qualitatives Modell handelt, können Konstanten bei den Formeln für die Modellableitung vernachlässigt werden (vgl. auch [265]).

MT ($|x|$ bezeichnet das Vorzeichen von x , * steht für keine Vorzeichen-Beschränkung)

$$(1) \quad \begin{aligned} |in.q_{pot}(t)| &= |v_{in}(t)| && \text{if } C_{MT-B}(t) > 0 \\ |in.q_{pot}(t)| &= \min(|v_{in}(t)|, |out.q_{act}(t)|) && \text{if } C_{MT-B}(t) = 0 \end{aligned}$$

$ in.q_{pot}(t) $	$ v_{in}(t) $	$ out.q_{act}(t) $	$C_{MT-B}(t)$
0	0	*	+
+	+	*	+
+	+	+	0
0	0	+	0
0	+	0	0

$$(3) \quad \begin{aligned} |\text{out}.q_{\text{pot}}(t)| &= |v_{\text{out}}(t)| && \text{if } B_{\text{out}}(t)-1 \geq 0 \\ |\text{out}.q_{\text{pot}}(t)| &= \min(|\text{in}.q_{\text{act}}(t-t_d)|, |v_{\text{out}}(t)|) && \text{if } B_{\text{out}}(t)-1 < 0 \end{aligned}$$

$ \text{out}.q_{\text{pot}}(t) $	$ v_{\text{out}}(t) $	$ \text{in}.q_{\text{act}}(t-t_d) $	$B_{\text{out}}(t)-1$
0	0	*	0
0	0	*	+
+	+	*	0
+	+	*	+
0	0	+	-
0	+	0	-
+	+	+	-

TC ($|x|$ bezeichnet das Vorzeichen von x , * steht für keine Vorzeichen-Beschränkung)

$$(5) \quad \begin{aligned} |\text{MT}_n.\text{out}.q_{\text{act}}(t)| &= \min(|\text{MT}_{n+1}.\text{in}.q_{\text{pot}}(t)|, |\text{MT}_n.\text{out}.q_{\text{pot}}(t)|) \\ |\text{MT}_n.\text{out}.q_{\text{act}}(t)| &= |\text{MT}_{n+1}.\text{in}.q_{\text{act}}(t)| \end{aligned}$$

$ \text{MT}_n.\text{out}.q_{\text{act}}(t) $	$ \text{MT}_{n+1}.\text{in}.q_{\text{pot}}(t) $	$ \text{MT}_n.\text{out}.q_{\text{pot}}(t) $
0	0	+
0	+	0
+	+	+

Das Modell ist auch für die *CE* und *SE* Komponente gültig, wenn zusätzlich für diese Komponenten die Bedingung eingeführt wird, dass die einzelnen Objektströme in die Komponente (bei *CE*) bzw. aus ihr heraus (bei *SE*) das gleiche Vorzeichen haben müssen (z. B.: $|in_1.q_{pot}| = |in_2.q_{pot}| = \dots = |in_i.q_{pot}|$ bei *CE*). Hierdurch werden durch den Mangel an einem Input von *CE* (bzw. den Stau an einem Output bei *SE*) auch die anderen Inputs (bzw. Outputs) gestoppt.

Dieses Modell besitzt jedoch keinen Zeitbezug. Dieser wird durch ein zusätzliches Tool, den sogenannten „Temporal Predictor“, eliminiert (siehe unten).

Ein Beispiel für die Inferenz auf Basis der Beobachtungen verdeutlicht das Funktionsprinzip: Betrachtet man eine *MT* Komponente, deren Eingangsgeschwindigkeit gleich ihrer Ausgangsgeschwindigkeit ist ($v_{in}(t)=v_{out}(t)$), die zwar einen Output produziert ($|\text{MT}_n.\text{out}.q_{act}(t)|=+$), jedoch über keinen Input verfügt ($|\text{MT}_n.\text{in}.q_{act}(t)|=0$), wird durch die im Modell formulierten Bedingungen folgende Schlussfolgerung produziert (vgl. auch [265]):

$$|MT_n.out.q_{act}(t)| = + (5) \Rightarrow |MT_n.out.q_{pot}(t)| = + (3) \Rightarrow |MT_n.v_{out}(t)| = |MT_n.v_{in}(t)| = +$$

$$|MT_n.out.q_{act}(t)| = + \wedge |MT_n.v_{in}(t)| = + (1) \Rightarrow |MT_n.in.q_{pot}(t)| = +$$

$$|MT_n.in.q_{pot}(t)| = + \wedge |MT_n.in.q_{act}(t)| = 0 (5) \Rightarrow |MT_{n-1}.out.q_{pot}(t)| = 0$$

Wenn MT_{n-1} betriebsbereit ist, also $|MT_{n-1}.v_{out}(t)| = +$, dann ergibt sich

$$|MT_{n-1}.out.q_{pot}(t)| = 0 \wedge |MT_{n-1}.v_{out}(t)| = + (3) \Rightarrow |MT_n.in.q_{act}(t-t_d)| = 0$$

Dies bedeutet, dass aus dem qualitativen Modell, ohne genauere Kenntnis der Pufferfüllungsgrade o. Ä., eine Fortpflanzung der Lücke ableitbar ist.

Anpassung der Softwarearchitektur für das Herausfaktorisieren des Zeitbezugs

Der Softwareentwurf und die Umsetzung der Modelle wurde durch das MQM unter Einsatz des kommerziellen MBD-Tools RAZ'R der Firma OCC'M Software GmbH als Diagnosemaschine durchgeführt. Ähnlich wie auch in [221] beschrieben, wurde die eigentliche Diagnosemaschine von der zeitlichen Betrachtung getrennt.

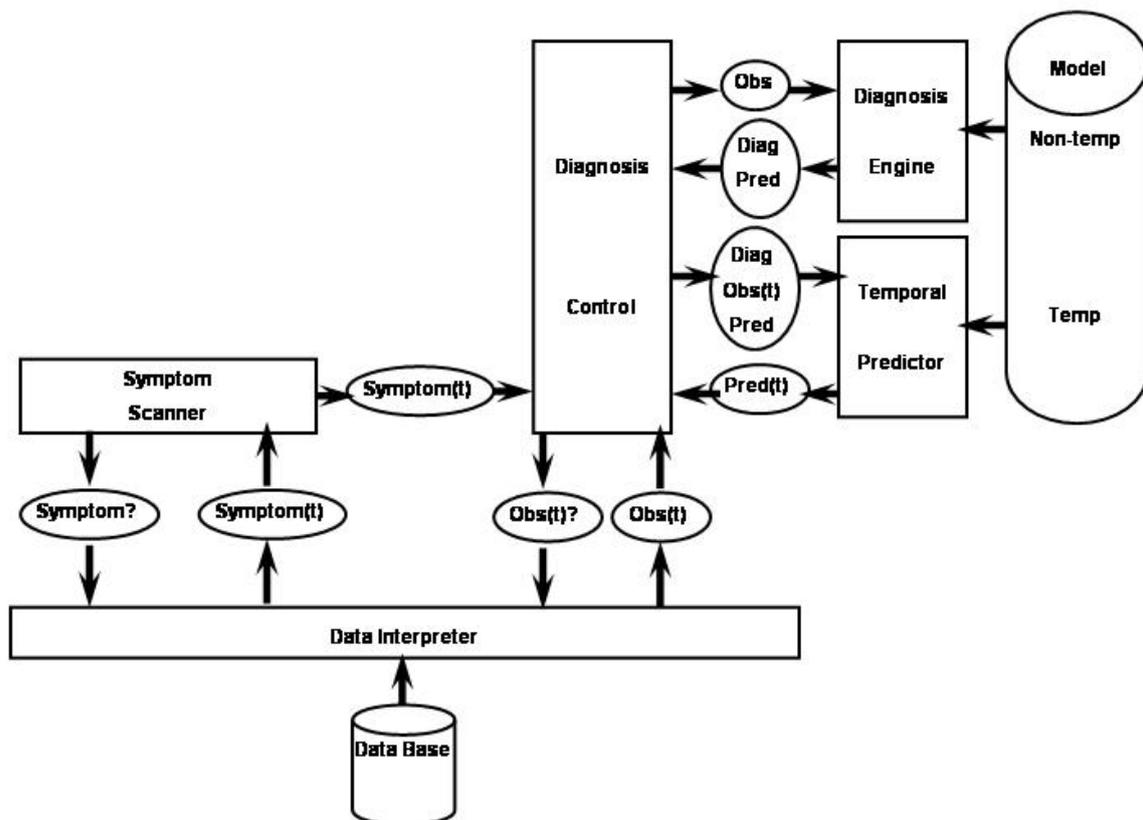


Bild 58: Softwarearchitektur des Diagnosetools des MQM (Verfeinerung der Darstellung aus [264])

Der zeitliche Versatz bei der Fortpflanzung von Stillständen im Modell wird durch den „Temporal Predictor“ eliminiert. Mithilfe einer zusätzlichen Komponente können die Beobachtungen aus der Datenbankschnittstelle extrahiert werden, die zeitlich zu den aus dem Modell berechneten Ergebnissen passen. Die Ergebnisse des „Temporal Predictors“ und die Beobachtungen können somit der Diagnosemaschine so zur Verfügung gestellt werden, als

lägen Ursache und Wirkung des Zentralaggregatsstillstands zum gleichen Zeitpunkt vor. Mithilfe dieser zeitunabhängigen Daten kann die Diagnosemaschine daher, wie oben dargestellt, ohne Berücksichtigung zeitlicher Einflüsse ein Diagnoseergebnis mit dem qualitativen Modell berechnen.

Eine graphische Darstellung des Softwareentwurfs findet sich in Bild 58. Auf Details der Umsetzung wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen (vgl. hierzu z. B. [264]), da diese ausschließlich durch das MQM erarbeitet wurde.

Die Ergebnisse des modellbasierten Ansatzes werden in Kapitel 5.3.2 diskutiert.

5. Ergebnisse zur Methodvalidierung und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse und die Bewertung der ausgewählten und entwickelten Methoden und der entwickelten Modelle und Algorithmen dargestellt. Ferner wird diskutiert, inwieweit mit diesen Ansätzen die in Kapitel 1 vorgestellten Ziele erreicht wurden.

5.1 Sensorsystem zur Objektzählung

Der Prototyp des Sensorsystems wurde sowohl hinsichtlich seiner Signalhaltezeit optimiert als auch bei unterschiedlichen Kettengeschwindigkeiten der Transporteure in der Versuchsanlage getestet (vgl. auch Kapitel 3.4.2).

5.1.1 Ergebnisse und Bewertung

Die Untersuchungen zur Signalhaltezeit wurden in Fünffachbestimmungen bei einer Kettengeschwindigkeit von 0,3 m/s durchgeführt. Hierzu wurde die Verzögerungszeit für die ersten Versuche auf 10 ms festgelegt und bei den folgenden in Schritten von 1 ms erhöht. Unterhalb der 10 ms wurden keine Verzögerungszeiten untersucht, da die maximale Zykluszeit des Steuerungsprogramms bei ca. 9 ms lag. Werte unterhalb der Zykluszeit ergeben keinen Sinn, da die Aktualisierung der Variablen nur einmal pro Zyklus erfolgt. Als theoretische Obergrenze wurde die berechnete, kürzeste Kontaktzeit ausgewählt, da Signalhaltezeiten darüber dazu führten, dass Flaschen, die mit der minimalen Kontaktzeit das Sensorsystem passieren, nicht gezählt würden. Die Ergebnisse dieser Testreihen zeigt Bild 59.

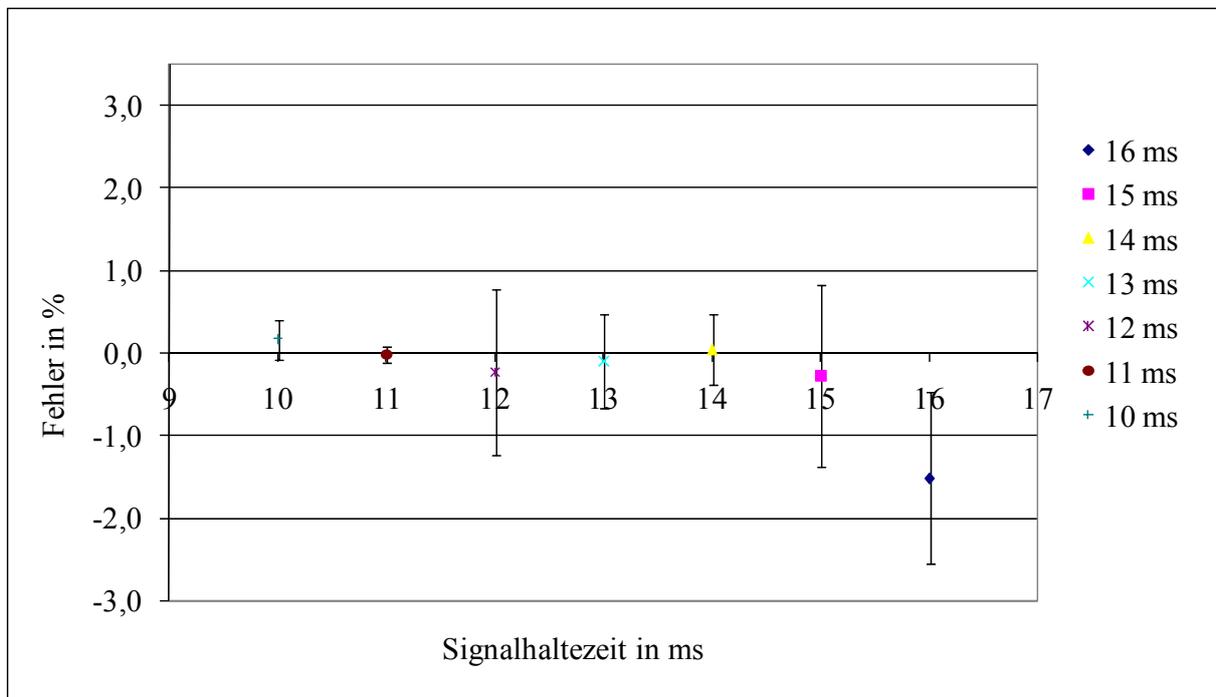


Bild 59: Ergebnisse der Versuche zur Signalhaltezeit bei einer Fünffachbestimmung mit 1000 Flaschen (Vertrauensbereich 95 %)

Wie aus Bild 59 ersichtlich, wurden die Versuche bis zu einer Verzögerungszeit von 16 ms durchgeführt. Bei diesem Wert gab es die erste signifikante Abweichung ins Negative, so dass

davon ausgegangen wurde, dass die oben beschriebene Annäherung an die minimale Kontaktzeit erreicht wurde (die theoretisch errechnete, minimale Kontaktzeit betrug 18,4 ms; vgl. Kapitel 3.4.2). Im Bereich von 10-15 ms erscheinen alle Verzögerungszeiten als grundsätzlich geeignet.

Aufgrund eines vorhandenen Timerbausteins in der Maschinensteuerung wurde für die Versuche zum Einfluss der Geschwindigkeit eine Verzögerungszeit von 10 ms gewählt. Die Messungen wurden ebenfalls als Fünffachbestimmung durchgeführt.

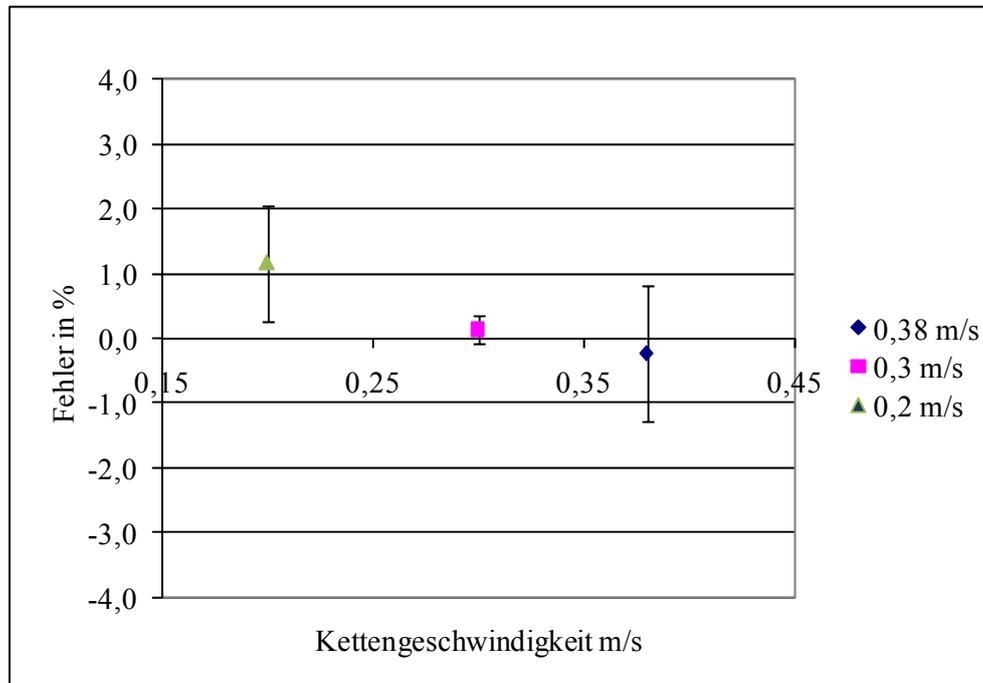


Bild 60: Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen Fördergeschwindigkeiten bei einer Fünffachbestimmung mit 1000 Flaschen (Vertrauensbereich 95 %)

Aus den Ergebnissen in Bild 60 wird deutlich, dass die Geschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf das Sensorergebnis hat. Es ist lediglich eine leichte Tendenz zu beobachten, dass bei niedrigeren Geschwindigkeiten zu viele und bei hohen Geschwindigkeiten zu wenig Flaschen gezählt werden.

5.1.2 Diskussion zu 5.1

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Algorithmus für das Behälterzählen im Pulk mit Hilfe von Standardsensoren grundsätzlich geeignet ist. Der Prototyp mit den optischen Reflektastern ist jedoch sehr kritisch zu beurteilen. Zum einen liegen die Fehler bei manchen Geschwindigkeiten im Mittel bei knapp über einem Prozent, was für ein Sensorsystem, das permanent im Einsatz ist, als zu hoch zu bewerten ist. Außerdem traten bei den Versuchen vereinzelt erhebliche statistische Ausreißer auf, deren Herkunft nicht abschließend geklärt werden konnte. Zum anderen sind die Kosten für den Prototyp sehr hoch, obwohl dieser nur für einen relativ schmalen Puffer und für das Zählen verschlossener Objekte konzipiert wurde.

Eine Veränderung der Lichtaustrittshülse, wie sie in Kapitel 3.4 vorgestellt wurde, kann sehr wahrscheinlich die Erkennungsgenauigkeit steigern, da bei der länglichen Optik und der da-

mit verbundenen größeren Kontaktfläche wackelnde Flaschen seltener zu Doppelzählungen führen. Eine weitere Möglichkeit, das entwickelte System zu nutzen, ist die Identifikation und der Einsatz anderer, preiswerterer Sensoren, die den unter 3.4 dargelegten Anforderungen entsprechen.

Zukünftige Arbeiten sollten die Verwendung von Kameras, die im weitesten Sinne auch eine Form optischer Sensoren darstellen, untersuchen. Dabei ist der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus jedoch nicht verwendbar.

5.2 Simulationsstudien des Komponenten-orientierten Modells

Wie unter 4.2.2 bereits angedeutet, wurden die einzelnen Komponenten in den Simulationsstudien isoliert und im Verbund betrachtet. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

5.2.1 Ergebnisse der Einzelkomponenten

Der Test der Einzelkomponenten reproduzierte das erwartete Verhalten und soll an einem Beispiel der MT Komponente, die in diesem Fall als Transporteur mit Pufferfunktion betrachtet wird, erläutert werden.

Bild 61 zeigt die zeitliche Entwicklung der Anzahl B der Objekte in einer Komponente MT in Abhängigkeit variierender Ein- und Ausgangsgeschwindigkeiten v_{in} und v_{out} . Dabei werden keine Beschränkungen des Flusses durch angrenzende Komponenten, sondern lediglich durch die Geschwindigkeiten angenommen (isolierte, kontextfreie Betrachtung).

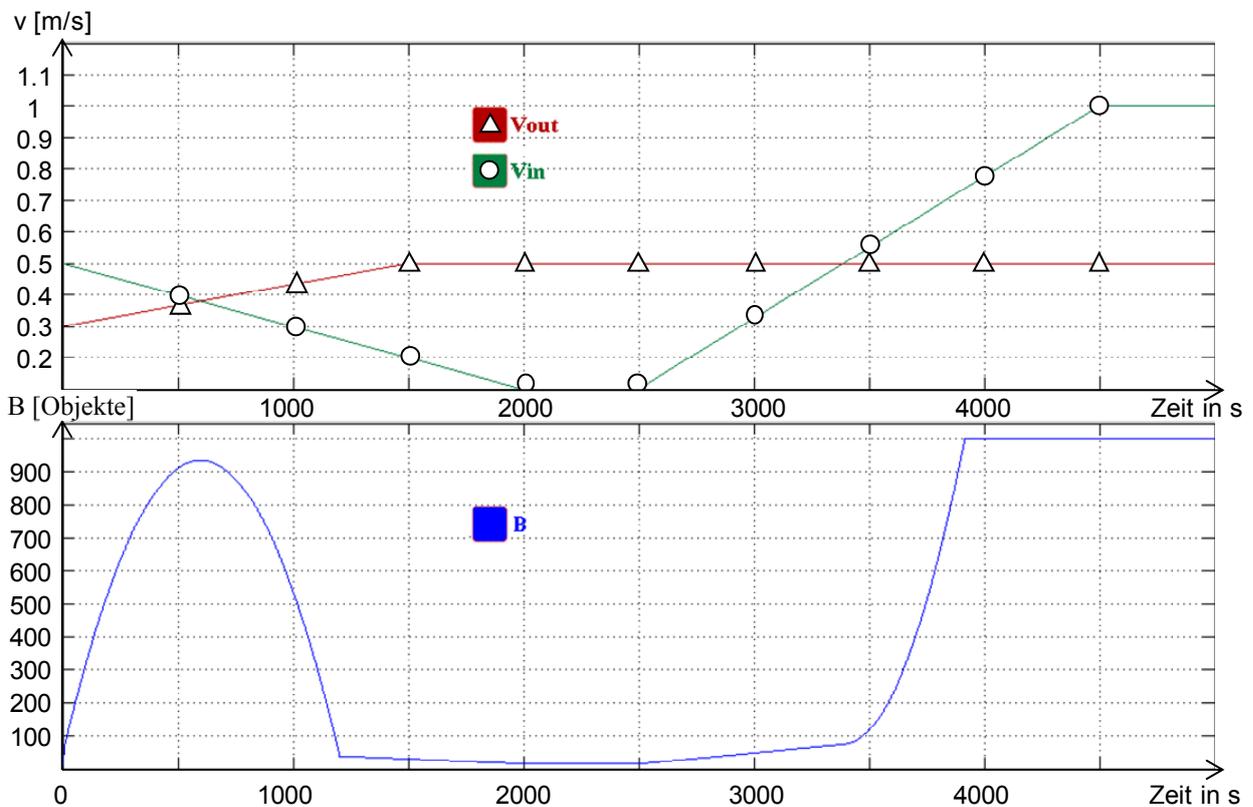


Bild 61: Verhalten der gepufferten Objekte B in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten v_{in} und v_{out}

Wie aus der Graphik ersichtlich, füllt und leert sich MT in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten. In dem Moment, in dem die Eingangsgeschwindigkeit auf ihr Minimum 0,1 m/s absinkt, die Ausgangsgeschwindigkeit jedoch weiterhin auf einem hohen Niveau bleibt, wird der Puffer fast leergezogen. Jedoch verbleibt eine geringe Menge an Objekten auf dem Transporteur. Es handelt sich dabei um jene, die noch nicht für eine größere Dauer als die Totzeit von MT auf dem Puffer sind und somit noch nicht aus ihm heraus befördert werden können. Wird die Eingangsgeschwindigkeit dann stark erhöht, füllt sich der Puffer bis zu seiner Kapazitätsgren-

ze (1000 Objekte). Ein weiteres Erhöhen der Geschwindigkeiten hat keinen Effekt, was man sich in der Realität als unter einem Objektpulk gleitende Ketten vorstellen kann.

Nachdem alle vier Komponenten (MT, TC, CE und SE) in analoger Weise in verschiedenen Szenarien validiert wurden (vgl. Anhang R), lässt sich feststellen, dass die kontextfreie Modellierung der Komponenten erfolgreich war.

5.2.2 Ergebnisse des komplexen Modells aus Einzelkomponenten

In den folgenden Ergebnissen wird dargestellt, wie sich ein komplexes Modell einer Gesamtanlage verhält. Hierbei dient die untersuchte Anlage A als Vergleichsobjekt, wobei betont werden muss, dass aufgrund der Beobachtung der Anlage im laufenden Produktionsprozess keine „modellhaften“ Bedingungen simuliert werden konnten. Die Validierung konnte daher in erster Linie nur qualitativ und nicht quantitativ erfolgen (siehe unten). Eine vereinfachte Darstellung der Anlage zeigt Bild 62.

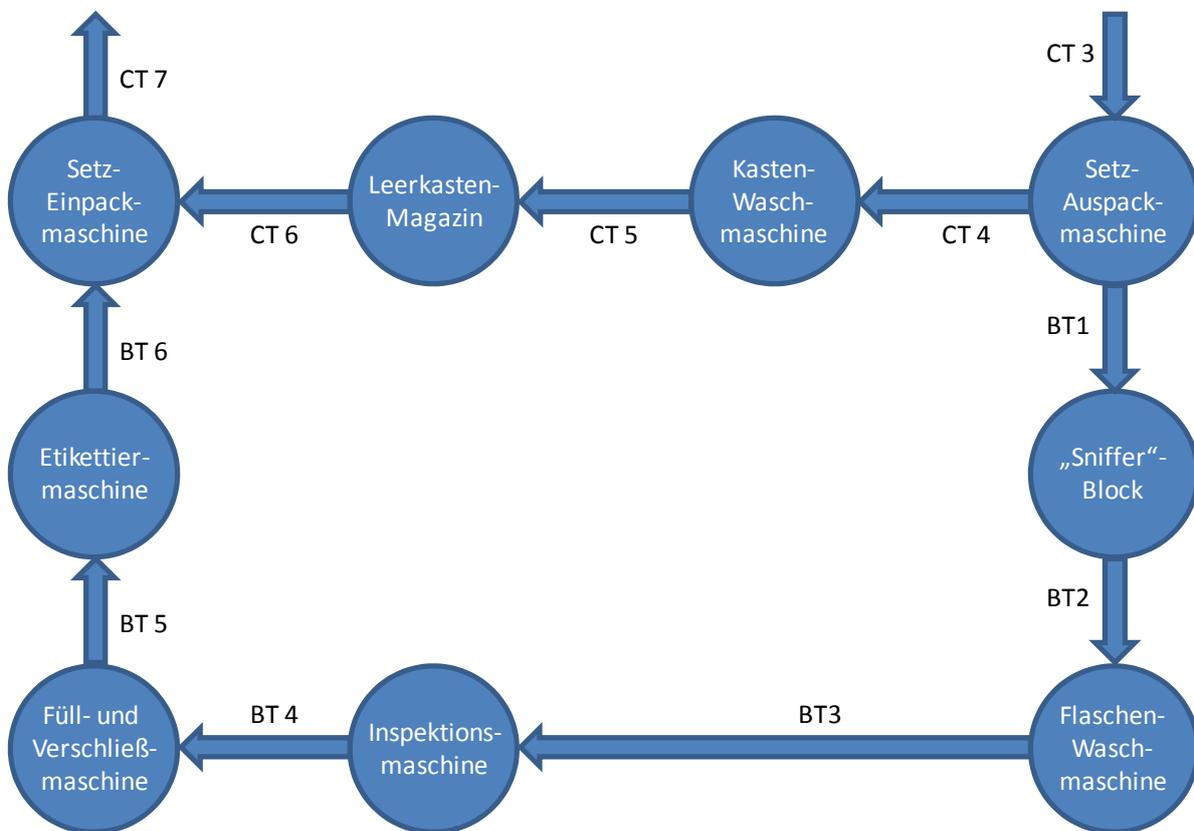


Bild 62: Vereinfachte Darstellung der modellierten Anlage (vgl. auch Bild 40)

In dieser Anlage wurden verschiedene Szenarien überprüft (siehe Anhang R), von denen im Folgenden einige exemplarisch vorgestellt werden.

5.2.2.1 Mangelsituation

Für den Test einer Mangelfortpflanzung wurde nach einer ungestörten Einlaufzeit von 3000 s, die vor allem dazu dient, die Puffer zu füllen und einen quasi-stationären Betrieb zu erreichen, am Maschinenblock aus Abschraubmaschine, Entetikettiermaschine und Fremdstoff-Inspektionsmaschine (Sniffer) des Systems ein Fehler simuliert (v_{in} und $v_{out} = 0$).

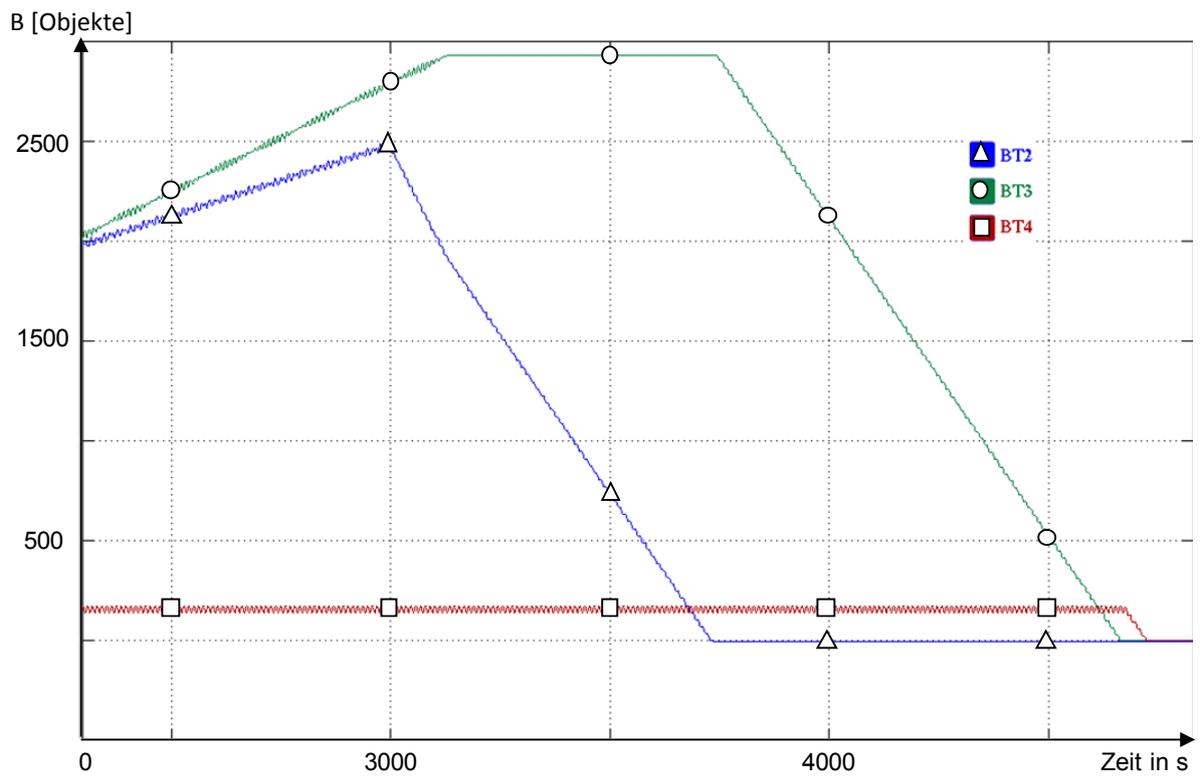
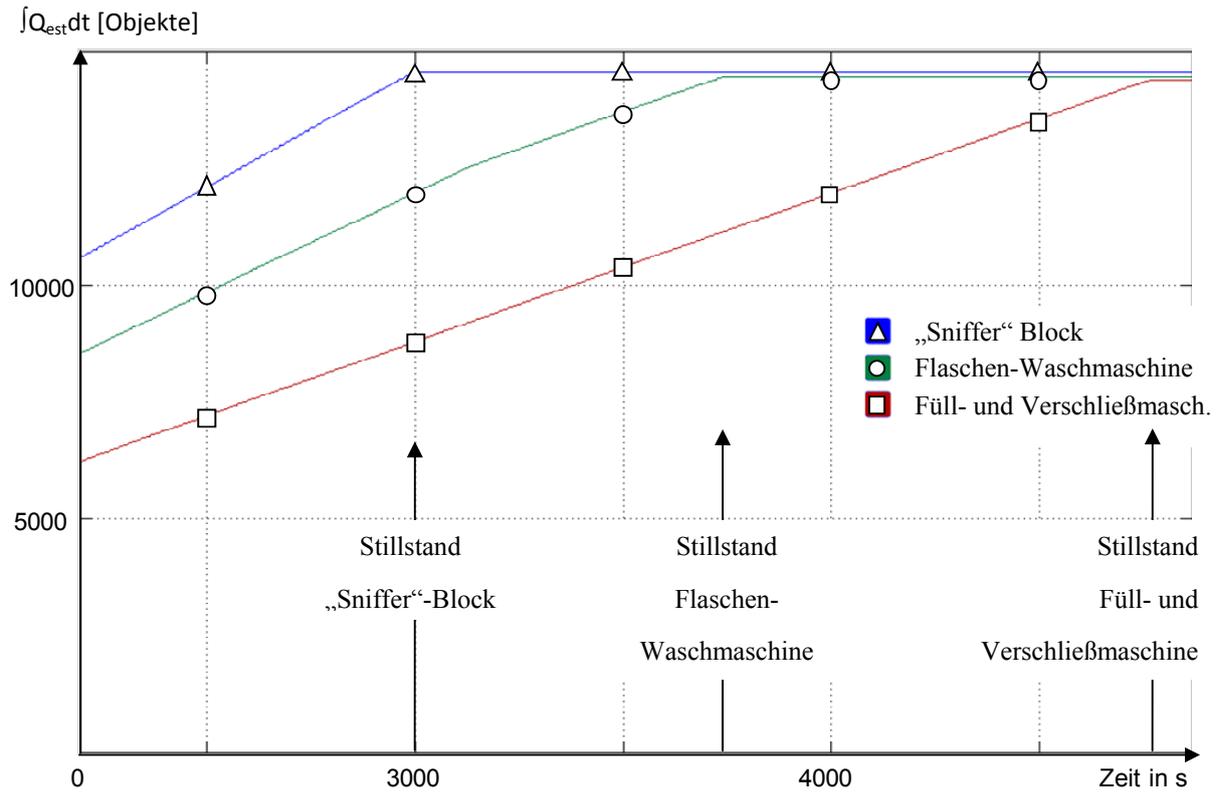


Bild 63: Kumulierte Anzahl verarbeiteter Objekte der Maschinen vor dem Zentralaggregat über der Zeit (oben) und Anzahl der Objekte auf den Transporteuren zwischen den Aggregaten über der Zeit (unten): BT2 Transporteur zwischen Sniffer-Block und Flaschen-Waschmaschine, BT3 Transporteur zwischen Flaschen-Waschmaschine und Inspektionsmaschine, BT4 Transporteur zwischen Inspektionsmaschine und Füll- und Verschleißmaschine

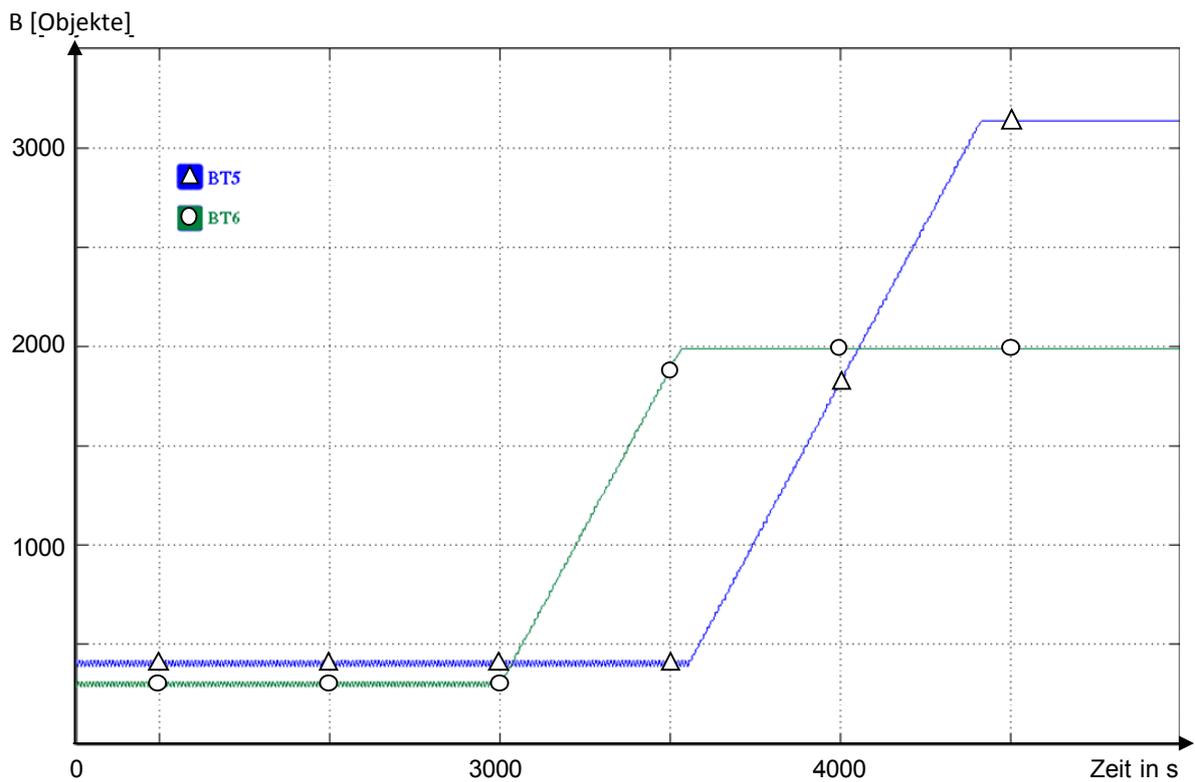
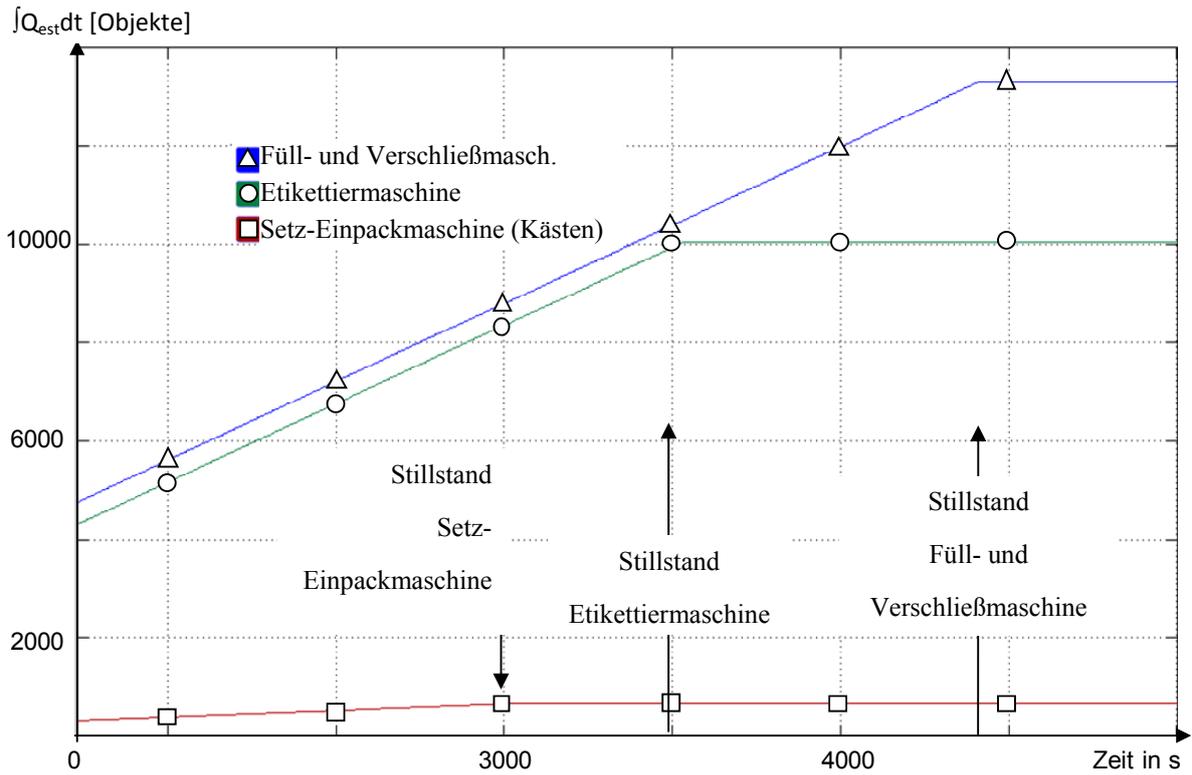


Bild 64: Kumulierte Anzahl verarbeiteter Objekte der Maschinen nach dem Zentralaggregat über der Zeit (oben) und Anzahl der Objekte auf den Transporteuren zwischen den Aggregaten über der Zeit (unten): BT5 Transporteur zwischen Füll- und Verschleißmaschine und Etikettiermaschine, BT6 Transporteur zwischen Etikettiermaschine und Setz-Einpackmaschine

Dies kann beispielsweise einen Bedienereingriff oder eine Not-Aus-Situation darstellen.

Wie aus den Diagrammen in Bild 63 ersichtlich, verhält sich das Modell wie erwartet. Nach dem Stillstand des im Diagramm mit Sniffer bezeichneten Blockaggregats (bestehend aus Abschrauber, Entetikettierer und Inspektionsmaschine „Sniffer“), nehmen die unterschiedlich stark gefüllten Puffer nacheinander ab, bis sich der Stillstand über die Flaschen-Waschmaschine bis zur Füll- und Verschließmaschine fortgepflanzt hat. Die kleinen Verzögerungen zwischen den komplett geleerten Puffern und dem Leerziehen der entsprechend folgenden resultiert aus den Totzeiten der Maschinen.

5.2.2.2 *Stausituation*

Für die Stausituation wurde ein Fehler an der Setz-Einpackmaschine simuliert. Analog zur Mangelsituation wurde auch hier nach einer Einlaufzeit (3000 s) der Fehler durch Null-Setzen der Geschwindigkeiten ausgelöst (v_{in} und $v_{out} = 0$).

Die Graphiken in Bild 64 zeigen den erwarteten Verlauf: Nach dem Stillstand der Setz-Einpackmaschine laufen die Puffer bis zu ihrer maximalen Kapazität voll und der Stau pflanzt sich über die Etikettiermaschine bis zum Zentralaggregat (Füllmaschine) fort.

5.2.2.3 *Stau-/Mangelfortpflanzung über die Nebenströme*

Um auch die Kombinations- und Zerlegungsprozesse zu überprüfen und zu zeigen, dass auch komplexe Stillstandsfortpflanzungen über mehrere Materialströme realistisch modelliert werden können, wurde im Kastenstrom nach einer Einlaufzeit ein Fehler der Kasten-Waschmaschine simuliert. Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen die Graphen in Bild 65. Dabei ist zu beachten, dass sich die Objekte und die daraus resultierenden Anzahlen unterscheiden (Flaschen/Kästen).

Entscheidend für das Verhalten ist das Leerkasten-Magazin. In diesem Versuch ist es vollständig gefüllt, wenn der Fehler an der Kasten-Waschmaschine einsetzt. Daher kann die Setz-Einpackmaschine ihre Funktion vorerst aufrecht erhalten, so dass sich die Transporteure vor der Setz-Einpackmaschine zunächst nicht füllen. In der anderen Richtung erzeugt der Fehler zügig einen Rückstau auf die Setz-Auspackmaschine. Daraus resultiert mit zeitlichem Versatz ein Mangel an Flaschen, der sich über CT4, BT1, BT2, BT3 und BT4 bis zum Zentralaggregat fortpflanzt (während BT5 nicht bis zur Kapazitätsgrenze gefüllt wird). Der Fehler hat sich damit schneller zu einem Mangel entwickelt als zu einem Rückstau.

In einem zweiten Versuchslauf wurde das Leerkasten-Magazin zum Zeitpunkt des Fehlers als nahezu leer simuliert (das Modell wurde um eine Ausschleusung erweitert, um nach der Einlaufzeit dieses Verhalten zu erzeugen; ähnliche Situationen kommen in der Praxis durch das manuelle Ab stapeln von Kästen aus der Anlage vor). Wie aus den Graphen in Bild 66 ersichtlich, ergibt sich der Stillstand der Füll- und Verschließmaschine diesmal durch einen Rückstau, da sich die Puffer vor der Setz-Einpackmaschine schneller füllen als die hinter der Setz-Auspackmaschine leergezogen werden.

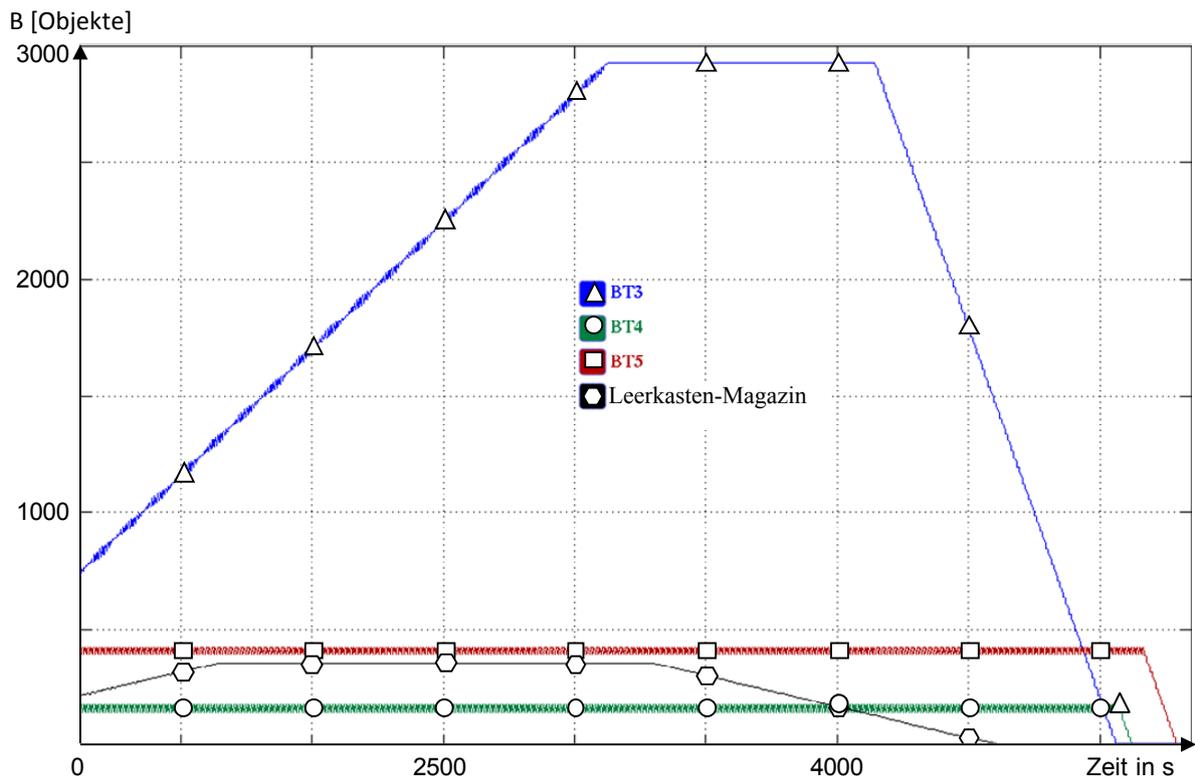
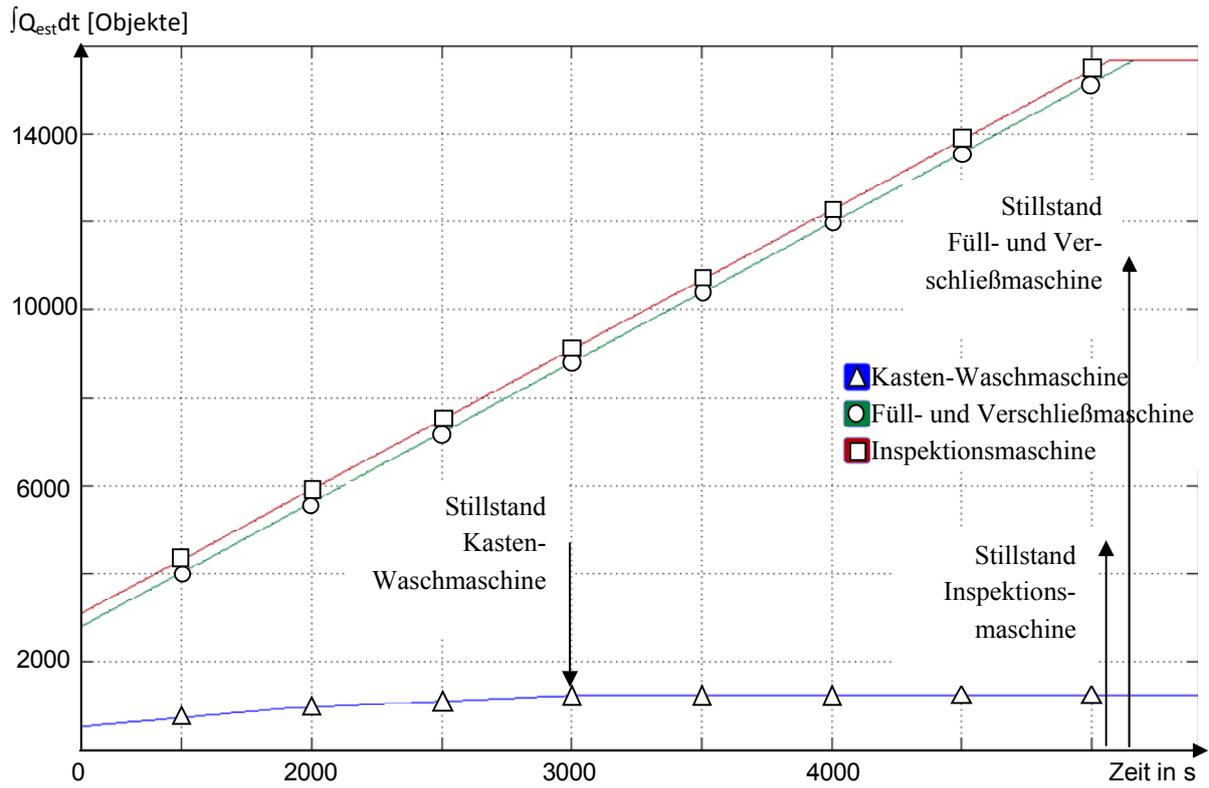


Bild 65: Kumulierte Anzahl verarbeiteter Objekte ausgewählter Maschinen über der Zeit (oben) und Anzahl der Objekte auf ausgewählten Transporteuren und im Leerkasten-Magazin über der Zeit (unten): BT3 Transporteur zwischen Flaschen-Waschmaschine und Inspektionsmaschine, BT4 Transporteur zwischen Inspektionsmaschine und Füll- und Verschleißmaschine, BT5 Transporteur zwischen Füll- und Verschleißmaschine und Etikettiermaschine

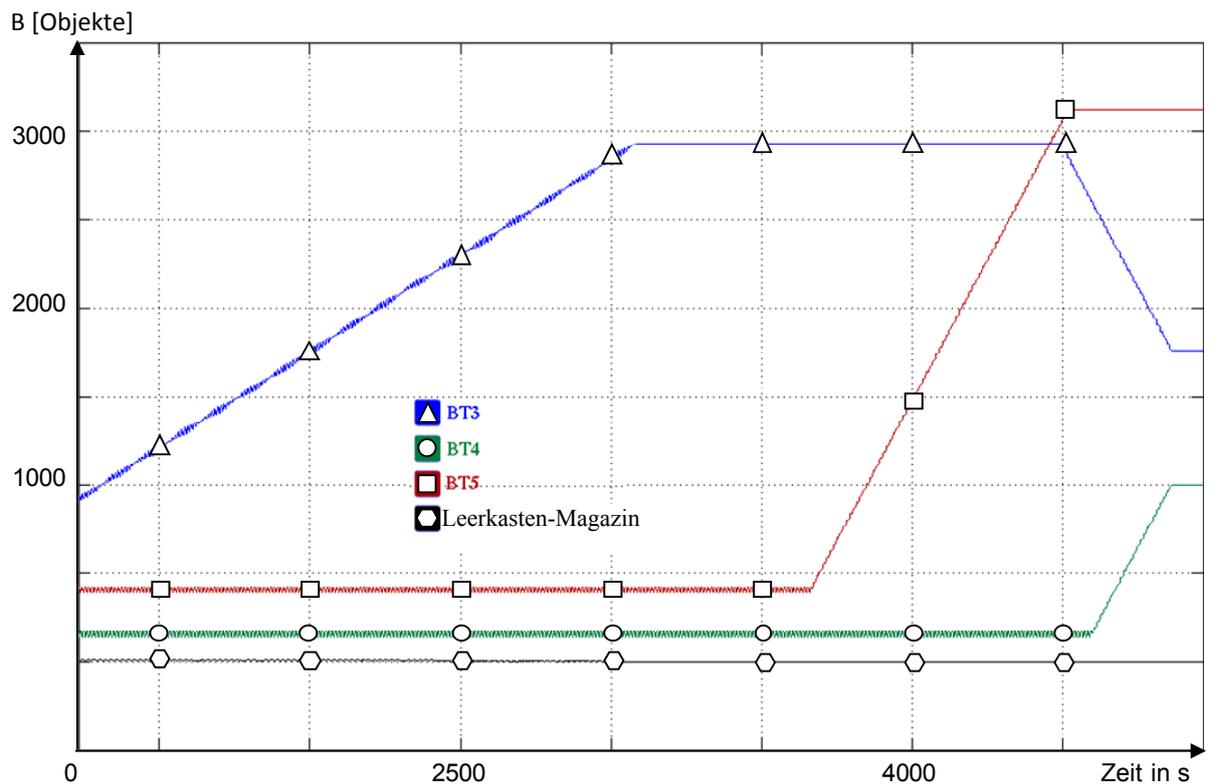
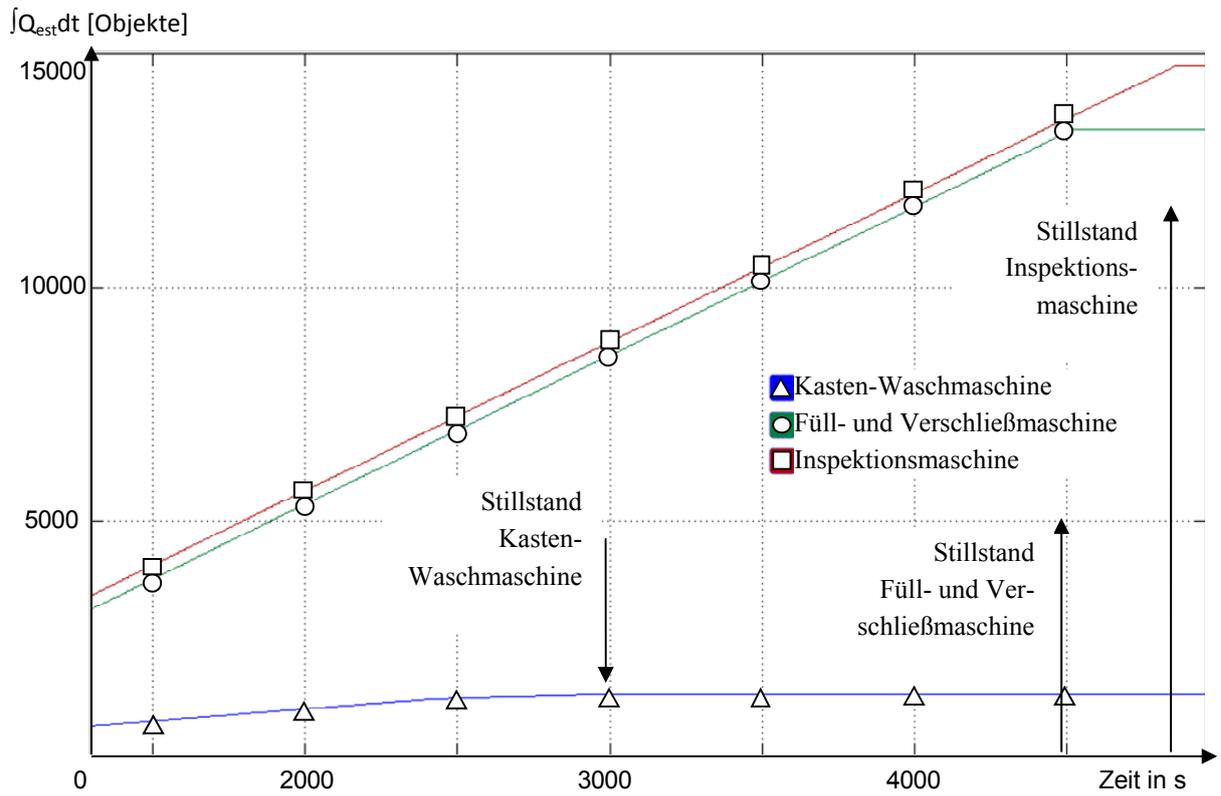


Bild 66: Kumulierte Anzahl verarbeiteter Objekte ausgewählter Maschinen über der Zeit (oben) und Anzahl der Objekte auf ausgewählten Transporteuren und im Leerkasten-Magazin über der Zeit (unten): BT3 Transporteur zwischen Flaschen-Waschmaschine und Inspektionsmaschine, BT4 Transporteur zwischen Inspektionsmaschine und Füll- und Verschleißmaschine, BT5 Transporteur zwischen Füll- und Verschleißmaschine und Etikettiermaschine

5.2.2.4 Überprüfung der Anlagenparameter

Um zu überprüfen, ob das flussorientierte Modell neben dem qualitativ richtigen Verhalten auch in quantitativer Weise verwertbar ist, wurde ein Vergleich zwischen den im Modell berechneten sowie real gemessenen Zeiten zum Vollfahren verschiedener Transporteure mit Pufferfunktion aufgestellt. Hierzu konnten leider keine statistisch gesicherten Daten herangezogen werden, da die Pufferkapazitäten und die für das Vollfahren benötigten Zeiten in der Praxisanlage A aus betrieblichen Gründen lediglich in Einfachbestimmungen erfasst werden konnten. Daher sind die Abweichungen unter einer gewissen Unsicherheit zu betrachten.

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der Puffer BT1, BT3, BT5 und BT6.

Tabelle 16: Vergleich der gemessenen und berechneten Vollfahrzeiten einzelner Puffer der Anlage A

Puffer	Gemessene Zeit für das Vollfahren [s]	Berechnete Zeit für das Vollfahren [s]	Abweichung [%]
BT1	254	236	-7,1
BT3	265	263	-0,05
BT5	345	341	-1,2
BT6	242	210	-13

Die Unterschiede der mithilfe des Modells errechneten Werte zu den Messwerten aus der Anlage sind relativ klein. Ihre Abweichung ins Negative lässt sich damit erklären, dass eine Steuerung bei den Komponenten bisher nicht explizit modelliert wurde. In der realen Anlage ist eine Stufenregelung der Maschinen realisiert, die dazu führt, dass die Maschine ab einem bestimmten Füllungsgrad des nachgeschalteten Transporteurs heruntergeregelt wird und somit die Strecke langsamer vollfährt. Dieses Herunterregeln der Maschinen bei nahezu vollen Puffern ist in dem Modell bisher nicht enthalten.

Dies ist jedoch für die Aufgabenstellung der Diagnose relativ unerheblich, da bei der Diagnoseanwendung nicht, wie bei der dargestellten Simulation, die Nennausbringungen als Eingabeparameter für das Modell dienen, sondern die aktuellen Einstellausbringungen der einzelnen Maschinen aus der BDE-Datenbank.

5.2.3 Bewertung des Komponenten-orientierten Modells auf Basis der Anforderungen aus Kapitel 2.2

Ein besonderes Augenmerk bei der Entwicklung der Komponenten-Modelle lag auf den in Kapitel 2.2 dargelegten Aspekten, die bei den bisherigen Modellierungsansätzen in der Literatur weitgehend unberücksichtigt geblieben sind. Im Folgenden sollen die einzelnen Punkte für das validierte numerische Komponenten-orientierte Modell diskutiert werden.

Bisherige Einschränkungen

1.: Die Anlage arbeitet in einem stationären Zustand ohne instationäre Veränderung

2.: Störungen an einer Fertigungsstation treten rein zufällig, also unabhängig vom Zustand der anderen Stationen auf.

Leistung des erarbeiteten Modells

Auch instationäre Zustände, wie das Anfahren oder Leerfahren einer Anlage, sind mit dem Modell in geeigneter Weise abbildbar. Hierzu müssen lediglich die mechanischen Sperren Bar_{in} und Bar_{out} mit einer entsprechenden, füllungsgradabhängigen Funktion modelliert werden, da sie im Komponentenmodell schon enthalten sind. Dies entspricht auch dem realen Verhalten einer Anlage, da hier die Objektsperren am Ein- oder Auslauf einer Maschine durch die entsprechenden Programme (An- oder Leerfahren der Anlage) gesetzt oder geöffnet werden.

Eine Maschinen- oder Transporteur-Steuerung ist bisher nicht implementiert, da sie für die vorliegende Problemstellung nicht erforderlich ist. Die Annahme, dass eine korrekte Transporteursteuerung nach dem Stand der Technik die Lücken so schnell wie möglich schließt, findet sich im Modell jedoch in der Totzeit wieder, was eine implizite Modellierung dieses Aspekts bedeutet. Da die Einstellausbringungen der Maschinen im Allgemeinen aus Beobachtungen (aus der BDE-Datenbank) abgeleitete Eingangsgrößen des Modells sind, wird die Steuerung der Maschinengeschwindigkeiten ebenfalls für die Diagnoseanwendung nicht in Form einer Modellkomponente benötigt. Die modularisierte Struktur des Modells erlaubt es jedoch, mit geringem Aufwand eine Steuerung-Komponente zu modellieren. Diese nimmt im einfachsten Fall in Form einer Funktion des Füllungsgrads Einfluss auf die aktuellen Flüsse in der TC-Komponente. Soll eine diskrete Steuerung über Stauschalter modelliert werden, ist es höchstwahrscheinlich erforderlich, diese auch als Modell-Komponenten einzufügen. Die Modellierung der Steuerung und der mechanischen Sperren ist in jedem Fall dann notwendig, wenn sie als Fehlerkomponente auftauchen sollen. Dies ist für weitere Arbeiten durchaus denkbar.

Die Punkte 2.–4. werden im vorliegenden Modell nicht berücksichtigt, da es sich um kein Modell zur Simulation des stochastischen Verhaltens einer Lebensmittelverpackungsanlage handelt. Für den vorliegenden Fall

3.: *Es ist ausreichend Bedienpersonal vorhanden, um Störungen innerhalb ihrer stochastisch ermittelten Stördauer zu beheben.*

4.: *Maschinenstörungen treten nur laufzeitbezogen auf.*

5.: *Entlang der gesamten Anlage werden keine Güter ausgeschleust*

Zusätzliche Anforderungen:

6.: *In Lebensmittelverpackungsanlagen gibt es mehrere Güterströme, die sich gegenseitig beeinflussen*

7.: *In Lebensmittelverpackungsanlagen existieren sämtliche in 2.1.1 dargestellten Verkettungsformen von Anlagenkomponenten.*

8.: *Die Fördergeschwindigkeiten der Transporteure und die Ausbringungen der Maschinen können gesteuert oder geregelt sein*

9.: *Es herrschen nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich keine konstanten Fördergeschwindigkeiten auf den Transporteuren.*

10.: *Die Maschinen einer Lebensmittelverpackungsanlage besitzen stark unterschiedliche*

ist das reale Auftreten von Störungen im Vergleich mit dem störungsfreien Betrieb der Anlage von Interesse. Auch hier ist jedoch eine Erweiterung des Modells um eine Komponente für das stochastische Störverhalten denkbar, falls dies für die Simulation eines stochastischen Störverhaltens genutzt werden soll. Da hierzu bereits Werkzeuge, wie z. B. das in Kapitel 3.5.2 kurz beschriebene, existieren, erscheint diese Erweiterung jedoch nicht als sinnvoll.

Das Ausschleusen von Gütern ist im Modell problemlos möglich. Dabei kann sowohl eine Rückführung der Objekte in den Güterstrom als auch eine vollständige Ausschleusung modelliert werden.

Zusätzliche Leistungen des erarbeiteten Modells

Durch die Komponenten CE und SE ist eine Abbildung verschiedener sich beeinflussender Güterkreisläufe in einer Lebensmittelverpackungsanlage problemlos möglich.

Sowohl parallele Maschinen als auch Verblockungen von Maschinen sind durch die Komponenten problemlos abbildbar (vgl. die Darstellung der Komponente TC in 4.2.2).

Zu den Aspekten der Transporteursteuerung siehe Punkt 1.

Das Modell erlaubt durch die virtuelle Größe B_{out} , die räumlichen Geschwindigkeitsunterschiede zu vernachlässigen. Sollten diese jedoch für eine bestimmte Problemstellung von Interesse sein, so ist es möglich, jeden Transporteurabschnitt als eigene MT-Komponente zu modellieren. Hierdurch kann auch eine genauere Lokalisierung des Fehlers auf dem Transporteur erreicht werden.

Durch die Komponente MT wird kein Unterschied zwischen Maschinen und Transporteuren gemacht. Somit können auch Maschinen mit erheblichen Kapa-

Kapazitäten für die Aufnahme von Objekten

zitäten modelliert und ihr zeitlicher Einfluss berücksichtigt werden. Die korrekte Einstellung der Modellparameter oder die Modellierung der mechanischen Sperren sichern dabei das gewünschte Verhalten.

11.: In den einzelnen Güterkreisläufen kann es Schleifen geben.

Zur Rückführung von Objekten siehe Punkt 5.

5.2.4 Diskussion zu 5.2

Insgesamt kann man sagen, dass das Modell das Fortpflanzen von Stillständen einer Anlage, wie es für den modellbasierten Diagnoseansatz benötigt wird, realitätsnah reproduzieren kann. Es ist damit gerade für die vorliegende Aufgabenstellung der Fehlerlokalisierung sehr gut geeignet. Zwar bestehen einige Vereinfachungen, bei diesen handelt es sich aber lediglich um zusätzliche Funktionen, wie eine Steuerung der Maschinen und Transporteure, die nicht im Widerspruch zur physikalischen Richtigkeit des Modells stehen. Die einzelnen Komponenten verhalten sich wie ungesteuerte reale Komponenten. Eine Geschwindigkeitssteuerung auf Basis der Transporteurfüllungsgrade stellte, wie auch in der Realität, eine weitere Komponente dar, die mit den bestehenden Komponenten interagiert. Eine Erweiterung der Bibliothek um ein solches Modell lässt auch den Einsatz für andere Aufgaben, wie z. B. die Anlagenplanung oder den Test verschiedener Steuerungskonzepte, möglich erscheinen. Dazu bedarf es aber ggf. einiger Erweiterungen.

Für die vorliegende Problemstellung wird die in dieser Arbeit präsentierte Modellversion verwendet, bei der bestimmte Größen (wie z. B. das Setzen mechanischer Sperren) als Eingänge aus den realen Beobachtungen erwartet werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass beim Fehlen dieser Beobachtungen keine Diagnose durchgeführt werden kann. Der Mangel an Beobachtungen verschlechtert lediglich das Diagnoseergebnis (siehe 5.3.2). Für eine exakte numerische Simulation des Verhaltens von Lebensmittelverpackungsanlage wäre das Hinzufügen weiterer Komponenten notwendig (siehe oben). Da dies jedoch nicht dem Ziel der Arbeit entspricht, wird auf diese Anpassung des Modells verzichtet.

5.3 Methoden zur Fehlerlokalisierung

Für die Bewertung der Methoden zur Fehlerlokalisierung können die einzelnen Systeme nach LEE ET AL. aufgrund der Kriterien Vertrauenswürdigkeit, Allgemeingültigkeit und Effizienz beurteilt werden [183]. VENKATASUBRAMANIAN ET AL. verfeinern diese Kriterien und geben als wünschenswerte Charakteristika von Diagnosesystemen [294]

- schnelle Fehlerdetektion und –diagnose,
- Isolierbarkeit, also die Fähigkeit unterschiedliche Fehler zu unterscheiden,
- Robustheit gegenüber „verrauschten Informationen“ usw.,
- Identifikation bekannter oder neuer Fehler,
- Einschätzung und Klassifizierung der Fehlerwahrscheinlichkeit,
- Adaptierbarkeit an variierende Problemstellungen,
- Möglichkeit zur Erklärung der Fehler und ihrer Fortpflanzung,
- minimaler Modellierungsaufwand,
- ausbalancierte Anforderungen an die Rechnerleistung und den Speicherbedarf und
- Erkennung von Mehrfachfehlern

an. Im Folgenden werden die in der Auflistung hervorgehobenen Aspekte, die zur quantitativen Bewertung des Algorithmus hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit auf Rechnersystemen dienen, vernachlässigt, da nur eine qualitative Bewertung durchgeführt wird.

Um die unterschiedlichen Methoden zu bewerten, wurden Betriebsdaten aller unter 3.5 beschriebenen Beispielanlagen untersucht. Die Auswahl der Daten orientierte sich dabei an den in Kapitel 3.1.3 definierten Anforderungen. Dabei repräsentieren die Anlagen verschiedene Datenqualitäten. Während die Daten der simulierten Anlage C als zu 100% fehlerfrei angesehen werden können, da hier die Validierung jedes Datenpunkts problemlos erfolgen konnte und auch sichergestellt ist, dass für jede Maschine alle benötigten Informationen über das Simulationsmodell generiert und zur Verfügung gestellt werden. Dies bedeutet nicht, dass die Daten passend zur gewünschten Lösung erzeugt wurden. Das Simulationsmodell arbeitet unabhängig von der Problemstellung. Es ist ein Verhaltensmodell für eine Abfüll- und Verpackungsanlage.

Für die realen Anlagen ergeben sich bei der Datenqualität gewisse Abstufungen (vgl. auch Kapitel 3.5). Anlage A bietet die schlechteste Datenqualität, da sie nicht nach den Weihenstephaner Standards (WS) in Betrieb genommen wurde. Vor allem die Übersetzung der einzelnen Betriebszustände in die standardisierte Form für die Diagnoseschnittstelle konnte aufgrund unterschiedlicher, teilweise betriebsinterner Definitionen der Zustände nur annähernd deckungsgleich erfolgen. Die teils fehlende, teils fehlerhafte Anbindung einiger Maschinen an die Betriebsdatenerfassung stellten die verwendeten Methoden vor zusätzliche Herausforderungen. Hinzu kamen manuelle Bedienereingriffe, die keine Repräsentation in der Datenbank haben.

Anlage B wurde zwar praktisch vollständig nach den WS 2005 vorbereitet, jedoch gab es auch hier bei einigen Betriebszuständen Interpretationsunterschiede bei den einzelnen Ma-

schinenherstellern, die die in der Anlage vorhandenen Maschinen programmierten. Die Konsequenzen hieraus werden unter 5.3.1 diskutiert. Zusätzlich ist anzumerken, dass sich Anlage B bei der Aufnahme der Testdaten noch in der Inbetriebnahmephase befand, was einige Änderungen an Maschinen und Transporteuren (und damit auch der entsprechenden Parameter) bedingte, die aufgrund mangelnder Dokumentation nicht jederzeit nachvollzogen werden konnten.

Während bei den Simulationsdaten die Stillstände einzeln durch manuelles Eingreifen (gezielte Manipulation am Simulationsmodell) provoziert wurden und damit hundertprozentig nachvollziehbar sind, wurden die Daten der realen Anlagen während des normalen Produktionsbetriebs aufgezeichnet. Hierbei wurde zur nachträglichen Validierung der Ergebnisse der Diagnosemethoden zusätzlich eine manuelle Anlagenanalyse, die im Rahmen einer Anlagenabnahme nach DIN 8783 unter Berücksichtigung der DIN 8782 erfolgte, durchgeführt [82], [83].

Zusätzlich wurde die Berechnung der anteiligen Verursachung eines Stillstands mithilfe simulierter Daten validiert. Hierzu wurden Fehler bewusst so erzeugt, dass Störungen zunächst nur den Puffer leeren bzw. füllen, ohne jedoch einen Füllerstillstand zu verursachen. Der letzte Fehler, der den Stillstand des Zentralaggregats auslöst, besitzt damit nur eine Teilschuld an der Verursachung. Außerdem wurden Fehler generiert, die gerade ausreichen, um einen Stillstand am Zentralaggregat zu verursachen. Hierbei wurde überprüft, ob diesen Störungen auch wirklich 100% des Anteils an der Verursachung zugerechnet wird. Die Validierung wurde zusätzlich mithilfe einer optischen Darstellung der Betriebszustände über der Zeit und den aktuellen Pufferfüllungsgraden zu Beginn der einzelnen Störungen durchgeführt. Die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse wurde durch manuelles Vergleichen und Nachrechnen durchgeführt.

5.3.1 Erfahrungswissenbasiertes System

Die in Kapitel 4.2.1 dargestellten Regeln wurden nicht als Wissensbasis für ein erfahrungswissenbasiertes System, sondern als Basis für einen konventionellen, nicht wissensbasierten Algorithmus verwendet (vgl. 4.2.1). Bei diesem findet keine Trennung zwischen Wissensbasis und Inferenz statt, jedoch kann durch die Verwendung der Regeln im Algorithmus davon ausgegangen werden, dass sich diese bei einem erfolgreichen Test des Algorithmus' auch als Wissensbasis für regelbasierte Systeme eignen.

5.3.1.1 Ergebnisse

Die ca. 80 unterschiedlichen Fehler in der Anlage C, die zu einem nicht durch das Zentralaggregat selbst verursachten Stillstand führten, konnten bei einer (minimalen) den Sicherheitsfaktor (vgl. 4.2.1) ersetzenden Sicherheitszeit von 1s zu 100% richtig erkannt und zugeordnet werden (siehe Anhang T). Bei einigen Fällen sind in der derzeitigen Version des Tools keine weiteren Detaillierungen des Fehlers innerhalb verblockter Aggregate sowie keine Unterscheidung zwischen kurzzeitigen Blockierungen und Lücken aufgrund ausgeleiteten Transportguts möglich.

Die Diagnose auf Basis der Daten der Anlage A, die aufgrund der oben dargelegten Gründe die schlechteste Qualität besitzen, wurde bei einer Sicherheitszeit von 3s durchgeführt (die Erhöhung der Sicherheitszeit auf 3s wurde aufgrund der schwierigen Parameterermittlung bei dieser Anlage gewählt). Sie lieferte folgende, in Bild 67 dargestellte Diagnoseergebnisse. Dabei unterscheiden sich die beiden Diagramme darin, ob die füllereigenen Stillstände (mit dem Füller als Zentralaggregat der Anlage) mit in die prozentuale Bewertung einfließen oder nicht. Zusätzlich zu den Kriterien „richtiges Diagnoseergebnis“, „falsches Diagnoseergebnis“ und „Fehler in der Datenbank“ wurden die Stillstände aufgeführt, die in der Realität durch eine Minderausbringung einzelner Maschinen verursacht wurden. Dies wird in der derzeitigen Toolversion nicht berücksichtigt. Ebenso werden derzeit keine Minderausbringungen der Füllmaschine als Diagnoseauslöser behandelt.

Es fällt auf, dass fast alle Stillstände ihren Verursachern zugeordnet werden können, wenn die Daten vollständig und richtig in der Diagnoseschnittstelle vorliegen. Jedoch ist die schlechte Datenqualität dafür verantwortlich, dass nur 50% der füllerfremden Stillstandsursachen erkannt werden können.

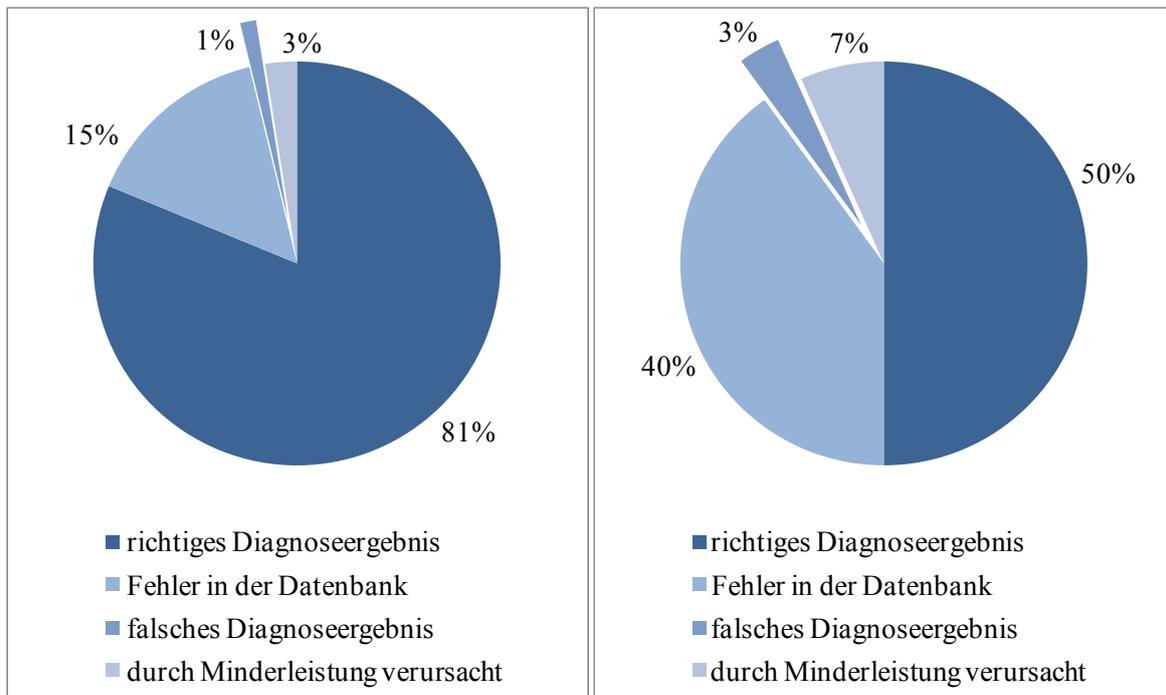


Bild 67: Ergebnisse des Diagnosealgorithmus zur Fehlerlokalisierung mit den Daten von zwei Produktionstagen der Anlage A mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der füllereigenen Stillstände; Betriebszustand „Bereit“ wird als Stau und Mangel untersucht

Dabei gibt es verschiedene Ursachen für die schlechte Datenqualität. Zum einen melden einige der Maschinen nicht alle benötigten Betriebszustände bzw. befinden sich in fehlerhaften Betriebszuständen. Dies ist insbesondere dann kritisch, wenn keine Stau- und Mangelinformationen vorliegen und an deren Stelle „Betrieb“ gemeldet wird, wie dies beispielsweise bei dem in der Anlage vorhandenen Kastenmagazin der Fall ist. Der Algorithmus terminiert an dieser Stelle, da er zwar feststellen kann, dass ein Stillstand z. B. durch das Kastenmagazin verursacht wurde, aufgrund der unzureichenden Information jedoch keine Möglichkeit hat, weiterzuverfolgen, woher die Ursache für dieses Problem stammt und somit die Fortpflan-

zung des Stillstands nicht richtig wiedergibt. Ein geringeres Problem stellt es dar, wenn eine Maschine an Stelle eines Fehlers „Betrieb“ meldet, da in diesem Fall zwar der Fehler nicht als Ursache erkannt, jedoch die richtige Maschine lokalisiert werden kann (vgl. Kapitel 5.4).

Zum anderen existieren Bedienereingriffe, die die Anlagenzustände unnatürlich beeinflussen. Ein Beispiel hierfür ist das manuelle Abstapeln von Getränkekästen bei einem hohen Anteil an Fremdfflaschen im Leergut in der Anlage. Da bei zu hohem Anteil des Fremdleerguts überdurchschnittlich viele Kästen im Verhältnis zu Flaschen in die Anlage gelangen, wurden diese häufig von Bedienern manuell abgestapelt. Hierzu wurde der Flaschenstrom an der Einpackmaschine manuell blockiert, was durch das Diagnosetool als Ursache für die Probleme in der Anlage erkannt wird. Jedoch stellt diese Blockierung nicht die eigentliche Ursache der Anlagenprobleme dar. Dies ist vielmehr die Leergutqualität, also ein anlagenfremdes Problem, das jedoch aufgrund der nicht zur Verfügung stehenden Information nicht diagnostiziert werden kann. Das Diagnosetool arbeitet in solchen Fällen zwar korrekt, kann jedoch ohne Zusatzinformationen durch den Bediener keine erschöpfende Begründung liefern.

Anlage B wurde im Gegensatz zu Anlage A nach den in 3.1.1 dargestellten WS in Betrieb genommen. Dies resultiert in einer nahezu optimalen Datenqualität, weshalb als Sicherheitszeit 1s als ausreichend erschien. Die Ergebnisse der mit Hilfe des Diagnose-Tools durchgeführten Fehlerlokalisierung zeigt Bild 68.

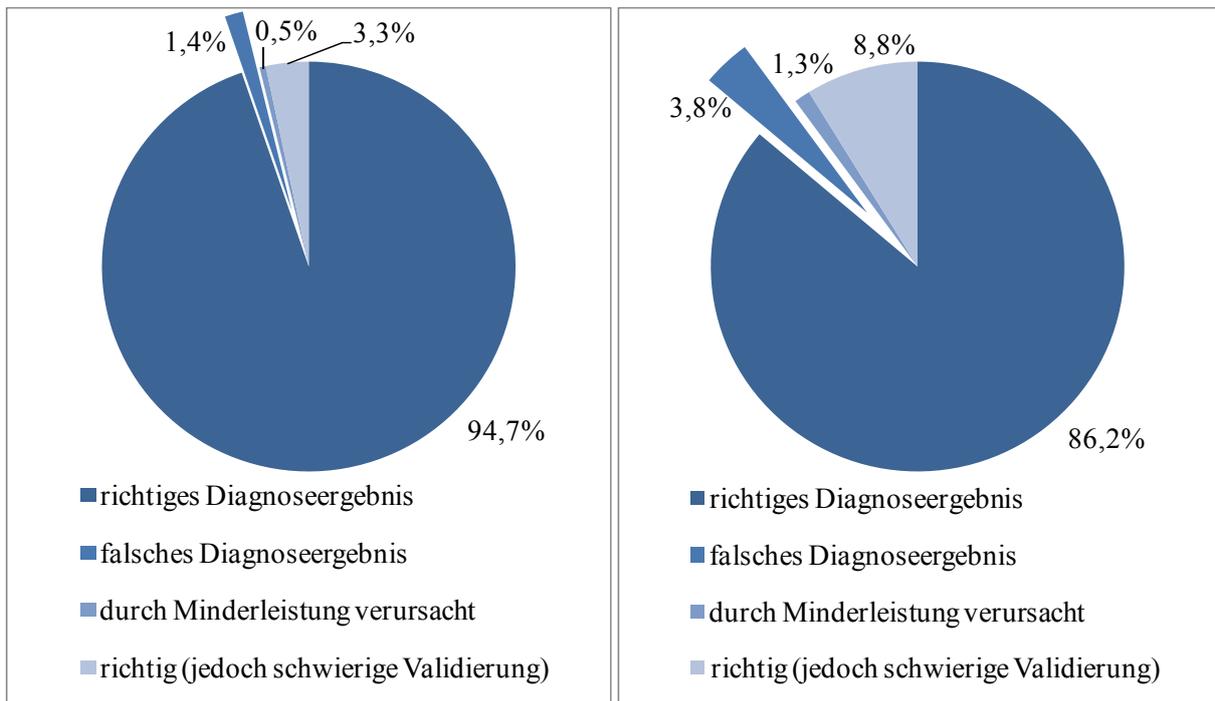


Bild 68: Ergebnisse des Diagnosealgorithmus zur Fehlerlokalisierung mit den Daten von vier Produktionstagen der Anlage B mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der füllereigenen Stillstände; Betriebszustand „Bereit“ wird als füllereigene Störung gewertet

Bei einigen Fällen waren die manuell aufgenommenen Daten nicht ausreichend, um das Ergebnis des Tools vollständig zu beschreiben. Diese Fälle, die aufgrund der nachträglich durchgeführten manuellen Datenbankanalyse als richtig klassifiziert wurden, sind in dem Diagramm als eigener Anteil dargestellt.

Ferner ist anzumerken, dass der Betriebszustand „Bereit“ (Prepared) bei Bild 68 als füllereigener Stillstand aufgefasst wurde. Die Definition des Zustands Prepared nach den WS (vgl. Anhang C) weist ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei „Bereit“ um keinen Mangel- oder Stauzustand handelt. Daher sind Stillstände mit diesem Betriebszustand normalerweise als Abbruchkriterium des Algorithmus definiert, da diese Zeiten durch das fehlende Inbetriebsetzen der bereiten Maschine entstehen. Jedoch ist auch der automatische Wiederanlauf einer Maschine durch „Prepared“ erfasst, was eine genaue Zuordnung schwierig macht.

Aus den manuellen Abnahmeergebnissen geht hervor, dass der Betriebszustand „Bereit“ am Füller der Anlagen auch in Stau- oder Mangelsituationen vorliegt, wenn er z. B. einen automatischen Wiederanlauf des Füllers nach manuellem Eingriff erwartet. Dies kann nicht als Fehler in der Datenbank gewertet werden, sondern entsteht durch die fehlerhafte Interpretation des Maschinenherstellers bei der Implementierung bzw. Programmierung der Maschine bzw. durch eine nicht eindeutige Definition des Zustands in den WS. Daher wurde der Betriebszustand „Bereit“ in einer anderen Auswertung als zusätzlicher Anlass für eine Stau- und Mangeluntersuchung herangezogen.

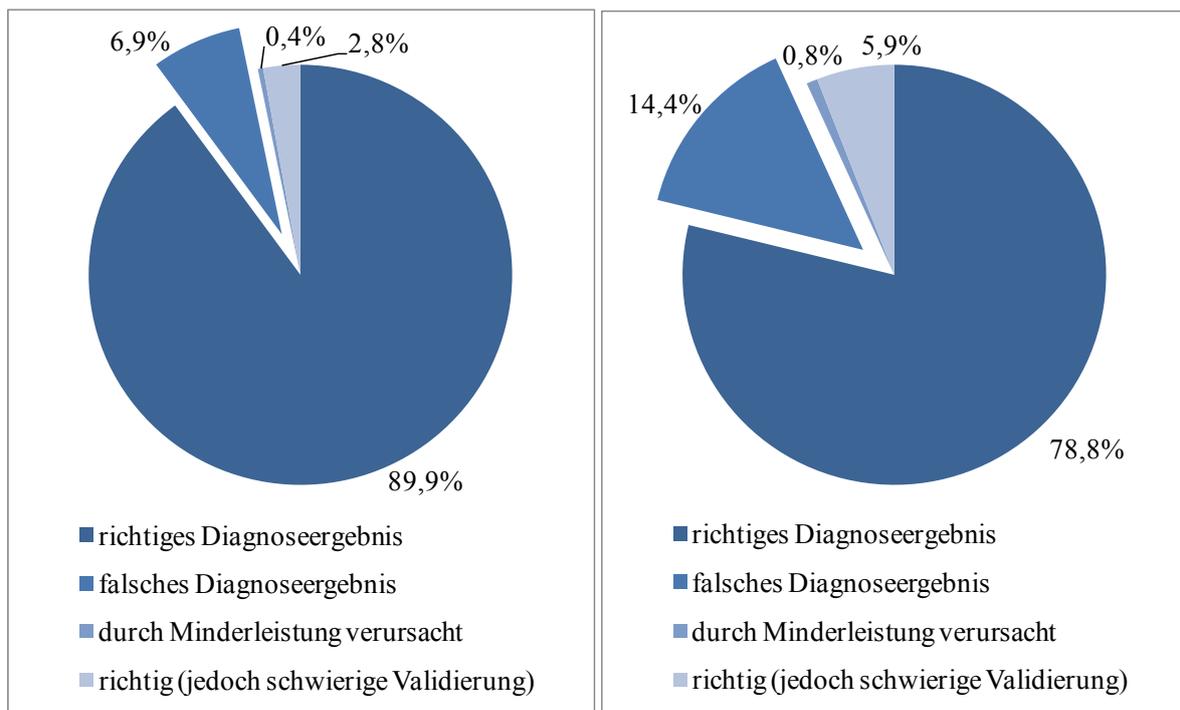


Bild 69: Ergebnisse des Diagnosealgorithmus zur Fehlerlokalisierung mit den Daten von vier Produktionstagen der Anlage B mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der füllereigenen Stillstände; Betriebszustand „Bereit“ wird als Stau und Mangel untersucht

Bei Anlage A führte diese Art der Auswertung zu einer Verbesserung der Diagnoseergebnisse, da der Zustand nahezu ausschließlich für Zustände bei Stau- und Mangelsituationen (siehe oben) verwendet wurde. Bei Anlage B traten vermehrt Fehldiagnosen auf, wie Bild 69 zeigt. Hier wurde „Prepared“ häufig in Situationen verwendet, die nicht an Stau- und Mangelfälle gebunden waren (z. B. beim Warten auf eine Störungsquittierung nach einem Eigenfehler der Maschine).

Die Ergebnisse der Berechnung der anteiligen Verursachung an der simulierten Anlage zeigen ein ähnlich gutes Bild wie die Diagnose des zeitlich letzten Verursachers der Simulationsfälle und sind in Bild 70 dargestellt. Dabei wurde die Diagnose mit einer Sicherheitszeit von 1s und einem konstanten typischen Pufferfüllungsgrad f_n durchgeführt, der aus dem Mittelwert einer Stunde störungsfreien Betriebs ermittelt wurde. Eine detaillierte Auflistung der einzelnen Fälle ist in Anhang T enthalten

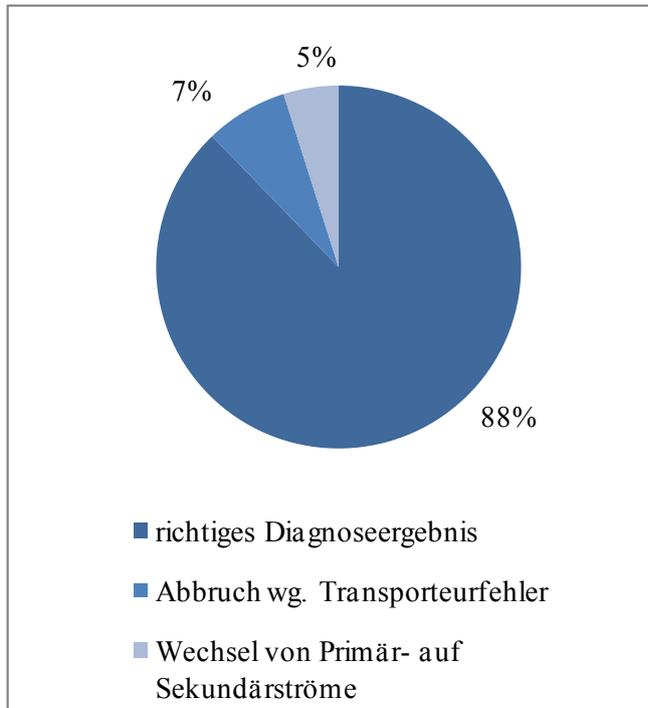


Bild 70: Ergebnisse der Diagnose der anteiligen Verursachung eines Stillstands am Zentralaggregat aus Simulationsfällen.

Nahezu alle mit dem Simulationsmodell generierten Fälle werden richtig diagnostiziert. Die derzeitige Version des Tools bricht lediglich die Diagnose vorzeitig ab, wenn ein Transporteurfehler oder Ähnliches auftritt, da hier in realen Anlagen aufgrund der fehlenden Information über die Dauer dieses Fehlers keine eindeutige Anteilsberechnung erfolgen kann. Die Berechnung wird, wie unter 4.2.1 dargestellt, abgebrochen, und dem identifizierten Fehler wird der Restanteil angerechnet.

Außerdem ist in der derzeitigen Version des Testtools der Wechsel vom Primär- auf den Sekundärstrom nicht vollständig für die anteilige Berechnung umgesetzt (Unzureichende Berücksichtigung der Umrechnungen aufgrund der Verhältnisse Primärpackungen in Sekundärverpackung bei der Anteilsberechnung). Es ist davon auszugehen, dass diese Unzulänglichkeit in späteren Toolversionen beseitigt wird.

Außerdem ist in der derzeitigen Version des Testtools der Wechsel vom Primär- auf den Sekundärstrom nicht vollständig für die anteilige Berechnung umgesetzt (Unzureichende Berücksichtigung der

Umrechnungen aufgrund der Verhältnisse Primärpackungen in Sekundärverpackung bei der Anteilsberechnung). Es ist davon auszugehen, dass diese Unzulänglichkeit in späteren Toolversionen beseitigt wird.

5.3.1.2 Bewertung

Auf Basis dieser Ergebnisse und zusätzlicher Messwerte erfolgt die Bewertung bzgl. der oben festgelegten Kriterien:

- **Isolierbarkeit**, also die Fähigkeit unterschiedliche Fehler zu unterscheiden:
Die Isolierbarkeit der Fehler ist insofern gegeben, dass die einzelnen Verursacher des Stillstands isoliert identifiziert werden können. Eine tiefere Analyse der Fehlerursache in dem lokalisierten Verursacher ist derzeit nicht im Algorithmus enthalten und stellt eine andere Aufgabenstellung dar. Es lässt sich durch die Erweiterung der anteiligen Stillstandsverursachung auch unterscheiden, ob die Verursachung eines Stillstands allein von einem oder von mehreren zusammenwirkenden Verursachern zu verantworten ist. Auch der Wechsel des Verursachers während einer Störung kann identifiziert und von

solchen Fällen unterschieden werden, in denen die gesamte Störungsdauer einem einzelnen Fehler zugeschrieben wird.

- **Robustheit gegenüber „verrauschten Informationen“ usw.:**
 Wie aus den oben dargestellten Ergebnissen ersichtlich, ist der im Tool verwendete Algorithmus auf eine möglichst fehlerfreie Datengrundlage angewiesen. Bei fehlerhaften Informationen erfolgen Fehldiagnosen. Jedoch kann in dem Tool auf verrauschte Informationen in Form von Ungenauigkeiten bei z. B. Geschwindigkeiten oder gemessenen Parametern problemlos durch eine Anpassung der Sicherheitsfaktoren reagiert werden. Dies erfordert eine Validierung der angepassten Faktoren. Fehlende Informationen kann der Algorithmus insofern kompensieren, dass er in seinem Diagnoseergebnis zwar ungenauer wird, jedoch zu richtigen Folgerungen gelangt. So kann eine Maschine, die keine Informationen an eine Betriebsdatenerfassung liefert, durch die entsprechende Konfiguration der Anlagenbeschreibung in Form eines Blocks mit vor- oder nachgeschalteten Komponenten verknüpft werden. Sie kann damit zwar nicht als Einzeldiagnoseergebnis aber im Verbund, z. B. mit den umgebenden Transporteuren, als Gesamtdiagnoseergebnis (in Form eines Blocks) identifiziert werden. Eine Automatisierung eines solchen Prozesses, die bei temporären Ausfällen aufgrund von negativen Datenbankabfragen die Diagnoseergebnisse für diese Zeit automatisch vergrößert, ist derzeit nicht implementiert. Gleiches gilt für gewisse Fehlmeldungen. So kann beispielsweise eine Maschine, die Stau und Mangel richtig, jedoch an Stelle des Fehlerzustands weiterhin „Betrieb“ meldet, durch den Algorithmus als Verursacher grob lokalisiert werden, während sie bei einer statistischen Bewertung nie als Fehlerverursacher auftaucht (vgl. auch 5.4).
- **Identifikation bekannter oder neuer Fehler:**
 Der Algorithmus ist bei der Fehlerunterscheidung auf die als Ursachen vorgegebenen Fehlerarten beschränkt. Die Option „andere Ursachen“ sichert jedoch, dass auch unbekannte Fehler erfasst und nicht den vorhandenen Fehlerklassen zugeordnet werden.
- **Einschätzung und Klassifizierung der Fehlerwahrscheinlichkeit:**
 Die Wahrscheinlichkeiten bestimmter Fehler werden derzeit nicht berechnet oder zur Diagnose herangezogen.
- **Adaptierbarkeit an variierende Problemstellungen:**
 Die Adaptierbarkeit an unterschiedlichste Anlagen ist aufgrund der einfachen Konfiguration mit Hilfe der Dateien zur Systembeschreibung (Anlagendesign) schnell und problemlos möglich. Sämtliche Anlagen der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, die nach dem in dieser Arbeit beschriebenen Prinzip arbeiten, können diagnostiziert werden, so lange es eine berechenbare Totzeit und eine bestimmbare Kapazität für die Transporteure und Puffer zwischen den Einzelmaschinen gibt. Zusätzliche Voraussetzung ist die Bereitstellung der benötig-

ten Daten in einer Datenbank, die in die unter 3.1.3 beschriebene Diagnose-schnittstelle überführt werden kann.

- **Möglichkeit zur Erklärung der Fehler und ihrer Fortpflanzung**
Die Möglichkeit der Erkennung der Fehler- bzw. Stillstandsfortpflanzung ist durch ein einfaches Schreiben eines Logfiles während der Algorithmusausführung gegeben. Der Algorithmus verfolgt die Stillstandsfortpflanzung in umgekehrter Reihenfolge bis zum Erreichen der einzelnen Ursachen. Dabei kann auch nachvollzogen werden, warum bestimmte Kandidaten für den Fehler nicht in Frage kommen. Das Logfileschreiben ist derzeit nicht in das Tool integriert, kann aber durch einfache Erweiterung der einzelnen Funktionen um eine Ausgabe realisiert werden.
- **minimaler Modellierungsaufwand:**
Die Vorbereitung für eine Diagnose besteht lediglich im Ausfüllen der Tabellen zum Systemdesign. Hierzu müssen die anlagentypischen Parameter aus CAD Plänen ausgelesen (vgl. 3.3) oder relativ zeitintensiv in der Anlage durch Messen bestimmt werden.
- **Erkennung von Mehrfachfehlern**
Die Erkennung von Mehrfachfehlern ist größtenteils gegeben. Da die Datenbasis eine eindeutige Angabe eines Betriebszustands verlangt (vgl. Anhang C), können Betriebszustände, die eigentlich gleichzeitig an einer Maschine anliegen (z. B. eine Maschine, die einen Mangel und einen Fehler hat), nur insofern analysiert werden, wie sie in der Datenbank auftauchen. Jedoch ist das Ermitteln der Verursachung durch ein Zusammenwirken mehrerer Aggregate möglich. Sowohl die Fehler durch parallele Aggregate, die lediglich gemeinsam einen Fehler auslösen können, die Kombination ausgeschleuster Objekte und durch Aggregate verursachte Lücken als auch das Aufsummieren verschiedener Fehler über den Pufferfüllungsgrad und der Ursachenwechsel während eines Stillstands werden erkannt (siehe oben).

5.3.1.3 Diskussion zu 5.3.1

Insgesamt kann festgestellt werden, dass der Diagnosealgorithmus auf Basis richtiger Daten nahezu fehlerfrei arbeitet. Der Einfluss fehlerhafter Daten kann nur dann kompensiert werden, wenn diese keine Fehlschlüsse über die Stillstandsfortpflanzung verursachen. Der Berücksichtigung der Weihenstephaner Standards (WS) bei der Datenerfassung sowie der guten Datenqualität kommen damit besondere Bedeutungen zu. Hierbei ist es zum einen wichtig, dass möglichst alle Maschinen die Betriebszustände der WS melden, um das oben kurz beschriebenen Hilfskonstrukt der Blockanalyse, die eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt, zu vermeiden und jede Maschine einzeln lokalisieren zu können. Zum anderen ist die konsequente Umsetzung der Definitionen der WS notwendig, wie die Probleme mit dem Betriebszustand „Prepared“ gezeigt haben. Hierbei ist zu prüfen, ob der Zustand in der derzeitigen Version der WS hinreichend genau definiert ist. So wird der automatische Wiederanlauf bei vielen Ma-

schinenherstellern für den Fall benutzt, in dem eine Maschine, die sich im Stau- oder Mangelzustand befindet, nach der Durchführung von Wartungsarbeiten darauf wartet, wieder in Betrieb zu gehen. Damit liegt die Ursache des Stillstands nicht bei der Maschine selbst. Durch die Festlegung, dass zu jedem Zeitpunkt nur ein einziger Betriebszustand an der Maschine anliegen darf (vgl. Anhang C), geht die Stau- oder Mangelinformation in diesen Fällen jedoch verloren. Gegensätzlich dazu beschreibt der Zustand auch das Warten auf ein manuelles Inbetriebsetzen der Maschine. Wird die Maschine nicht durch einen Bediener aus diesem Zustand in „Betrieb“ gesetzt, so handelt es sich um einen externen Fehler bzw. eine externe Ursache für den Stillstand. Es ist daher zu überlegen, ob in den Weihenstephaner Standards in einer zukünftigen Version ein zusätzlicher Zustand für den automatischen Wiederanlauf eingeführt wird, der dann ebenfalls auf eine Fortpflanzung eines Fehlers untersucht werden kann und ob eine Prioritätenliste der Betriebszustände hinzuzufügen ist, die verhindert, dass wertvolle Informationen für die Diagnose verloren gehen.

Ferner kann eine sinnvolle Anwendung des Diagnosealgorithmus nur dann erfolgen, wenn keinerlei manipulierende Eingriffe durch Bediener erfolgen, die nicht in der Datenbank nachvollzogen werden können. Da diese jedoch häufig helfen, die Effizienz der Anlage zu steigern, bzw. die Effizienzminderung zu verhindern, muss eine zusätzliche Dokumentationschnittstelle geschaffen werden, die dem Bediener erlaubt, Kommentare zu den einzelnen Fällen einzugeben. Dies ist jedoch in der bisher durchgeführten post-mortem Diagnose eher schwierig, da es unwahrscheinlich erscheint, dass die Bediener im Nachhinein sämtliche Fehlerursachen analysieren und aus der Erinnerung entsprechende Kommentare einfügen. Sinnvoller erscheint daher, das Diagnosetool in ein Online-Tool umzufunktionieren, das direkt nach jedem einzelnen Stillstand des Zentralaggregats einer Anlage die Diagnose einleitet und entsprechende Eingaben ermöglicht. Diese Modifikation ist lediglich mit geringem Aufwand verbunden, da auch hierbei die Diagnoseschnittstelle in der gleichen Art und Weise genutzt wird, wie bei der beschriebenen Tool-Version.

Die Berechnung einer anteiligen Verursachung kann ebenfalls als sinnvolle Erweiterung des Algorithmus angesehen werden. Sie liefert neben den zeitlich letzten Verursachern eine Aussage über die Auswirkungen aller Fehler in der Vergangenheit, die einen Einfluss auf den betrachteten Stillstand hatten und damit eine wertvolle Information über den Gesamtverlauf der Fehlerentstehung. Schwierig ist hierbei lediglich das Festlegen eines gewünschten oder normalen Füllungsgrads für reale Anlagen. Zwar existieren, wie unter 2.1.2 angemerkt, Algorithmen um optimale Füllungsgrade für Puffer zu bestimmen, jedoch sind die Puffer in der Realität gewissen Schwankungen aufgrund der Steuerungs- oder Regelungsstrategie der Anlage unterworfen, die als „Atmen“ des Puffers auch gewünscht sind. Es erscheint daher sinnvoll, eine obere und untere Grenze eines gewünschten Füllungsgradbereichs festzulegen, die dem Schwankungsbereich im Normalbetrieb des Puffers entspricht. Dabei ist dann die Obergrenze dieses Bereichs als normaler Füllungsgrad für die Analyse von Stauzuständen und die Untergrenze als Grenze für Mangelzustände zu verwenden.

Die Regeln, die in dem vorliegenden Tool verwendet wurden, können, unabhängig von der Implementierung in einem „klassischen“ oder in einem wissensbasierten System, als valide

und ausreichend für die Fehlerlokalisierung angesehen werden. Auch die bereits diskutierten Probleme durch Bedienereingriffe etc. können im Wesentlichen als Probleme einer Fehleridentifikation und nicht als solche der Lokalisierung angesehen werden. Eine Erweiterung der Regelbasis um zusätzliche Regeln zur an die Fehlerlokalisierung anschließenden Identifikation des Fehlers erscheint daher sinnvoll. Hierzu ist auf detailliertere Informationen auf Basis der in den WS definierten Datenpunkte zurückzugreifen. Eine Erweiterung der vorhandenen Diagnoseschnittstelle oder die zusätzliche Schaffung einer Schnittstelle für die einzelnen Maschineklassen scheint dabei unumgänglich.

5.3.2 Modellbasierte Diagnose

Die modellbasierte Diagnose wurde auf der Basis des unter 4.2.2.2 erläuterten qualitativen Modells und unter der Verwendung der durch das MQM entwickelten Diagnosemaschine in der ebenfalls in Kapitel 4.2.2.2 dargestellten Version durchgeführt.

5.3.2.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse des modellbasierten Diagnosetools ähneln denen des aus Regeln abgeleiteten Algorithmus. Während die Diagnoseergebnisse der Daten der Anlage A aufgrund deren schlechter Qualität wieder einige Abweichungen zu den manuell bestimmten Ursachen aufweisen (vgl. Bild 71), ist das Diagnoseergebnis bei Anlage B ebenfalls im Bereich 80-95% richtiger Zuordnungen angesiedelt (vgl. Bild 72).

Hierbei bedeutet ein falsches Diagnoseergebnis, dass das Ergebnis von den manuell aufgenommenen Ursachen abweicht. In diesem Fall wird nicht unterschieden, ob das Ergebnis wirklich falsch oder auf einen Fehler in der Datenbank zurückzuführen war. Fehler in der Datenbank können bei einem Diagnoseergebnis der modellbasierten Diagnose allerdings auch in Form der Ursache „falscher Betriebszustand“ an einer der Anlagenkomponenten dargestellt werden. In der derzeitigen Version des modellbasierten Diagnosetools werden diese Diagnosen zusätzlich zu denen angegeben, die von einer richtigen Datenbasis ausgehen. Die Anzahl der möglichen Ursachenkombinationen steigt folglich stark an, so dass die Diagnosealternativen im Nachhinein evaluiert und eingegrenzt werden müssen. Ein Priorisieren der Alternativen ist bisher jedoch nicht implementiert, so dass lediglich die Ableitungen aus der fehlerfrei angenommenen Datenbasis als richtiges Diagnoseergebnis klassifiziert wurden.

Bei der Fehlinterpretation der Maschinenzustände werden Zustände wie „Stopped“, „Starting“ oder „Prepared“ von der Diagnosemaschine nicht als Fehlermodus der jeweiligen Komponente interpretiert, sondern stellen einen Okay-Mode dar (vgl. 2.3.4). Dabei treten bei „Prepared“ die gleichen Probleme auf, wie oben beschrieben. Unter die Kategorie „nicht zuweisbar“ fallen Daten, die während Inspektionen, Reinigungen etc. aufgezeichnet wurden. Diese Daten wurden bei der oben dargestellten Methode des regelbasierten Algorithmus automatisch von der Diagnose ausgeschlossen. Als Ursachen für die Fehldiagnosen und auftretenden Probleme sind die gleichen Widrigkeiten wie bei der zuvor beschriebenen Methode zu nennen. Andere Ursachen, z. B. aufgrund von Unzulänglichkeiten des Modells, waren nicht zu beobachten.

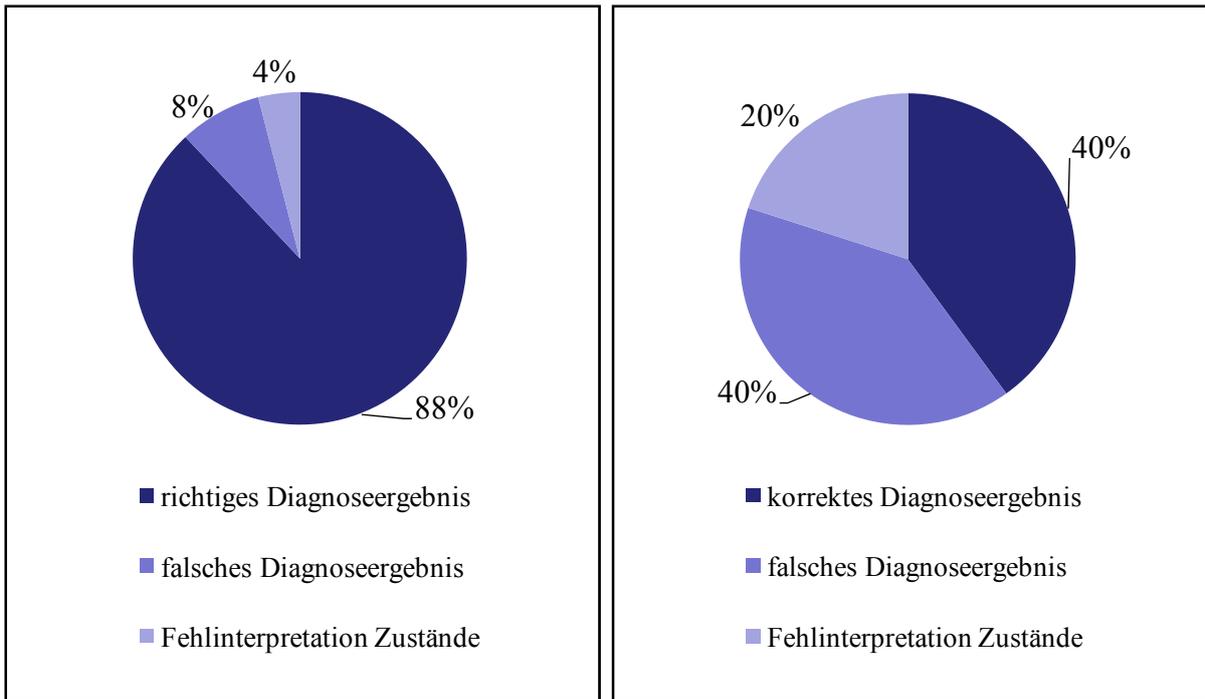


Bild 71: Ergebnisse des modellbasierten Diagnosealgorithmus zur Fehlerlokalisierung mit den Daten von zwei Produktionstagen der Anlage A mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der füllereigenen Stillstände

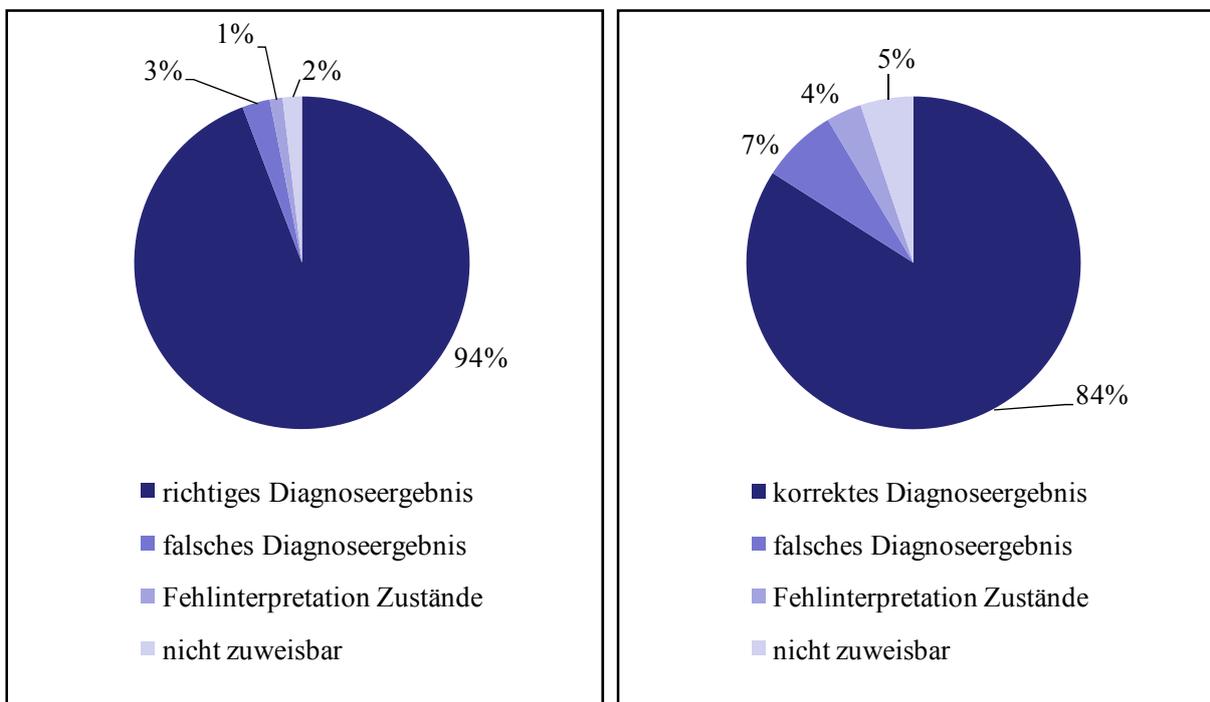


Bild 72: Ergebnisse des modellbasierten Diagnosealgorithmus zur Fehlerlokalisierung mit den Daten von vier Produktionstagen der Anlage B mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung der füllereigenen Stillstände

5.3.2.2 *Bewertung*

- **Isolierbarkeit, also die Fähigkeit unterschiedliche Fehler zu unterscheiden:**
Die Isolierbarkeit der Fehler ist ebenso wie bei der weiter oben vorgestellten Umsetzung gegeben. Auch fehlerhaft angegebene Betriebszustände stehen als Diagnoseergebnis zur Verfügung, was die Fähigkeit zur Unterscheidung der Ursachen erhöht. Eine weitergehende Identifikation der Fehler in der lokalisierten Komponente ist jedoch auch in diesem Tool aufgrund der vorliegenden Aufgabenstellung bisher nicht umgesetzt. Sie erforderte eine weitergehende Modellierung.
- **Robustheit gegenüber „verrauschten Informationen“ usw.:**
Wie aus den oben dargestellten Ergebnissen ersichtlich, ist der modellbasierte Ansatz ebenfalls auf eine korrekte Datenbank angewiesen. Er kann jedoch auch unkorrekte oder fehlende Informationen teilweise kompensieren. Dabei wird das Diagnoseergebnis im Allgemeinen lediglich ungenauer, jedoch nicht falsch (beispielsweise durch zusätzlich mögliche Diagnosen oder die Zusammenfassung verschiedener Komponenten zu einem Block). Ein Priorisieren der Diagnosemöglichkeiten fehlt in der derzeitigen Version.
- **Identifikation bekannter oder neuer Fehler:**
Der Algorithmus arbeitet mit einem Modell des fehlerfreien Anlagenverhaltens. Dies ist für eine Lokalisierung eines Fehlers in der Anlage ausreichend. Sollen zusätzliche Komponenten, wie z. B. eine Steuerung, als Diagnoseergebnis zur Verfügung stehen, müssen diese modelliert und in das Modell des fehlerfreien Verhalten integriert werden.
- **Einschätzung und Klassifizierung der Fehlerwahrscheinlichkeit:**
Die Wahrscheinlichkeiten bestimmter Fehler werden derzeit nicht berechnet oder zur Diagnose herangezogen.
- **Adaptierbarkeit an variierende Problemstellungen:**
Die Adaptierbarkeit auf unterschiedlichste Anlagen ist mit der beschriebenen Methode durch das Erstellen dieser Anlage aus den unter 4.2.2. beschriebenen Modellbausteinen mit den entsprechenden Parametern einfach möglich. In der Arbeit konnte keine Anlagenkonstellation gefunden werden, die sich nicht mit den vorhandenen Bausteinen abbilden lässt.
- **Möglichkeit zur Erklärung der Fehler und ihrer Fortpflanzung**
Die Erkennung der Fehlerfortpflanzung ist bei dieser Methode auch das Diagnoseergebnis, da sie die Fehler der Komponenten und ihre Ausbreitung als Diagnosealternativen anbietet.
- **minimaler Modellierungsaufwand:**
Durch die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Erstellung einer Modell-Bibliothek für Lebensmittelverpackungsanlagen ist die Modellierung nur mit einem sehr geringen Aufwand verbunden. Wie oben bereits erläutert, lassen sich alle bekannten Anlagenkonstellationen mithilfe dieser Bibliothek modellieren. Das Bestimmen der Anlagenparameter (Kapazitäten, Totzeiten, etc.)

muss auch bei dieser Methode für jede Anlage erfolgen, so dass sich hier kein wesentlicher Unterschied zur unter 5.3.1 beschriebenen Methode ergibt.

- **Erkennung von Mehrfachfehlern**

Die Erkennung von Mehrfachfehlern ist mit der derzeitigen Diagnosemaschine grundsätzlich möglich. Dabei handelt es sich um mehrere gleichzeitig anliegende Störungen, die einen Stillstand verursachen (z. B. parallele Maschinen etc.). Das Aufsummieren verschiedener Fehler über die Zeit ist in der derzeitigen Version nicht implementiert, sollte jedoch nach einer für die Zukunft geplanten Modifikation des temporalen Vorhersage-Moduls zur Verfügung stehen, da das Erkennen von Mehrfachfehler eine grundsätzliche Funktionalität der Diagnosemaschine darstellt.

5.3.2.3 *Diskussion zu 5.3.2*

Grundsätzlich können die Ergebnisse des modellbasierten Ansatzes analog zu den Ergebnissen der auf Regeln basierenden Lösung diskutiert werden. Auch hier besteht die beschriebene Problematik mit unzureichenden Informationen und dem ggf. nicht ausreichend definierten Betriebszustand „Prepared“. Wie schon bei der Bewertung der Methode angegeben, kann die modellbasierte Lösung fehlerhaft angegebene Betriebszustände als Diagnoseergebnis aufführen. Da diese jedoch immer eine Möglichkeit als Ursache in Kombination mit anderen Zuständen darstellen können, ist die Information nur dann wertvoll, wenn über eine nachfolgende Ergebniskontrolle Zusammenhänge erkannt werden können, die den falschen Betriebszustand aufdecken. Dies kann in der momentanen Fassung nur manuell erfolgen. Dabei ist fraglich, ob der Aufwand zum Aufdecken falscher Betriebszustände mit dieser Methode geringer ist als eine Validierung der Betriebszustände in der Anlage selbst.

Auf eine detaillierte Diskussion der Diagnosemaschine wird an dieser Stelle verzichtet, da sie durch das MQM entwickelt wurde und in der vorliegenden Arbeit lediglich dazu dienen sollte, die grundsätzliche Eignung des Ansatzes und die Verwendbarkeit des Modells zur Diagnose darzulegen. Beides konnte nachgewiesen werden. Nachfolgende Arbeiten werden sich mit einer Optimierung und Anpassung der Diagnosemaschine beschäftigen müssen, damit die in dieser Arbeit formulierten Ansprüche alle erfüllt werden können. Auch die beschriebenen Erweiterungen des Modells um eine Steuerungskomponente o. Ä. sind für eine zukünftige Diagnoselösung vorstellbar.

5.3.3 **Vergleich der entwickelten Methoden zur Fehlerlokalisierung mit der KNN-Methode von VOIGT ET AL.**

Der Vergleich der neu entwickelten Methoden mit der in der Arbeit als Referenz dienenden Methode nach [304] wird auf Basis der in 5.3 beschriebenen (eingeschränkten) Bewertungskriterien nach [294] durchgeführt.

5.3.3.1 Ergebnisse und Bewertung

Vergleicht man die in der Arbeit vorgestellten Methoden mit der einzigen dokumentierten, nicht statistischen Diagnoselösung für Abfüll- und Verpackungsanlagen von VOIGT ET AL., die auf einem Künstlichen Neuronalen Netz (KNN) basiert, so zeigen erstere in nahezu allen Bereichen deutliche Vorteile (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Vergleich der Tools in ihrer derzeitigen Version mit dem Referenztool nach VOIGT ET AL. [304] (in Klammern dargestellte Werte sind erst in zukünftigen Versionen zu erwarten)

	aus Regelbasis abgeleitetes Tool	aktueller mo- dellbasierter Ansatz	KNN Lösung nach VOIGT ET AL. [304]
Isolierbarkeit, also die Fähigkeit unterschiedliche Fehler zu unterscheiden	+	++	0
Robustheit gegenüber „verrauschten Informationen“ usw.	+	+ (++)	+
Identifikation bekannter oder neuer Fehler	+	+	0
Einschätzung und Klassifizierung der Fehlerwahrscheinlichkeit	--	--	--
Adaptierbarkeit an variierende Problemstellungen	++	++	--
Möglichkeit zur Erklärung der Fehler und ihrer Fortpflanzung	- (++)	++	0
Minimaler Modellierungsaufwand	++	++	--
Erkennung von Mehrfachfehlern	++	0 (++)	--

Bei der Isolierbarkeit kann das KNN die Ausgaben erzeugen, die Teil des Ausgabevektors sind. Dabei ist in der bisherigen Lösung keine Ausgabe „andere Ursache“ oder Ähnliches vorhanden, die es ermöglichen würde, neue Fehler aufzunehmen und diese nicht einer der vorgegebenen Ursachen zuzuordnen. Es besteht auch nicht die Möglichkeit, einer Störung mehrere Verursacher zuzuteilen (Mehrfachfehler). Das Erkennen neuer Fehler ist damit praktisch unmöglich, während die bekannten Fehler zuverlässig erkannt werden. Ihre Fortpflanzung kann jedoch nur mit Hilfe der passenden Gantt-Charts nachvollzogen werden, die aus den gleichen Daten, die auch der Diagnose dienen, erzeugt werden können. Hier geben die neu entwickelten Tools (wenn auch teilweise nicht abschließend umgesetzt) dem Anwender bessere Möglichkeiten an die Hand. Das KNN ist insbesondere aufgrund des hohen Trainingsaufwands bei der Anpassung an eine neue Anlage oder Modifikationen einer bestehenden in den Bereichen Adaptierbarkeit und Modellierungsaufwand eindeutig unterlegen (vgl. auch 2.3.3.1). Diese beiden Aspekte sind bei beiden neu entwickelten Methoden problemlos und mit relativ geringem Zeitaufwand durchführbar. Das von VOIGT ET AL. beschriebene Tool

zeigt bei „verrauschten“ Informationen ein schwer zu bewertendes Verhalten. Handelt es sich lediglich um kleine Abweichungen (z. B. das kurze Wechseln eines Betriebszustands) kann die Diagnose problemlos erfolgen. Auch mit falschen Daten (Betriebszuständen) kann das Tool, bei dem ja prinzipiell nur ein Mustervergleich erfolgt, zuverlässig die Verursacher diagnostizieren. Werden diese Fehler jedoch irgendwann berichtet, so liefert das Tool ohne neues Training in Zukunft mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit falsche Diagnosen. Der Vorteil der modellbasierten Diagnose gegenüber den anderen Methoden ist hier das Aufzeigen der Diagnosen, die falsche Betriebszustände in ihre Diagnosebeschreibung miteinbeziehen. Allerdings fehlt derzeit noch eine quantitative Bewertungskomponente, die die Wahrscheinlichkeit fehlerhafter Betriebszustände klassifiziert. Die Angabe von Fehlerwahrscheinlichkeiten wird bei allen Methoden bisher nicht verwendet. Fehlerwahrscheinlichkeiten können jedoch mit den klassischen Auswertemethoden aus den vorhandenen Betriebsdaten für längere Zeiträume bestimmt und den Ergebnissen der Diagnosemethoden gegenübergestellt werden (siehe auch Kapitel 5.4).

5.3.3.2 Diskussion zu 5.3.3

Betrachtet man den Vergleich der unterschiedlichen Diagnosetools in diesem Kapitel und die detaillierte Bewertung der in dieser Arbeit verfolgten Ansätze, so wird deutlich, dass die neu entwickelten Methoden eine wesentliche Verbesserung der bisherigen Diagnosemöglichkeiten für Lebensmittelverpackungsanlagen darstellen. Dabei können nach derzeitigem Stand beide Lösungsvorschläge als etwa gleichwertig angesehen werden. Da die anteilige Verursachung in einer quantitativ bewerteten Form bisher lediglich im regelbasierten Tool umgesetzt ist, bietet dies derzeit allerdings den größeren Praxisnutzen. Jedoch stellt gerade die hohe Flexibilität der modellbasierten Lösung einen gewissen Vorteil für Erweiterungen dar. So kann das gleiche Modell, das für die Diagnose genutzt wird, auch für andere Aufgaben dienen. Es ist vorstellbar, dass auch die Steuerung oder Regelung einer Anlage mithilfe eines modellbasierten Ansatzes verbessert werden kann. Die Vorhersage des Pufferverhaltens und der Stillstandsfortpflanzung kann dabei genutzt werden, um frühzeitig gegenzusteuern und gegebenenfalls zumindest einen völligen Stillstand des Zentralaggregats zu verhindern. Natürlich ist dies auch durch das Formulieren von Regeln möglich, jedoch könnten die vorhandenen Regeln, die für die Fehlerlokalisierung genutzt wurden, nicht einfach übernommen werden. Vielmehr müsste ein neuer, auf die Aufgabe zugeschnittener Regelsatz aus dem Basismodell abgeleitet werden. Jedoch ist auch anzumerken, dass die Diagnosemaschine, die die Komponentenmodelle nutzt, in der derzeitigen Version noch nicht alle gesteckten Ziele erreicht (siehe oben), so dass es noch einigen Programmieraufwand bedarf, bevor solche „einfachen“ Ableitungen möglich sind.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Fehlerlokalisierung in Lebensmittelverpackungsanlagen mit den in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methoden mit einer hohen Genauigkeit realisiert werden kann. Die schnelle und flexible Anpassbarkeit der Tools an unterschiedlichste Anlagen, die ein Hauptziel dieser Arbeit darstellt, ist sowohl beim regelbasierten als auch beim modellbasierten Ansatz gegeben. Mit der Bedeutung für die Optimierungsmaßnahmen in realen Anlagen befasst sich das folgende Kapitel.

5.4 Vergleich der unterschiedlichen Stillstandsauswertungen und wirtschaftliches Potential der Diagnose zur Fehlerlokalisierung

Um die Verbesserungen durch die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Methoden gegenüber dem Stand der Technik bei der Diagnose von Lebensmittelverpackungsanlagen deutlich zu machen, erfolgt ein Vergleich der üblichen Auswertung von Betriebsdaten einer Getränkeabfüllanlage mit den Ergebnissen der neu entwickelten Diagnosemethoden.

5.4.1 Ergebnisse und Bewertung

Für den Vergleich wurden, wie in [206] beschrieben, mithilfe des Simulationsmodells Betriebsdaten über eine Dauer von ca. neun Tagen (213 h) erzeugt. Dabei wurden die Maschinen der Anlage mit stochastischen Störzeitenverteilungen versehen, die aus einer der realen Referenzanlagen abgeleitet wurden (zu Details der Vorgehensweise siehe [206] und [300]), was in der Simulation zu zahlreichen Stillständen des Zentralaggregats führte.

Diese Daten wurden in dieser Arbeit sowohl statistisch ausgewertet, als auch mit einer der oben beschriebenen Methoden analysiert. Hierbei wurde der aus den Regeln abgeleitete Algorithmus gewählt, da dieser in der derzeitigen Umsetzung sowohl die zeitlich letzten Verursacher zuverlässig bestimmt als auch eine stichprobenartige Diagnose der anteiligen Verursachung ermöglicht. Dabei ist zu erwähnen, dass die Flaschenreinigungsmaschine durch einen Fehler bei der Datenaufzeichnung auch im Fehlerfall „Betrieb“ meldete, was aber toleriert wurde, um die Auswirkungen dieser „verrauschten“ bzw. fehlerhaften Information auf die verwendeten Auswertungen zu bewerten (siehe Tabelle 18).

Die statistischen Kennzahlen und die Ergebnisse des Algorithmus zur Bestimmung des zeitlich letzten Verursachers sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 dargestellt. Ihre Gegenüberstellung bezüglich der Anzahl zeigt Bild 73 und bezüglich der Dauer Bild 74.

Tabelle 18: Statistische Daten und Kennzahlen der Simulationsanlage (Erläuterung siehe Text)

Aggregat	Mach_ID	Fehler [Anzahl]	Gesamtstördauer [s]	MDT [s]	MTBF [s]	Wirkungsgrad [%]
Auspackmaschine	3001	134	155317	1159	1744	79,80
Flaschen-Abschraubemaschine	4001	272	263866	970	824	65,67
Flaschen-Waschmaschine	7001	0 ?	0 ?	0 ?	0 ?	100 ?
Leerflaschen-Inspektionsmaschine	8001	344	26227	76	818	96,59
Flaschen-Füll- und Verschließmaschine	9001	156	10606	67	1817	98,62
Etikettiermaschine	10001	140	30131	215	1882	96,08
Einpackmaschine	11001	227	82872	365	1019	89,22
Kasten-Waschmaschine	15001	212	279510	1318	1065	63,64
Leerkasten-Magazin	16001	0	0	0	0	100,00

Tabelle 19: Ergebnisse des Algorithmus zur Bestimmung des letzten Verursachers für die Simulationsanlage

Aggregat	Mach_ID	Fehlerverursacher [Anzahl]	Gesamtstördauer zentralaggregatsrelevante Störungen [s]	Stördauer am Zentralaggregat [s]
Auspackmaschine	3001	67	81585	95186
Flaschen-Abschraubemaschine	4001	203	202663	179908
Flaschen-Waschmaschine	7001	22	0 ?	2783
Leerflaschen-Inspektionsmaschine	8001	308	24265	22270
Flaschen-Füll- und Verschließmaschine	9001	156	10606	10606
Etikettiermaschine	10001	11	3891	1702
Einpackmaschine	11001	12	6239	2038
Kasten-Waschmaschine	15001	122	162085	2783
Leerkasten-Magazin	16001	0	0	0

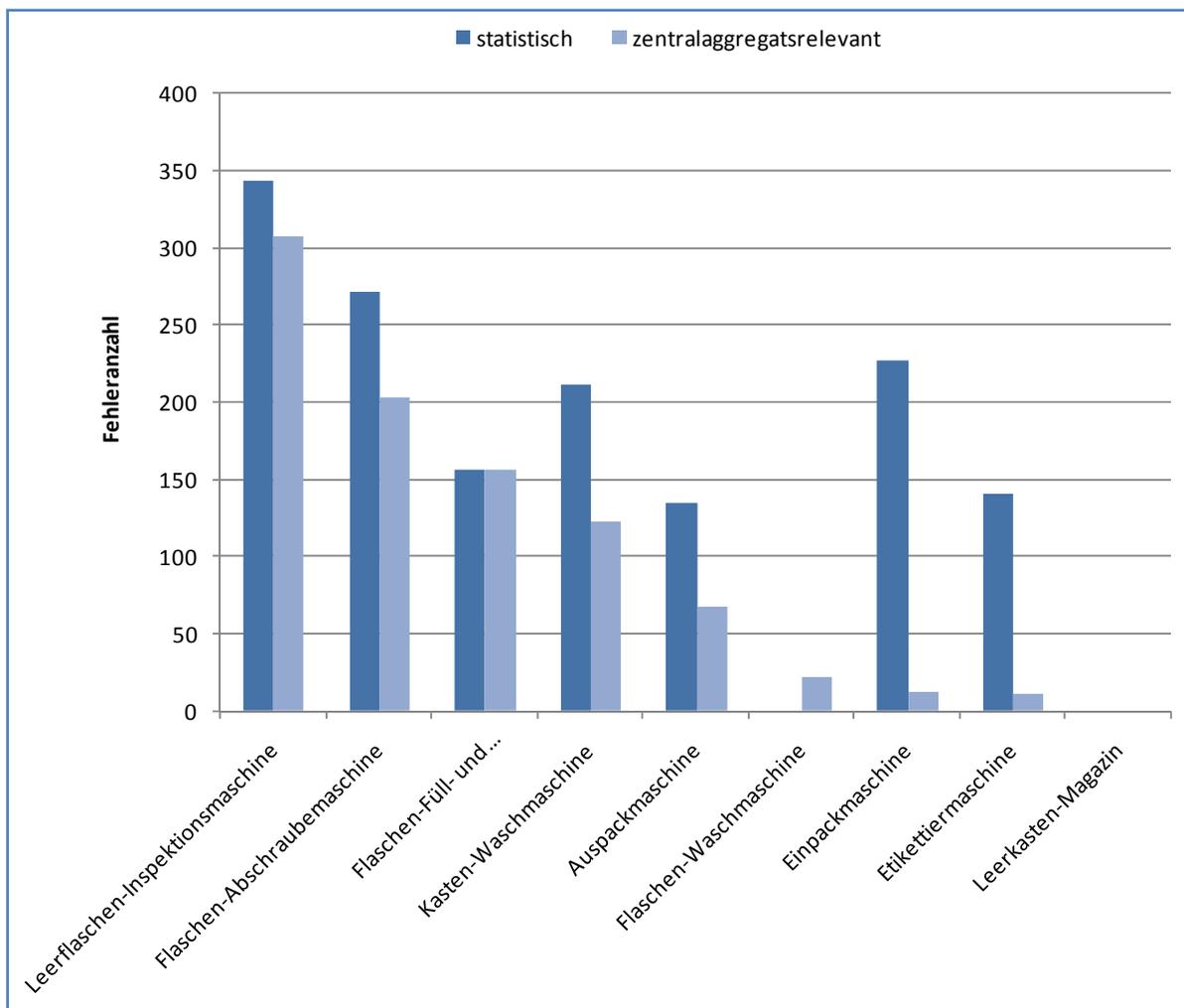


Bild 73: Gegenüberstellung der statistischen Fehleranzahl mit der Anzahl zentralaggregatsrelevanter Fehler

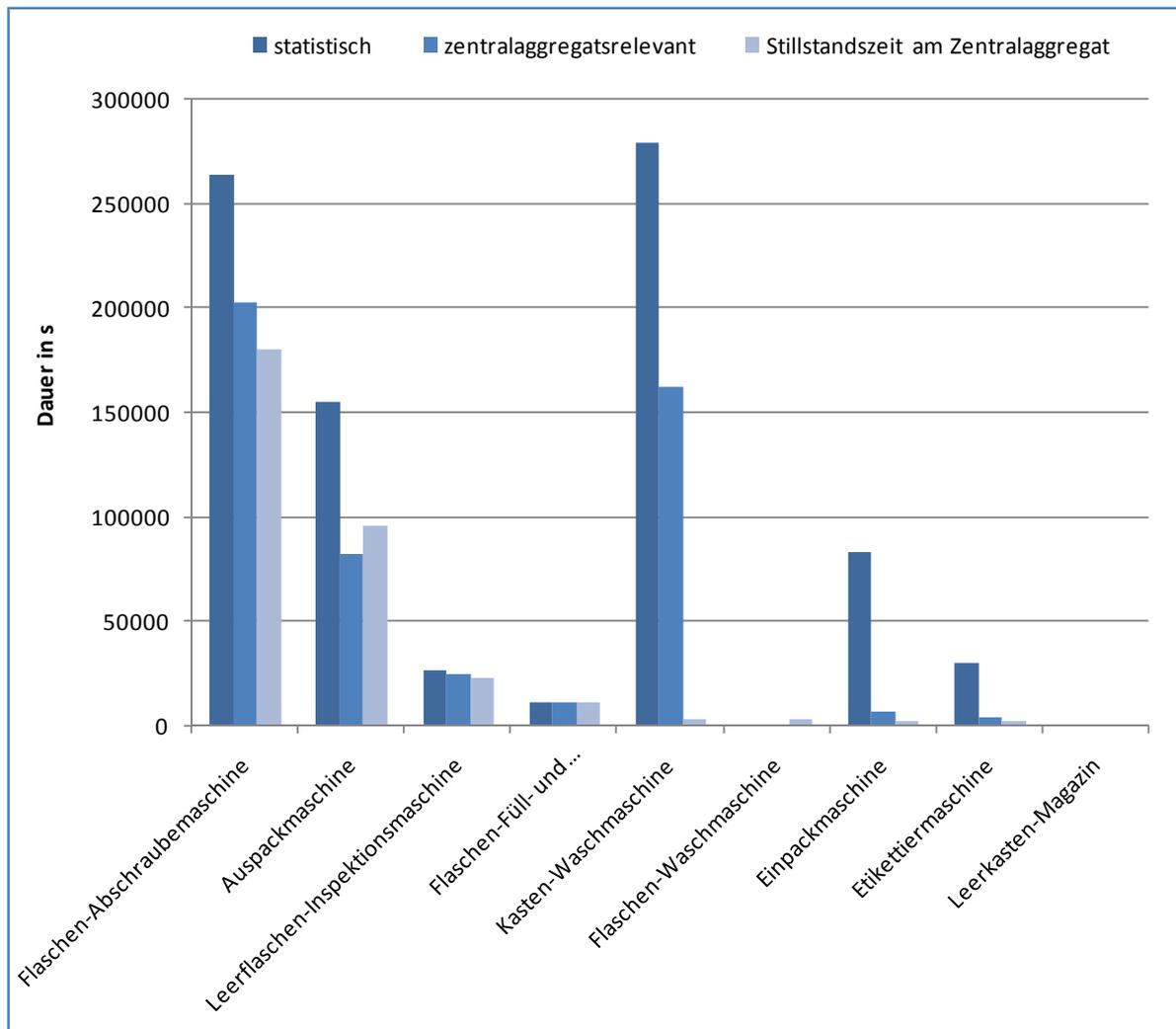


Bild 74: Gegenüberstellung der statistisch aufsummierten Gesamtstördauer mit den Summen der Dauern der zentralaggregatsrelevanten Störungen und den resultierenden Stördauern am Zentralaggregat

Bei den statistischen Kennzahlen zeigt sich, dass die Kasten-Waschmaschine und die Flaschen-Abschraubemaschine im betrachteten Zeitraum die schlechtesten Wirkungsgrade haben. Die höchsten durchschnittlichen Stördauern (MDT) besitzen die Kasten-Waschmaschine und die Auspackmaschine. Die geringsten durchschnittlichen Betriebszeiten zwischen den Fehlern (MTBF) besitzen die Leerflaschen-Inspektionsmaschine und die Flaschen-Abschraubemaschine.

Bei der Gegenüberstellung dieser statistischen Kennzahlen, die einer Kombination der Anzahl und Gesamtdauer der Störungen entsprechen, mit den Ergebnissen des Diagnosealgorithmus fällt auf, dass nur bedingt Zusammenhänge bestehen (vgl. Bild 75 und Bild 76). So führt zwar die Flaschen-Abschraubemaschine mit ihrem geringen Wirkungsgrad, hoher Gesamtstördauer, relativ niedriger MTBF und langer MDT auch zu der meisten Stillstandszeit am Zentralaggregat, die Kasten-Waschmaschine, die einen noch geringeren Wirkungsgrad aufweist, deren aufsummierten Störzeit den höchsten Wert besitzt und die außerdem die höchste MDT und eine relativ niedrige MTBF besitzt, hat jedoch praktisch keine nennenswerten Auswirkungen auf die Störzeiten am Zentralaggregat.

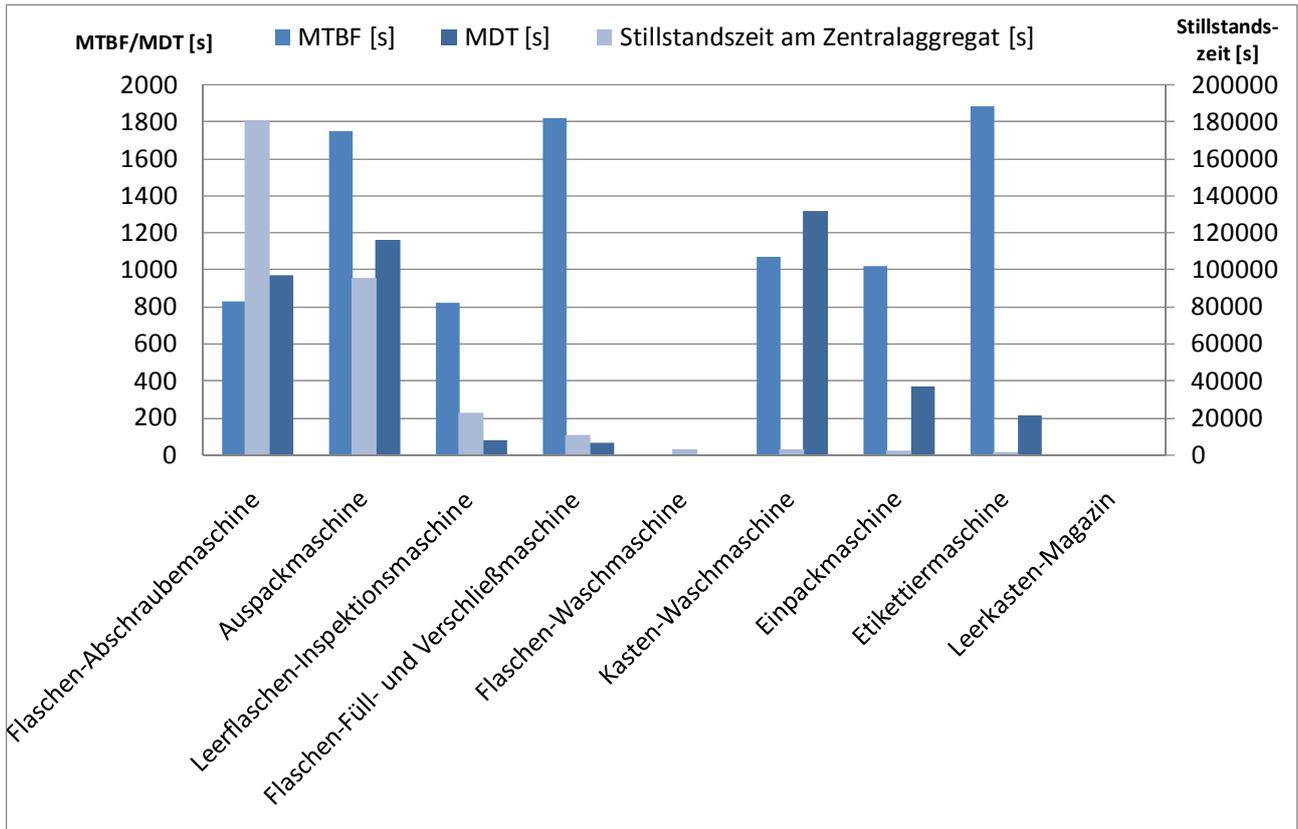


Bild 75: Gegenüberstellungen der MTBF und MDT mit den Stillstandszeiten am Zentralaggregat

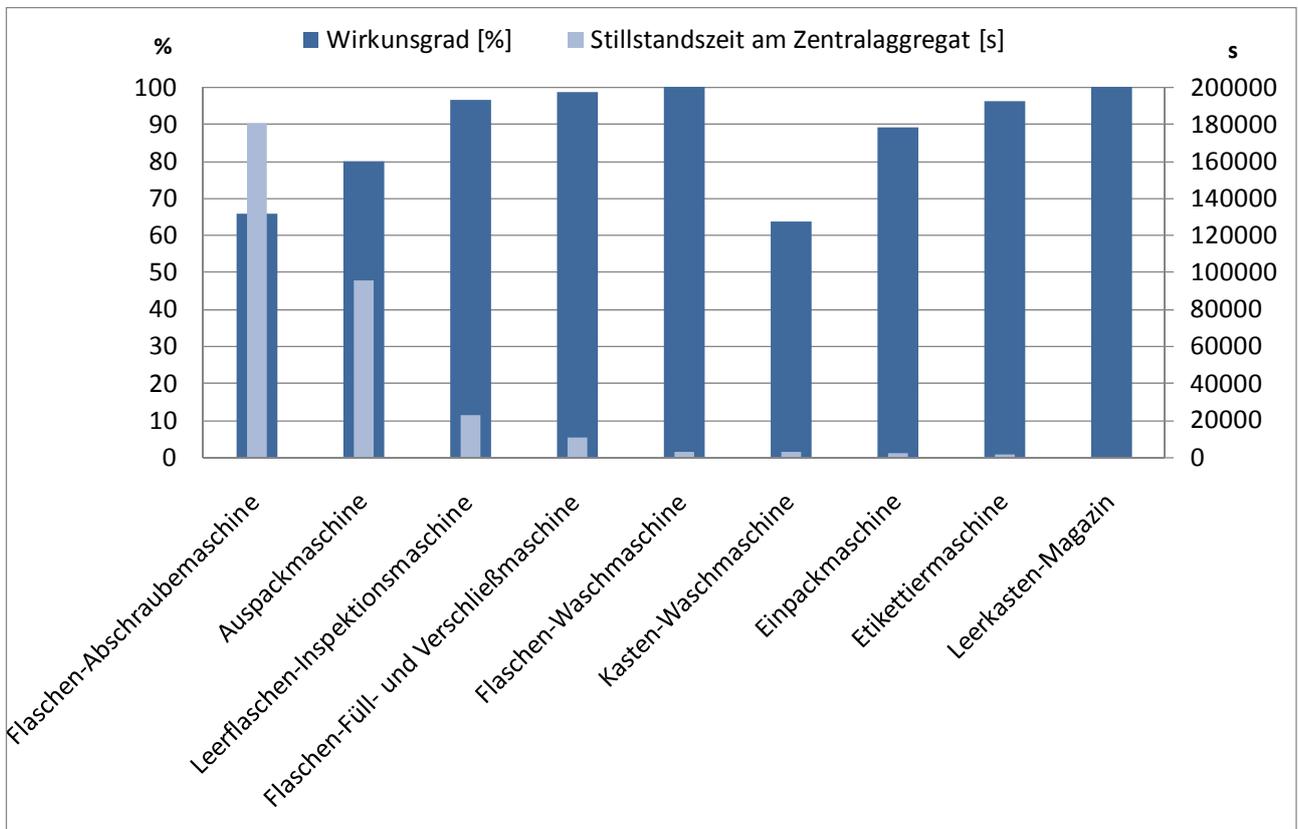


Bild 76: Gegenüberstellung der Wirkungsgrade mit den Stillstandszeiten am Zentralaggregat

Dies liegt darin begründet, dass bei den statistischen Kennzahlen die Puffer mit ihren Kapazitäten und Totzeiten unberücksichtigt bleiben.

Die Maschinen mit den geringsten MTBF verursachen zwar die meisten Störungen am Zentralaggregat, jedoch ist auch dies kein Zusammenhang, der über alle Maschinen gegeben ist, da hier ebenfalls die Abhängigkeit von der relativen Lage der Maschinen zum Zentralaggregat in der statistischen Kennzahl unberücksichtigt bleibt. Noch geringere Zusammenhänge bestehen bei der nach dem Stand der Technik üblichen Auswertung hinsichtlich der Summen der Störanzahl und –dauer.

Einen Sonderfall in den Ergebnissen stellt die Flaschen-Waschmaschine dar. Sie besitzt aufgrund der fehlerhaften Meldung der Betriebszustände (vgl. oben) scheinbar optimale statistische Kennzahlen, da sie über die gesamte Versuchszeit keine Eigenfehler meldet. Der Diagnosealgorithmus kann sie jedoch als Verursacher von Störungen lokalisieren, wobei als Ursache der Störung jedoch von einem unbekanntem Fehler, also keinem Eigenfehler, ausgegangen wird.

Es sollen an dieser Stelle keine erweiterten statistischen Untersuchungen dargestellt werden, da sie nicht den gängigen Auswertungen am Markt verfügbarer Systeme entsprechen. Es wird jedoch in der Diskussion kurz darauf eingegangen, wie auch die statistischen Daten besser genutzt werden könnten.

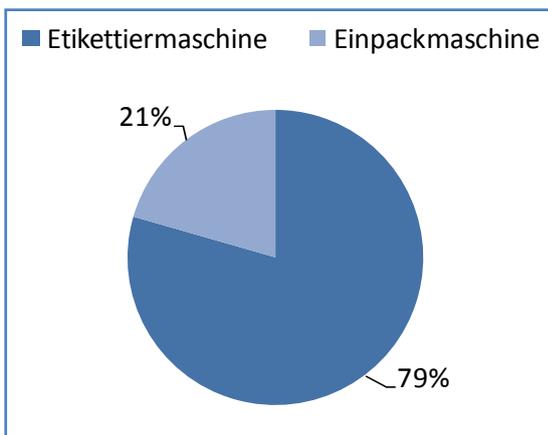


Bild 77: Ursachenanteil bei Stillständen am Zentralaggregat, bei denen die Etikettiermaschine der Letzverursacher war

Zusätzlich wurden die Stillstandszeiten auch auf ihre anteilige Verursachung hin untersucht. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild 77. Es gliedert die Stillstände am Zentralaggregat, bei denen die Etikettiermaschine als letzte Ursache identifiziert wurde, mithilfe der anteiligen Zuordnung in ihre eigentlichen Verursacher auf. Im dargestellten Fall ist die Einpackmaschine mit einem Anteil von ca. einem Fünftel an der Verursachung aller Fälle beteiligt. Allerdings ist auch die Etikettiermaschine für Stillstände, die letztendlich durch andere Maschinen verursacht wurden, teilweise mitverantwortlich. In der Versuchszeit besitzt sie mit 381s ca. 19% Anteil an den durch die Ein-

packmaschine verursachten Stillständen. Weitere Stillstände werden nicht von ihr beeinflusst. Eine vollständige Darstellung der anteiligen Verursacher erfolgt an dieser Stelle aufgrund der unter 4.2.1 erläuterten Ungenauigkeiten in der derzeitigen Tool-Version nicht.

5.4.2 Diskussion zu 5.4

Betrachtet man die Ergebnisse der statistischen Auswertung, so fällt auf, dass aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der Lage der einzelnen Maschinen in der Anlage relativ zum Zentralaggregat und der Transporteure/Puffer mit ihren Parametern, wie erwartet, keine direkten Rückschlüsse auf die Stillstände des Zentralaggregats und somit auf Liefergradminderun-

gen der Gesamtanlage gezogen werden können. Eine Optimierung der Gesamtanlage mithilfe von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten oder Modifikationen an liefergradmindernden Maschinen zur Verbesserung ihrer Verfügbarkeit ist auf der Basis dieser Kennzahlen schwierig. Leitet man die Kandidaten für solche effizienzsteigernden Maßnahmen ausschließlich aus den statistischen Daten ab, könnte dies z. B. im Fall der Kasten-Waschmaschine zu kostenintensiven Modifikationen oder Instandsetzungen führen, die aufgrund des sehr geringen Anteils dieses Aggregats an den Stillstandszeiten des Zentralaggregats (<1%) nur einen minimalen Einfluss auf das Gesamtanlagenverhalten haben. Natürlich ist es möglich, anhand der statistischen Kennzahlen unter aufwendigen Berechnungen, die die tatsächlichen oder durchschnittlichen Füllungsgrade der Puffer und die relative Lage der Maschinen berücksichtigen, diese Zusammenhänge aufzudecken, doch setzt dies eine Vielzahl von statistischen Berechnungen mithilfe vorliegenden Datenmaterials voraus. Diese Art der Berechnung entspräche in etwa der unter 4.2.1.5 beschriebenen Bewertung aller Betriebszustände der Maschinen auf ihr Störungspotential, wenn die genauen Informationen über die Pufferfüllungsgrade, wie nach derzeitigem Stand der Technik üblich, nicht zur Verfügung stehen.

Sinnvoller ist daher die Bewertung der Maschinen mit den in der Arbeit dargestellten Diagnosemethoden. Sie liefern exakt die Informationen, die für eine Optimierung der Anlage notwendig sind. So ist eine Ableitung von Optimierungsmaßnahmen aufgrund der verursachten Stillstandszeit möglich, die gezielte Wartungsarbeiten im Hinblick auf die Liefergradsteigerung der Anlage zulassen. Dabei kann die Auswirkung einer Investition, auch unter Zuhilfenahme der statistischen Kennzahlen, relativ gut berechnet werden. Durch den Anteil an Zentralaggregatsstillständen, der durch die Maschine mit den derzeitigen Kennzahlen verursacht wird, lässt sich mit einer erwarteten Verbesserung dieser Kennzahlen aufgrund der Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen oder einer Substitution der Maschine annähernd errechnen, wie sich der Liefergrad der Anlage verbessern wird. Dies kann zur Investitionsabschätzung herangezogen werden.

Zusätzlich kann auf Basis der Analyse der Anzahl der verursachten Stillstände auch eine Optimierung des fremdverursachten Stop-and-Go Verhaltens des Zentralaggregats (oder auch anderer Maschinen, die in diesem Fall an Stelle des Zentralaggregats als Diagnoseauslöser betrachtet werden können) erfolgen, was laut [300] ein Ansteigen der Eigenstöranfälligkeit dieser Maschine vermindern und die Lebensdauer der Maschine verlängern kann.

Eine genaue Analyse der anteiligen Verursachung kann zusätzlich das Aufdecken von Problemen bei der Anlagensteuerung oder -regelung erleichtern. So kann mit ihrer Hilfe beurteilt werden, ob bei der derzeitigen Auslegung und Steuerung oder Regelung der Anlage der gewünschte Normalfüllungsgrad bei störungsfreiem Verhalten auch schnell wiederhergestellt und eingehalten wird oder ob die Puffer sich langsamer regenerieren als gewünscht. In diesem Fall würden sehr weit in der Vergangenheit liegende Störungen immer noch Auswirkungen auf Stillstände des Zentralaggregats haben, obwohl die Maschinen, aufgrund ihrer Überausbringungen bezogen auf das Zentralaggregat, diese längst hätten ausgleichen müssen. Die Diagnosemethoden erlauben somit eine ganzheitliche Optimierung der Anlage.

Jedoch haben auch die statistischen Kennzahlen ihre Berechtigung bei der langfristigen Anlagenoptimierung. So sind insbesondere die Veränderung der Wirkungsgrade sowie der MTBF und MDT Anhaltspunkte für eine Verschlechterung des Maschinenzustands über die Maschinenlebensdauer und können für die vorbeugende Instandhaltung genutzt werden, die Totalausfälle von Maschinen minimiert. Eine Kombination der statistischen Kennzahlen mit den in der Arbeit entwickelten Diagnosemethoden sichert eine ganzheitliche Betrachtung und Verbesserung der Lebensmittelverpackungsanlagen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das Abfüllen und Verpacken von Lebensmitteln stellt als letzter Schritt der Produktion einen wesentlichen Bestandteil der Wertschöpfungskette in Unternehmen der Lebensmittelindustrie dar. Neben den hohen Anforderungen an die Qualität von Lebensmitteln ist auch der hohe Investitionsaufwand für Lebensmittelverpackungsanlagen dafür verantwortlich, dass ein möglichst stillstandsfreier Betrieb der Engpassmaschine, die die Gesamtausbringung der Anlage definiert, gesichert werden muss. So muss zum einen vermieden werden, dass durch Stillstände Verderbnisprozesse begünstigt werden. Zum anderen sind eine möglichst hohe Ausnutzung und ein möglichst hoher Liefergrad der Anlage anzustreben, um die Kosten pro verpackte Einheit möglichst zu minimieren. Um bestehende Anlagen hinsichtlich dieser Kennzahlen zu bewerten und Optimierungspotentiale aufzudecken, werden Diagnosen des Betriebs- und Fehlerverhaltens durchgeführt. Diese erfolgten nach derzeitigem Stand der Technik weitgehend manuell. Sie wurden in Form von stichprobenartigen Analysen durchgeführt, die sich auf Beobachtungen von Experten bzw. mit den Anlagen vertrauten Personen stützen. Die in den Betrieben teilweise vorhandenen Betriebsdatenerfassungssysteme wurden bisher lediglich zur statistischen Auswertung von Maschinenstillständen genutzt, die jedoch keine Aussagen darüber erlauben, ob ein Fehler an einer Maschine durch das mit Puffern versehene Steuerungs- und Regelungskonzept der Anlage kompensiert werden kann oder sich bis zum zentralen Aggregat fortpflanzt und liefergradmindernd auswirkt. Eine sinnvolle Datenanalyse wurde durch die in der Vergangenheit vorherrschende Vielzahl unterschiedlich interpretierter Datenpunkte und Kennzahlen zusätzlich erschwert. Erste Ansätze, eine automatische Fehlerlokalisierung auf Basis erfasster Betriebsdaten durchzuführen, konnten sich aufgrund fehlender Praxistauglichkeit nicht durchsetzen.

Das Ziel dieser Arbeit war es daher, praxistaugliche, leicht anpassbare Diagnosemethoden zu entwickeln, die mithilfe automatisch erfasster Betriebsdaten eine permanente Schwachstellenanalyse von Lebensmittelverpackungsanlagen ermöglichen. Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten beschäftigen sich mit der Diagnose medizinischer, naturwissenschaftlicher sowie technischer Problemstellungen. Bei einer Vielzahl dieser Arbeiten kommen wissenschaftliche Systeme zum Einsatz. Auf der Basis einer umfassenden Analyse der für die verschiedenen Bereiche verwendeten Systeme wurde eine Auswahl der am besten geeignet erscheinenden Methoden durchgeführt. Sowohl das Formulieren von Regeln als Bestandteil eines erfahrungswissenbasierten Systems als auch die Verwendung einer konsistenzbasierten Diagnose mit Komponenten-orientierten Modellen erschienen aufgrund der vorhandenen Anwendungen als zielführende Ansätze.

Um die identifizierten Methoden sinnvoll einsetzen zu können, wurde als erster Schritt gemeinsam mit Anlagen- und Systemherstellern sowie Anwendern eine Standardisierung für die Erfassung von Betriebsdaten in Lebensmittelverpackungsanlagen erarbeitet, um eine definierte Datenbasis zur Verfügung zu stellen. Die erste Version dieser „Weihenstephaner Standards“ wurde ausschließlich für die Maschinen in Getränkeabfüllanlagen entwickelt. Nach der

zügigen Verbreitung und der großen Akzeptanz dieser Standardisierung wurde eine Ausweitung auf die gesamte Lebensmittelverpackungsindustrie durchgeführt.

Zusätzlich wurde die generelle Stillstandsfortpflanzung in verketteten Anlagen in Form von mathematischen Gleichungssystemen modelliert. Dabei wurden sowohl einfache lineare als auch Konstellationen mit mehreren parallelen Maschinen sowie verschiedenen, sich gegenseitig beeinflussenden Materialflüssen berücksichtigt. Die Modellierung zeigte, dass für eine detaillierte Berechnung der Fortpflanzung von Stillständen die genaue Bestimmung der Füllungsgrade der einzelnen in der Anlage vorhandenen Objektpuffer benötigt wird. Da diese mit den derzeitig verfügbaren Sensoren lediglich bei Bereichen mit einsträngig zu- und abgeführten Objekten möglich ist, wurde ein Sensorsystem entwickelt, das es erlaubt, pulkartig geförderte Objekte zu detektieren und zu zählen. Aufgrund der Tatsache, dass solche Sensorsysteme sich erst im Entwicklungsstadium befinden und entsprechende Daten in realen Anlagen nicht erfasst werden können, konnte die mathematische Modellierung lediglich als theoretische Grundlage für die Diagnose dienen. Mithilfe dieses Basismodells wurden jedoch eigene Wissensbasen für die unterschiedlichen verwendeten Methoden erarbeitet.

Für das erfahrungswissenbasierte System wurden regelhafte Zusammenhänge abgeleitet, die sowohl die Lokalisierung des letztendlichen Verursachers für einen Stillstand des zentralen Aggregats ermöglichen, als auch eine anteilige Zuordnung eines Stillstands zu mehreren Verursachern erlauben. Diese anteilige Verursachung ist von Bedeutung, da bestimmte Maschinenfehler durch das Füllen oder Entleeren der zwischen den Maschinen befindlichen Puffer die Anlage aus ihrem Gleichgewicht bringen können, so dass eine kurze Störung einer anderen Maschine, die im Normalzustand durch die Steuerungs- und Regelungsmechanismen der Anlage abgefangen worden wäre, zu einem Stillstand führt. Eine ausschließliche Diagnose der zeitlich letzten Ursache für den Stillstand an der Engpassmaschine wäre somit nicht zielführend, da das Diagnoseergebnis eine Optimierung des Laufverhaltens der Anlage ermöglichen soll. Die Validierung der Regeln erfolgte aus Vereinfachungsgründen nicht in einem wissensbasierten System sondern durch einen konventionellen Algorithmus, in dem die Regeln in Form von Bedingungen rekursiver Funktionen implementiert wurden.

Für das modellbasierte System wurden kontextfreie Komponenten in Form von First-Principle-Gleichungen erstellt, die den Aufbau von Modellen verschiedenster Lebensmittelverpackungsanlagen erlaubt. Die Funktionalitäten der verschiedenen Maschinen wurden dabei auf den (durch die Maschinenfunktion) verzögerten Transport von Objekten beschränkt, die sich durch einen potentiellen und tatsächlichen Fluss und bestimmte Maschinenparameter, wie die Kapazität der Maschine und die als Totzeit bezeichnete Transportverzögerung, auszeichnen. Diese generische Art der Modellierung erlaubt es, Transporteure mit und ohne Pufferfunktion ebenfalls als Maschinen bzw. Maschinen als eine besondere Form der Transporteure zu betrachten. Zusätzlich zu dieser als Material Transporter (MT) bezeichneten Komponente wurde die virtuellen Komponenten Transportation Connector (TC), Combine Element (CE) und Separation Element (SE) geschaffen, die das Verknüpfen einzelner MT und das Zusammenfügen und Auflösen von Packungen ermöglichen. Auch diese Methode ermöglicht somit die Darstellung von Lebensmittelverpackungsanlagen mit verschiedenen, sich beein-

flussenden Güterströmen etc. Das so erstellte Modell wurde mithilfe einer numerischen Simulationsumgebung und dem Vergleich mit einer realen Anlage validiert. Für die Validierung der Diagnosetauglichkeit wurde durch die Gruppe „Model-Based Systems & Qualitative Reasoning“ der Technischen Universität München aus den Komponenten ein qualitatives Modell erstellt, welches in einer durch diese Gruppe modifizierten Diagnosemaschine verwendet werden kann.

Beide Methoden wurden sowohl mit Daten aus einem Simulationsmodell als auch mit Daten aus zwei realen Getränkeabfüllanlagen überprüft. Sie lieferten dabei vergleichbare Ergebnisse. Während beide Methoden bei den Simulationsfällen eine 100 %ige Zuordnung der Verursacher durchführten, gab es in den realen Anlagen einen minimalen Anteil an Fehldiagnosen. Dieser lag, bezogen auf die Gesamtanzahl der Stillstände des Zentralaggregats, bei dem auf Regeln basierenden Tool zwischen 1 und 2% (ohne Datenbankfehler) und bei der modellbasierten Lösung zwischen 3 und 8% (beinhaltet auch Datenbankfehler). Dieser geringe Anteil an Fehldiagnosen ist umso höher zu bewerten, wenn zusätzlich der geringe Aufwand für die Anpassung der Tools an die realen Anlagen berücksichtigt wird. Während die neu entwickelten Methoden lediglich über wenige Anlageninformationen parametrisiert werden, musste man das in der Arbeit als Referenz dienende Künstliche Neuronale Netz (KNN) zur Erkennung von Stillstandsverursachern seinerzeit erst aufwendig über Tage bis Wochen mit den Daten der realen Anlage trainieren. Neben diesen Kriterien zeigten die neu entwickelten Methoden im Vergleich mit der KNN-Lösung (als einzige bisher dokumentierte Diagnoselösung für Lebensmittelverpackungsanlagen) auch bei der Unterscheidung verschiedener Fehler, der Erkennung von Mehrfachfehlern, der Identifikation neuer Fehler und der Erklärung der Fehlerfortpflanzung deutliche Verbesserungen.

Zusätzlich zu der Überprüfung der Funktionalität der Methoden wurde ihr Potential im Vergleich zu einer statistischen Auswertung untersucht. Hierzu wurden Daten eines längeren Zeitraums sowohl mit dem auf Basis des regelbasierten Algorithmus programmierten Tool als auch statistisch ausgewertet und die Ergebnisse verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die statistischen Kennzahlen einer Maschine, wie der Wirkungsgrad, die mittlere Laufzeit (MTBF) oder mittlere Stördauer (MDT), die den derzeitigen Stand der Technik bei der Störungsanalyse darstellen, im Gegensatz zur Fehlerlokalisierung keine Rückschlüsse auf die Anzahl und Dauer liefergradmindernder Maschinenstillstände erlaubt. Als wesentliche Kennzahl für die Bewertung der Maschinen einer Linie wurde die von ihr verursachte Stillstandszeit am Zentralaggregat identifiziert, die mithilfe der Fehlerlokalisierung quantifizierbar wird. Hierbei wurde beispielhaft auch das anteilige Mitwirken an Störungen, die endgültig von anderen Maschinen verursacht wurden, berücksichtigt.

Die Softwaretools konnten zeigen, dass beide verfolgten Ansätze geeignet sind, um die Fehlerlokalisierung in Lebensmittelverpackungsanlagen mit einer im Mittel bei mehr als 95 % liegenden Genauigkeit durchzuführen. Erweiterungen in zukünftigen Arbeiten sollten die Ansätze erweitern, um neben der umfassenden Fehlerlokalisierung, also der Bestimmung der verursachenden Maschine, auch eine Fehleridentifikation, also die Ermittlung der Ursache für den Stillstand an dieser Maschine, vorsehen. Hierbei kann auch die Zuhilfenahme zusätzlicher

Methoden, wie beispielsweise probabilistischer Netzwerke, sinnvoll sein, um mehrdeutige Aussagen bezüglich ihrer Wahrscheinlichkeiten quantifizierbar zu machen. Die Etablierung der „Weihenstephaner Standards“ in der Getränkeindustrie und ihre Erweiterung auf die gesamte Lebensmittelverpackungsindustrie ermöglicht für zukünftige Arbeiten zur Datenanalyse eine gesicherte Basis. Diese kann auch in anderen Bereichen, wie der vorbeugenden Instandhaltung oder der Produktionsfeinplanung, in Zukunft genutzt werden. Ein besonders vielversprechendes Feld stellt dabei die Steuerungs- und Regelungstechnik dar. Hier eröffnen sowohl die Nutzung neuer Sensorsysteme, wie des in der Arbeit beschriebenen, als auch der Trend zur modellbasierten Regelung von Prozessen und Abläufen viele Möglichkeiten, für auf den Erkenntnissen dieser Arbeit aufbauende Forschungsarbeiten.

7. Literaturverzeichnis

- [1] AAMODT, A.; PLAZA, E.: CASE-BASED REASONING: FOUNDATIONS ISSUES, METHODOLOGICAL VARIATIONS, AND SYSTEM APPROACHES. *AI COMMUNICATIONS* 7 (1994), S. 35-59
- [2] ABBAS, H. A.: AN EVOLUTIONARY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS APPROACH FOR BREAST CANCER DIAGNOSIS. *ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MEDICINE*, 25 (2002), S. 265-281
- [3] ADAM, G. K.; KARAPOULIOS, C.: MODEL-BASED QUALITATIVE STUDIES OF COMPLEX MANUFACTURING SYSTEMS. IN: *WSEAS TRANSACTIONS ON INFORMATION SCIENCE AND APPLICATIONS*, 1 (2004) Nr. 1, S. 88-93
- [4] AHVENAINEN, R.: *NOVEL FOOD PACKAGING TECHNIQUES*. CAMBRIDGE: WOODHEAD PUBLISHING LTD., 2003
- [5] ALIPIO, P.; NEVES, J.; CARVALHO, P.: AUTOMATIC DETECTION OF SLS VIOLATION USING KNOWLEDGE BASED SYSTEMS. IN: *KNOWLEDGE-BASED INTELLIGENT INFORMATION AND ENGINEERING SYSTEMS (KES) 2006, PART I*, S. 1083-1089, BERLIN HEIDELBERG: SPRINGER, 2006
- [6] ALMEIDA, J. S.: PREDICTIVE NON-LINEAR MODELING OF COMPLEX DATA BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. *CURRENT OPINION IN BIOTECHNOLOGY*, 13 (2002), S. 72-76
- [7] AMINIAN, M.; AMINIAN, F.: NEURAL-NETWORK BASED ANALOG-CIRCUIT FAULT DIAGNOSIS USING WAVELET TRANSFORM AS PREPROCESSOR. *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS*, 47 (2000), Nr. 2, S. 151-156
- [8] ANTAL, P. ET AL.: BAYESIAN NETWORKS IN OVARIAN CANCER DIAGNOSIS: POTENTIALS AND LIMITATIONS. *PROCEEDINGS OF THE 13TH IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTER-BASED MEDICAL SYSTEMS (CBMS)* (2000), S. 103
- [9] ARITON, V.: DEEP AND SHALLOW KNOWLEDGE IN FAULT DIAGNOSIS. IN: PALADE, V.; HOWLETT, R. J.; JAIN, L. C. (HRSG.): *KNOWLEDGE-BASED INTELLIGENT INFORMATION AND ENGINEERING SYSTEMS (KES) 2003*, BERLIN HEIDELBERG: SPRINGER, 2003, S. 748-755
- [10] ARNDT, G.: STAND DER FLASCHENABFÜLLUNG – TROCKENTEIL. *BRAUWELT* (2005), Nr. 41, S. 1374-1375
- [11] ARNDT, G.: STAND DER FLASCHENABFÜLLUNG – NASSTEIL. *BRAUWELT* (2005), Nr. 44, S. 1449-1453
- [12] ARNDT, G.: PERIPHERIE DER GETRÄNKEABFÜLLUNG. *BRAUWELT* (2006), Nr. 50 S. 1543-1545
- [13] ATLANTIC C: DYNAMISCHES ETAGENPUFFERSYSTEM FÜR PET FLASCHEN. *DEUTSCHE MILCHWIRTSCHAFT* 55 (2004), Nr. 21, S. 872-873
- [14] BACK, W.: SEKUNDÄRKONTAMINATIONEN IM ABFÜLLBEREICH. *BRAUWELT* 134 (1994), Nr. 16, S. 686-690 u. 692-695
- [15] BAI, Y.; WANG, D.: FUNDAMENTALS OF FUZZY LOGIC CONTROL – FUZZY SETS, FUZZY RULES AND DEFUZZIFICATION. IN: BAI, Y.; ZHUANG, H.; WANG, D. (HRSG.): *ADVANCED FUZZY LOGIC TECHNOLOGIES IN INDUSTRIAL APPLICATIONS*, LONDON: SPRINGER, 2006
- [16] BAI, Y.; ZHUANG, H.; WANG, D. (HRSG.): *ADVANCED FUZZY LOGIC TECHNOLOGIES IN INDUSTRIAL APPLICATIONS*, LONDON: SPRINGER, 2006
- [17] BAJERS, F.: BAYESIAN NETWORKS AND INFLUENCE DIAGRAMS. AALBOURG, QUELLE: [HTTP://WWW.DINA.DK/EFITA-CONF/PROGRAM/PAPERSPDF/IX_2.PDF](http://www.dina.dk/efita-conf/program/paperspdf/ix_2.pdf), 11.2007
- [18] BALDUZZI, F.; MENGA, G.: A STATE VARIABLE MODEL FOR THE FLUID APPROXIMATION OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS. IN: *PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION* (1998), S. 1172-1178
- [19] BAU, D.-Y.; BRÉZILLON, P.-J.: MODEL-BASED DIAGNOSIS OF POWER-STATION CONTROL SYSTEMS. *IEEE EXPERT*. 7 (1992), S. 36-44
- [20] BECHMANN, F.: NEUE IMPULSE – BETRIEBSDATENERFASSUNG FÜR FLASCHENFÜLLLINIEN. *GETRÄNKEINDUSTRIE* 49 (1995), Nr. 7, S. 507-511

- [21] BECHMANN, F.; KEHL, H.; RÄDLER, T.; WEISSER, H.: COMPUTER AIDED TECHNIQUES IN BREWERIES. ZOUTERWOUDE: EUROPEAN BREWING COVENTION TECHNOLOGY & ENGINEERING FORUM, REPORT, 1998
- [22] BEIERLE C.; KERN-ISBERNER, G.: METHODEN WISSENSBASIERTER SYSTEME. 2. AUFLAGE WIESBADEN: VIEWEG-VERLAG, 2003
- [23] BERENJI, H.; WANG, Y.; SAXENA, A.: DYNAMIC CASE BASED REASONING IN FAULT DIAGNOSIS AND PROGNOSIS. PROCEEDINGS OF THE 2005 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS (2005), S. 845-850
- [24] BESCHTA, A.; DRESSLER, O.; FREITAG H.; MONTAG, M.; STRUSS, P.: A MODEL-BASED APPROACH TO FAULT LOCALIZATION IN POWER TRANSMISSION NETWORKS. INTELLIGENT SYSTEMS ENGINEERING, 2 (1993), NR. 1, S. 3-14
- [25] BIBEL, W.: DEDUKTION – AUTOMATISIERUNG DER LOGIK. MÜNCHEN, WIEN: ELSEVIER, 1992
- [26] BIDIAN, T. ET AL.: POWERTRAIN DIAGNOSTICS – A MODEL-BASED APPROACH. PAPER PRESENTED AT ERA TECHNOLOGY VEHICLE ELECTRONIC SYSTEMS CONFERENCE, CONVENTRY, GROßBRITANNIEN, (1999)
- [27] BLEISCH, G.; GOLDHAHN, H.; SCHRICKER, G.; VOGT, H.: LEXIKON VERPACKUNGSTECHNIK, HAMBURG: BEHR, 1. AUFLAGE 2003
- [28] BLÜMEL, R.: NUTZUNG DER SIMULATION FÜR DEN ENTWURF SERVOMECHANISCH REALISIERTER VERARBEITUNGSABLÄUFE IN VERPACKUNGSMASCHINEN. IN: TU DRESDEN, FRAUNHOFER IVV (HRSG.): TAGUNGSBAND FACHTAGUNG VVD 2003 – VERARBEITUNGSMASCHINEN UND VERPACKUNGSTECHNIK – INNOVATIV UND EFFIZIENT. DRESDEN, 2003, S. 465-473
- [29] BLÜML, S.; FISCHER, S.: HANDBUCH DER FÜLLTECHNIK. HAMBURG: BEHR, 2004
- [30] BOCANIALA, C. D.; SA DA COSTA, J.; LOURO, R.: A FUZZY CLASSIFICATION SOLUTION FOR FAULT DIAGNOSIS OF VALVE ACTUATORS. IN: PALADE, V.; HOWLETT, R. J.; JAIN, L. C. (HRSG.): KNOWLEDGE-BASED INTELLIGENT INFORMATION AND ENGINEERING SYSTEMS (KES) 2003, BERLIN HEIDELBERG: SPRINGER, 2003
- [31] BORGELT, C.; KRUSE, R.: GRAPHICAL MODELS – METHODS FOR DATA ANALYSIS AND MINING. WILEY, 2002
- [32] BOTTANI, E. ET AL.: SIZING AND DESIGN OF A BOTTLING PLANT BY MEANS OF A SIMULATION MODEL. INDUSTRIE DELLE BEVANDE, 201 (2006), NR. 1, S. 1-10
- [33] BRAGLIA, M.: DESIGNING A BELT CONVEYOR CONTROLLER IN A BOTTLING PLANT USING FUZZY LOGIC AND GENETIC ALGORITHMS. PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE 14 (2001), NR. 6, S. 231-248
- [34] BREUKER, J.; VAN DE VELDE, W.: COMMONKADS LIBRARY FOR EXPERTISE MODELING – REUSABLE PROBLEM SOLVING COMPONENTS, IOS PRESS, 1994
- [35] BRODIE, M.; RISH, I.; MA, S.: INTELLIGENT PROBING: A COST-EFFECTIVE APPROACH TO FAULT-DIAGNOSIS IN COMPUTER NETWORKS. IBM SYSTEMS JOURNAL, 41 (2002) NR. 3, S. 372-385
- [36] BROOKS, D. W.; GILES, A. G.: PET PACKAGING TECHNOLOGY. SHEFFIELD: CRC PRESS, 2002
- [37] BUCHANAN, B. G.; SHORLIFE, E. H.: RULE-BASED EXPERT SYSTEMS. THE MYCIN EXPERIMENTS OF THE STANFORD HEURISTIC PROGRAMMING PROJECT. ADDISON WESLEY, READING, MA, 1984
- [38] BUREAU, G.; MULTON, J.-L.: FOOD PACKAGING TECHNOLOGY, BAND 1. NEW YORK, WEINHEIM, CAMBRIDGE: VCH VERLAGSGESELLSCHAFT MBH, 1996
- [39] BUREAU, G.; MULTON, J.-L.: FOOD PACKAGING TECHNOLOGY, BAND 2. NEW YORK, WEINHEIM, CAMBRIDGE: VCH VERLAGSGESELLSCHAFT MBH, 1996
- [40] BURNSIDE, E. S.: BAYESIAN NETWORKS COMPUTER-ASSISTED DIAGNOSIS SUPPORT IN RADIOLOGY. ACADEMIC RADIOLOGY, 12 (2005), NR. 4, S. 422-430
- [41] BUZACOTT, J.: STOCHASTIC MODELS OF MANUFACTURING SYSTEMS. ENGELWOOD CLIFFS: PRENTICE HALL, 1993
- [42] BV GLAS UND MINERALFASER STANDARDBLATT NR. A82: BIERFLASCHE NRW, DÜSSELDORF, 1989
- [43] BV GLAS UND MINERALFASER STANDARDBLATT NR. A101: PACKMITTEL – FLASCHEN: 0,33-L-ALE FLASCHE, DÜSSELDORF, 1993

- [44] BV GLAS UND MINERALFASER STANDARDBLATT NR. A103: PACKMITTEL – FLASCHEN: 0,5-L-ALE FLASCHE, DÜSSELDORF, 1993
- [45] CAPGEMINI DEUTSCHLAND GMBH: STUDIE: LEISTUNGSRESERVEN DER INSTANDHALTUNG IN BRAUEREIEN. BAD HOMBURG, 2001
- [46] CARRASCO, E. F. ET AL.: RULE-BASED DIAGNOSIS AND SUPERVISION OF A PILOT-SCALE WASTEWATER TREATMENT PLANT USING FUZZY LOGIC TECHNIQUES. EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS, 22 (2002), S. 11-20
- [47] CASCIO, F.; CONSOLE, L.; GUAGLIUMI, M.; OSELLA, M.; PANATI, A.; SOTTANO, S.; THESEIDER-DUPRÉ, D.: STRATEGIES FOR ON-BOARD DIAGNOSTICS OF DYNAMIC AUTOMOTIVE SYSTEMS USING QUALITATIVE MODELS. AI COMMUNICATIONS, 1999
- [48] CE.T.I.E. GME 13.01: KRONENKORKENMUNDSTÜCK 26 H 180, PARIS, 1997
- [49] CE.T.I.E. GME 13.02: KRONENKORKENMUNDSTÜCK 26 H 126, PARIS, 1997
- [50] CHAVIRA, M.; DARWICHE, A.; JAEGER, M.: COMPILING RELATIONAL BAYESIAN NETWORKS FOR EXACT INFERENCE. INTERNATIONAL JOURNAL OF APPROXIMATE REASONING, 42 (2006), NR. 1-2, S. 4-20
- [51] CHEN C. ET AL.: BREAST LESIONS ON SONOGRAMS: COMPUTER-AIDED DIAGNOSIS WITH NEARLY SETTING-INDEPENDENT FEATURES AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. RADIOLOGY, 226 (2003), NR. 2, S. 504-511
- [52] CHEN, M. ET AL.: FAILURE DIAGNOSIS USING DECISION TREES. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMIC COMPUTING (ICAC'04), NEW YORK, USA (2004), S. 36-43
- [53] CHEN, W.-H.; LIU, C.W.; TSAI, M. S.: ON-LINE FAULT DIAGNOSIS OF DISTRIBUTION SUBSTATIONS USING HYBRID CAUSE EFFECT NETWORK AND FUZZY RULE-BASED METHOD. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 15 (2000), NR. 2, S. 710-717
- [54] CHEN, Y. ET AL.: ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS ANALYSIS OF SURFACE-ENHANCED LASER DESORPTION/IONIZATION MASS SPECTRA OF SERUM PROTEIN PATTERN DISTINGUISHES COLORECTAL CANCER FROM HEALTHY POPULATION. CLINICAL CANCER RESEARCH, 10 (2005), S. 8380-8385
- [55] CHIEN, C.-F.; CHEN, S.-L.; LIN, Y.-S.: USING BAYESIAN NETWORK FOR FAULT LOCATION ON DISTRIBUTION FEEDER. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 17 (2002), NR. 13, S. 785-793
- [56] COLLINS, J.: PROCESS-BASED DIAGNOSIS: AN APPROACH TO UNDERSTANDING NOVEL FAILURES. DISSERTATION, INSTITUTE FOR THE LEARNING SCIENCES, NORTHWESTERN UNIVERSITY, 1993
- [57] CONSOLE, L.; DRESSLER, O.: MODEL-BASED DIAGNOSIS IN THE REAL WORLD: LESSONS LEARNED AND CHALLENGES REMAINING. PROCEEDINGS OF THE 16TH IJCAI, STOCKHOLM, SCHWEDEN, 1999, S. 1393-1400
- [58] CONWELL, R. G.; DAWID, A. P.; LAURITZEN, S. L.; SPIEGELHALTER, D. J.: PROBABILISTIC NETWORKS AND EXPERT SYSTEMS. NEW YORK, BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER, 1999
- [59] COOKE, R. M.; BOSMA, A.; HÄRTE, F.: A PRACTICAL MODEL OF HEINEKEN'S BOTTLE FILLING LINE WITH DEPENDENT FAILURES. EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH 164 (2005), S. 491-504
- [60] CUNIS, R.: MODELLBASIERTE DIAGNOSE MIT DIAMON. IN : HOTZ, L.; GUCKENBIEHL, T., STRUSS, P.: INTELLIGENTE DIAGNOSE IN DER INDUSTRIELLEN ANWENDUNG. SHAKER VERLAG, AACHEN, 2000
- [61] CUNIS, R.; STRUSS, P.: INDIA – INTELLIGENTE DIAGNOSE IN DER INDUSTRIELLEN ANWENDUNG. IN: HOLTZ, L.; STRUSS, P.; GUCKENBIEHL, T. (HRSG.): INTELLIGENT DIAGNOSIS IN INDUSTRIAL APPLICATIONS, SHAKER VERLAG: AACHEN, 2001, S. 1-9
- [62] DALLERY, I.; GERSHWIN, S. B.: MANUFACTURING FLOW LINE SYSTEMS: A REVIEW OF MODELS AND ANALYTICAL RESULTS. QUEUING SYSTEMS 12 (1992), NR. 1-2, S. 3-94
- [63] DARWICHE, A.: MODEL-BASED DIAGNOSIS UNDER REAL-WORLD CONSTRAINTS. AI MAGAZINE 21 (2000), NR. 2, S. 57-73.
- [64] DASH, S.; RENGASWAMY, R.; VENKATASUBRAMANIAN, V.: FUZZY-LOGIC BASED TREND CLASSIFICATION FOR FAULT DIAGNOSIS OF CHEMICAL PROCESSES. COMPUTERS AND CHEMICAL ENGINEERING 27 (2003), S. 347-362
- [65] DE, S. K.; BISWAS, R.; ROY, A. R.: AN APPLICATION OF INTUITIONISTIC FUZZY SETS IN MEDICAL DIAGNOSIS. FUZZY SETS AND SYSTEMS 117 (2001) S. 209-213

- [66] DE BARROS, L. N.; LEMOS, M.; BERNAL, V.; WAINER, J.: MODEL BASED DIAGNOSIS FOR NETWORK COMMUNICATION FAULTS. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR DISTRIBUTED INFORMATION NETWORKING (AIDIN'99), ORLANDO, USA, 1999, S. 57-62
- [67] DE KLEER J.; KURIEN, J.: FUNDAMENTALS OF MODEL-BASED DIAGNOSIS. PROCEEDINGS OF THE FOURTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON PRINCIPLES OF DIAGNOSIS, DX'03, WASHINGTON D.C., 2003, S. 1 - 12. AND IN PROCEEDINGS OF THE 5TH IFAC SYMPOSIUM ON FAULT DETECTION, SUPERVISION AND SAFETY OF TECHNICAL PROCESSES SAFEPROCESS 2003. WASHINGTON, D.C., U.S.A.(2003), S. 25 – 36
- [68] DE KLEER, J.; WILLIAMS, B. C.: DIAGNOSING MULTIPLE FAULTS. ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 32 (1987), NR. 1, S. 97-130
- [69] DERERE, L.: CASE-BASED REASONING: DIAGNOSIS OF FAULTS IN COMPLEX SYSTEMS THROUGH REUSE OF EXPERIENCE. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL TEST CONFERENCE, ATLANTIC CITY, USA (2000), S. 27-34
- [70] DEVANY, M.; CHEETHAM, B.: CASE-BASED REASONING FOR GAS TURBINE DIAGNOSTICS. PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL FLAIRS CONFERENCE (FLAIRS-05), AMERICAN ASSOCIATION FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE (2005), S. 1-5
- [71] DIETZ, G., LIPPMANN, R.: VERPACKUNGSTECHNIK, DR. ALFRED HÜTHIG VERLAG HEIDELBERG, 1985
- [72] DIN EN 415: SICHERHEIT VON VERPACKUNGSMASCHINEN, TEIL 1: TERMINOLOGIE UND KLASSIFIKATION VON BEZEICHNUNGEN FÜR VERPACKUNGSMASCHINEN UND ZUGEHÖRIGE AUSRÜSTUNGEN. BERLIN: BEUTH VERLAG 2000
- [73] DIN 6075 – 1: PACKMITTEL – FLASCHEN, TEIL 1: VICHYFORM 1. BEHR: BERLIN, 1997
- [74] DIN 6075 – 1: PACKMITTEL – FLASCHEN, TEIL 2: VICHYFORM 2. BEHR: BERLIN, 1993
- [75] DIN 6094 – 1: PACKMITTEL – MUNDSTÜCKE, KRONENKORKENMUNDSTÜCKE. BEHR: BERLIN, 1982
- [76] DIN 6094 – 12: PACKMITTEL – MUNDSTÜCKE FÜR FLASCHEN, TEIL 12: SCHRAUBMUNDSTÜCKE 7,5 R FÜR FLASCHEN MIT INNENDRUCK. BEHR: BERLIN, 1995
- [77] DIN 6197: FLASCHEN – DOSENFORM, BEUTH: BERLIN, 1978
- [78] DIN 6198: FLASCHEN – EUROFORM, BEUTH, BERLIN, 1978
- [79] DIN 6198: FLASCHEN – EUROFORM 2, BEUTH: BERLIN, 1988
- [80] DIN 6199: FLASCHEN – STEINIEFORM, BEUTH: BERLIN, 1977
- [81] DIN 8743: VERPACKUNGSMASCHINEN UND VERPACKUNGSANLAGEN – ZEITBEZOGENE BEGRIFFE, KENNGRÖßEN UND BERECHNUNGSGRUNDLAGEN. BERLIN: BEUTH, 2004
- [82] DIN 8782: GETRÄNKE-ABFÜLLTECHNIK – BEGRIFFE FÜR ABFÜLLANLAGEN UND EINZELNE AGGREGATE. BERLIN: BEUTH, 1984
- [83] DIN 8783: GETRÄNKE ABFÜLLTECHNIK – UNTERSUCHUNGEN AN ABFÜLLTECHNISCHEN ANLAGEN. BERLIN: BEUTH, 1986
- [84] DIN 40041: ZUVERLÄSSIGKEIT - BEGRIFFE. BERLIN: BEUTH, 1990
- [85] DIN 55405: VERPACKUNG – TERMINOLOGIE – BEGRIFFE. BERLIN: BEUTH, 2006
- [86] DOLGUI, A., EREMEEV, A., KOLOKOLOV, A.; SIGAEV, V.: A GENETIC ALGORITHM FOR THE ALLOCATION OF BUFFER STORAGE CAPACITIES IN A PRODUCTION LINE WITH UNRELIABLE MACHINES. JOURNAL OF MATHEMATICAL MODELLING AND ALGORITHMS 1 (2002), NR. 2, S. 89–104
- [87] DRECHSEL, D.; VETTER, F.: WÄGE-, ABFÜLL- UND VERPACKUNGSPROZESSE. MÜNCHEN: OLDENBOURG, 2001
- [88] DRESSLER, O.; PUPPE, F.: KNOWLEDGE BASED DIAGNOSIS – SURVEY AND FUTURE DIRECTIONS. IN: PUPPE, F. (HRSG.): XPS-99: KNOWLEDGE BASED SYSTEMS, 5TH BIENNIAL GERMAN CONFERENCE ON KNOWLEDGE BASED SYSTEMS, WÜRZBURG, SPRINGER: HEIDELBERG, 1999
- [89] DRESSLER, O.; STRUSS, P.: MODEL-BASED DIAGNOSIS WITH THE DEFAULT-BASED DIAGNOSTIC ENGINE: EFFECTIVE CONTROL STRATEGIES THAT WORK IN PRACTISE. 11TH EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, ECAI-94 (1994), S. 677-681

- [90] DRESSLER, O.; STRUSS, P.: THE CONSISTENCY-BASED APPROACH TO AUTOMATED DIAGNOSIS OF DEVICES. IN: BREWKA, G. (HRSG.), PRINCIPLES OF KNOWLEDGE REPRESENTATION, CSLI PUBLICATIONS, STANFORD, 1996, S. 267-311
- [91] EBIZUKA, K.: ANLAGEN-DIAGNOSEAPPARAT. SCHUTZRECHT EP 0 368 265 B1, 1997
- [92] EFFELSBERG W.; FLEISCHMANN, A.: DAS ISO-REFERENZMODELL FÜR OFFENE SYSTEME UND SEINE SIEBEN SCHICHTEN. INFORMATIK-SPEKTRUM 10 (1986), S. 280-299
- [93] EL FATTAH, Y.; DECHTER, R.: DIAGNOSING TREE-DECOMPOSABLE CIRCUITS. PROCEEDINGS OF IJCAI (1995), S. 1742-1748
- [94] ENSMA (HRSG.): PLIBEDITOR MANUAL, QUELLE: [HTTP://WWW.PLIB.ENSMA.FR/PLIB/UPLOAD/PLIB-EDITOR-MANUAL.PDF](http://www.plib.ensma.fr/plib/upload/plib-editor-manual.pdf), SEPTEMBER 2007
- [95] ESPINOSA, J.; VANDEWALLE, J.; WERTZ, V.: FUZZY LOGIC, IDENTIFICATION AND PREDICTIVE CONTROL. LONDON: SPRINGER, 2005
- [96] ETTENHOFER, A.; THOREN, F.: ZUKUNFTSWEISENDE STEUERUNGSARCHITEKTUR FÜR VERPACKUNGSMASCHINEN. IN: TU DRESDEN, FRAUNHOFER IVV (HRSG.): TAGUNGSBAND FACHTAGUNG VVD 2003 – VERARBEITUNGSMASCHINEN UND VERPACKUNGSTECHNIK – INNOVATIV UND EFFIZIENT. DRESDEN, 2003
- [97] EVERS, H.: ANFORDERUNGEN UND AUSLEGUNG VON KÜNFTIGEN ABFÜLLANLAGEN. VLB BERLIN, UNTERLAGEN ZUR 89. BRAU- UND MASCHINENTECHNISCHEN ARBEITSTAGUNG DER VLB, 2002
- [98] FENTON, W.; MC GINNITY, T. M.; MAGUIRE, L. P.: FAULT DIAGNOSIS OF ELECTRONIC SYSTEMS USING INTELLIGENT TECHNIQUES: A REVIEW. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS – PART C, APPLICATIONS AND REVIEWS, 31 (2001), NR. 3, S. 269-281
- [99] FISHER, M.: TEMPORAL REPRESENTATION AND REASONING, AMSTERDAM: ELSEVIER, 2007
- [100] FOTZIK, B.: BOTTLING AND CANNING LINES FOR THE BEVERAGE INDUSTRY. AUGSBURG: MODERNE INDUSTRIE, 2000
- [101] FONG, A. C. M.; HUI, S. C.: AN INTELLIGENT ONLINE MACHINE FAULT DIAGNOSIS SYSTEM. IN: COMPUTING & CONTROL ENGINEERING JOURNAL, 12 (2001) NR. 5, S. 217-223
- [102] FONTAINE, J.: THE PLUG AND PLAY TECHNOLOGY. TEKNOR INDUSTRIAL COMPUTERS INC., 1996
- [103] FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA) 21 CFR PART 11: ELECTRONIC RECORD, ELECTRONIC SIGNATURES; FINAL RULE. 1997
- [104] FRADEN, J.: HANDBOOK OF MODERN SENSORS, 1. AUFLAGE, NEW YORK: SPRINGER VERLAG, 2004
- [105] FRIEDRICH, G.; STUMPTNER, M.; WOTAWA, F.: MODEL-BASED DIAGNOSIS OF HARDWARE DESIGNS. ARTIFICIAL INTELLIGENCE 111 (1999), S. 3-39
- [106] FRÖHLICH, P.: DRUM-II - EFFICIENT MODEL-BASED DIAGNOSIS OF TECHNICAL SYSTEMS. DISSERTATION, UNIVERSITÄT HANNOVER, 1998
- [107] FRÖHLICH, P.; NEJDL, W.: A STATIC MODEL-BASED ENGINE FOR MODEL-BASED REASONING. PROCEEDINGS OF THE IJCAI-97, NAGOYA, JAPAN (1997), S. 446-471
- [108] FUNK, P.; JACKSON, M.: EXPERIENCE BASED DIAGNOSTIC AND CONDITION BASED MAINTENANCE WITHIN PRODUCTION SYSTEMS. PROCEEDINGS OF COMADEM 2005, THE 18TH INTERNATIONAL CONGRESS AND EXHIBITION ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC ENGINEERING MANAGEMENT (2005)
- [109] FÜSSMANN, R.: ANLAGENTECHNIK – SIMULATION. FIRMENSCHRIFT, KHS- MASCHINEN UND ANLAGENBAU AG, [WWW.KHS-AG.COM](http://www.khs-ag.com), 2005
- [110] GALLAGHER, M. R.: MULTI-LAYER PERCEPTRON ERROR SURFACES: VISUALIZATION, STRUCTURE AND MODELLING. DEPT. COMPUTER SCIENCE AND ELECTRICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF QUEENSLAND, 2000
- [111] GHAHRAMANI, Z.: LEARNING DYNAMIC BAYESIAN NETWORKS. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER, 1998
- [112] GILES, A. G.: HANDBOOK OF BEVERAGE PACKAGING. SHEFFIELD: CRC PRESS, 1999
- [113] GOLOBARDES, E. ET AL.: COMPUTER AIDED DIAGNOSIS WITH CASE-BASED REASONING AND GENETIC ALGORITHMS. KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS 15 (2002), S. 45-52

- [114] GOOD AUTOMATED MANUFACTURING PRACTICE FORUM (GAMP-FORUM): SUPPLIER GUIDE FOR VALIDATION OF AUTOMATED SYSTEMS IN PHARMACEUTICAL MANUFACTURE. VERSION 2.0, LE HAGUE, 1996
- [115] GUCKENBIEHL, T.; MÜNKER, B.: ÜBERWACHUNG UND DIAGNOSE IN FÄRBEREIANLAGEN. IN : HOTZ, L.; GUCKENBIEHL, T., STRUSS, P.: INTELLIGENTE DIAGNOSE IN DER INDUSTRIELLEN ANWENDUNG. SHAKER VERLAG, AACHEN, 2000
- [116] GÜNTER, A.; KUHN, C.: KNOWLEDGE-BASED CONFIGURATION – SURVEY AND FUTURE DIRECTIONS. IN: PUPPE, F. (HRSG.): XPS-99: KNOWLEDGE BASED SYSTEMS, 5TH BIENNIAL GERMAN CONFERENCE ON KNOWLEDGE BASED SYSTEMS, WÜRZBURG, SPRINGER: HEIDELBERG, 1999
- [117] HAAS, U.: PHYSIK FÜR PHARMAZEUTEN UND MEDIZINER, 6. AUFLAGE, STUTTGART: WISSENSCHAFTLICHE VERLAGSGESELLSCHAFT MBH, 2002
- [118] HAERTE, F. L.: EFFICIENCY ANALYSIS OF PACKAGING LINES, UNIVERSITY OF TECHNOLOGY DELFT, DEPARTMENT OF MATHEMATICS AND COMPUTER SCIENCE, STATISTICS, STOCHASTICS AND OPERATIONS RESEARCH UNIT, M.SC.-THESIS, 1997
- [119] HAIDER, M.: SCHWACHSTELLENANALYSE AN PET-LINIEN. GETRÄNKEINDUSTRIE (2006), NR. 9, S. 22-24
- [120] HAKANSSON, A.; HARTUNG, R. L.: REENGINEERING FOR KNOWLEDGE BASED SYSTEMS. IN: GABRYS, B.; HOWLETT, R. J.; JAIN, L. C. (HRSG.): KNOWLEDGE-BASED INTELLIGENT INFORMATION AND ENGINEERING SYSTEMS (KES 2006), PART I, SPRINGER: BERLIN, HEIDELBERG, 2006, S. 342-251
- [121] HALL, W. ET AL.: THE APPLICATION OF LARGE-SCALE HYPERMEDIA INFORMATION SYSTEMS IN THE MANUFACTURING INDUSTRY. ECS RESEARCH JOURNAL ONLINE, 1996, QUELLE: [HTTP://WWW.ECS.SOTON.AC.UK/PUBLICATIONS/RJ/1995-1996/PDF/MM/WH.PDF](http://www.ecs.soton.ac.uk/publications/rj/1995-1996/pdf/mm/wh.pdf)
- [122] HAN, M-S.; PARK, D-J.: PERFORMANCE ANALYSIS AND OPTIMISATION OF CYCLIC PRODUCTION LINES. IEE TRANSACTIONS 34 (2002), NR 4, S 411-422
- [123] HARTMANN, E.: TPM EFFIZIENTE INSTANDHALTUNG UND MASCHINENMANAGEMENT; STILLSTANDSZEITEN VERRINGERN, MASCHINENLEISTUNG STEIGERN, BETRIEBSZEITEN ERHÖHEN. LANDSBERG: MODERNE INDUSTRIE, 2000
- [124] HAUG, A.; HAUG, F.: ANGEWANDTE ELEKTRISCHE MESSTECHNIK. BRAUNSCHWEIG: VIEWEG, 1991
- [125] HEAP, N.: OSI-REFERENZMODELL OHNE GEHEIMNIS. HANNOVER: HEISE, 1994
- [126] HEIDENREICH, E. ET AL.: VERARBEITUNGSTECHNIK. IN: GRUHN, G.; U.A. (HRSG.): VERFAHRENSTECHNIK, 1. AUFLAGE, VEB DEUTSCHER VERLAG FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE, LEIPZIG, 1978
- [127] HELBIG, H.: KÜNSTLICHE INTELLIGENZ UND AUTOMATISCHE WISSENSVERARBEITUNG. BERLIN: VERLAG TECHNIK, 1991
- [128] HELLER, FRANK: WISSENSBASIERTES ONLINE-STÖRUNGSMANAGEMENT FLEXIBLER, HOCH AUTOMATISIERTER MONTAGESYSTEME. DISSERTATION, UNIVERSITÄT PADERBORN, 2003
- [129] HELLER, U.; STRUSS, P.: CONSISTENCY-BASED PROBLEM SOLVING FOR ENVIRONMENTAL DECISION SUPPORT. COMPUTER-AIDED CIVIL AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING 17 (2002), S. 79-92
- [130] HELLER, U.: PROCESS-ORIENTED CONSISTENCA-BASED DIAGNOSIS – THEORY, IMPLEMENTATION AND APPLICATIONS. DISSERTATION TU MÜNCHEN, 2001
- [131] HELLER, U.; STRUSS, P.: G⁺DE – THE GENERALIZED DIAGNOSIS ENGINE. PROCEEDINGS OF THE 12TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON PRINCIPLES OF DIAGNOSIS (DX01), 2001
- [132] HENSHALL, J.; SHAW, S.: OSI EXPLAINED, ELLIS HORWOOG, 1990
- [133] HEUFT SYSTEMTECHNIK GMBH (HRSG.): HEUFT SYNCHRON TRANSPORTEURREGELUNG. QUELLE: [HTTP://WWW.HEUFT.COM/HS/UPLOADED_FILES/MEDIA/BROCHURES/DE_SYNCHRON.PDF](http://www.heuft.com/hs/uploaded_files/media/brochures/de_synchro.pdf), SEPTEMBER 2007
- [134] HILL, E. F.: JESS IN ACTION: JAVA RULE-BASED SYSTEMS. GREENWICH (USA): MANNING PUBLICATIONS, 2003
- [135] HOCHFELLNER, G.: KURZSTATEMENT PROLEIT ZUM THEMA: BETRIEBSDATENERFASSUNG - BALD EINE STANDARDANFORDERUNG DER NAHRUNGSMITTELHERSTELLER. UNTERLAGEN ZUR VDMA-

- FACHVERANSTALTUNG, INFORMATIONSVERANSTALTUNG UND ERFAHRUNGSUSTAUSCH BDE,
FRANKFURT A. M., 2006
- [136] HOLLENDER, M.: ELEKTRONISCHE HANDBÜCHER ZUR UNTERSTÜTZUNG DER WISSENSBASIERTEN FEHLERDIAGNOSE. VDI FORTSCHRITT-BERICHT REIHE 10: INFORMATIK/KOMMUNIKATIONSTECHNIK NR. 368, 2002
- [137] HOLT, A. ET AL.: MEDICAL APPLICATIONS IN CASE-BASED REASONING. THE KNOWLEDGE ENGINEERING REVIEW, 20 (2005), S. 289-292
- [138] HOPE, L. R.; NICHOLSON, A. E.; KORB, K. B.: KNOWLEDGE ENGINEERING TOOLS FOR PROBABILITY ELICITATION. TECHNICAL REPORT, SCHOOL OF COMPUTER SCIENCE AND SOFTWARE ENGINEERING, MONASH UNIVERSITY, 2002
- [139] HUNG, D. H.: TUMBERDIAG: AN EXPERT SYSTEM FOR PULMONARY TUBERCULOSIS DIAGNOSIS. INTERNATIONAL JOURNAL OF UNCERTAINTY, FUZZINESS AND KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS, 7 (1999), NR. 4, S. 371-381
- [140] HUNT, J.: MODEL-BASED SOFTWARE DIAGNOSIS. APPLIED ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 12 (1998), S. 289-308
- [141] HÜTTNER, M.: GRUNDZÜGE DER MARKTFORSCHUNG – 5. ÜBERARBEITETE UND ERWEITERTE AUFLAGE; MÜNCHEN: OLDENBURG, 1997
- [142] IEE 754*ANSI 754: BINÄRE GLEITKOMMAARITHMETIK, IEEE COMPUTER SOCIETY, 1991
- [143] ISO FDIS 13584-1 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION -PARTS LIBRARY PART 1: OVERVIEW AND FUNDAMENTAL PRINCIPLES ISO TC184/SC4/WG2 N338, DECEMBER 1997
- [144] ISO CD 13584-10 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION -PARTS LIBRARY PART 10: CONCEPTUAL MODEL OF A LIBRARY. ISO TC184/SC4/WG2 N224, FEBRUARY 1995
- [145] ISO FDIS 13584-101 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION - PARTS LIBRARY PART 101: VIEW EXCHANGE PROTOKOL: GEOMETRIC VIEW EXCHANGE BY PARAMETRIC PROGRAMM. ISO TC184/SC4/N334, JULY 1998
- [146] ISO WD 13584-102 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION - PARTS LIBRARY PART 102: VIEW EXCHANGE PROTOKOL: VIEW EXCHANGE BY ISO 10303 CONFORMING SPECIFICATION TC184/SC4/WG2 N395, AUGUST 1998
- [147] ISO 13584-20 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION - PARTS LIBRARY PART 20: LOGICAL MODEL OF EXPRESSIONS. GENF: INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION, 1998
- [148] ISO CD2 13584-24 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION - PARTS LIBRARY PART 24: LOGICAL REAAOURCE: LOGICAL MODEL OF SUPPLIER LIBRARY. ISO TC184/SC4/WG2 N361, FEBRUARY 1998
- [149] ISO DIS 13584-26 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION - PARTS LIBRARY PART 26: LOGICAL RESOURCE: SUPPLIER IDENTIFICATION. ISO TC184/SC4/WG2 N335, JULY 1997
- [150] ISO FDIS 13584-31 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION - PARTS LIBRARY PART 31: IMPLEMENTATION RESOURCE: GEOMETRIC PROGRAMMING INTERFACE. ISO TC184/SC4/WG2 N333, JULY 1997
- [151] ISO 13584-42 INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS AND INTEGRATION - PARTS LIBRARY PART 42: DESCRIPTION METHODOLOGY: METHODOLOGY FOR STRUCTURING PART FAMILIES. GENF: INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION, 1998
- [152] JONUSCHEIT, H.; STRAMA, O.: VERFAHREN ZUR FEHLERDIAGNOSE UND ZUR QUALITÄTBEWERTUNG (RATING) VON ROTIERENDEN MASCHINEN AM SERIENPRÜFSTAND. SCHUTZRECHT DE 198 55 745 A1, 2000
- [153] JOO, S. ET AL.: COMPUTER-AIDED DIAGNOSIS OF SOLID BREAST NODULES: USE OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK BASED ON MULTIPLE SONOGRAPHIC FEATURES. IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING, 23 (2004), NR. 10, S. 1292-1300
- [154] KANEHIDE, W.: PLANT ABNORMALITY DIAGNOSTIC RULE GENERATING SYSTEM. SCHUTZRECHT JP 03238528 A, 1991

- [155] KANDULA, S.; KATABI, D.; VASSEUR, J. P.: SHRINK: A TOOL FOR FAILURE DIAGNOSIS IN IP NETWORKS. PROCEEDINGS OF THE SIGCOMM'05 WORKSHOPS, PHILADELPHIA, 2005, S. 173-178
- [156] KAPAIDA, R.; STANLEY, G.; WALKER, M.: REAL WORLD MODEL-BASED FAULT MANAGEMENT. PROCEEDINGS OF THE DX-07, NASHVILLE, USA, 2007, S. 306-313
- [157] KATHER, A.; VOIGT, T.: VERTIKALE INTEGRATION VON GETRÄNKEABFÜLLANLAGEN AUF BASIS STANDARDISIERTER SCHNITTSTELLEN. PPS MANAGEMENT, 13 (2008), NR. 1, S. 40-43
- [158] KATHER, A., VOIGT, T.: BDE KOPPLUNG STANDARDISIERT. COMPUTER&AUTOMATION (2007) NR. 8, S. 90-94
- [159] KATHER, A.: DARSTELLUNG VON BETRIEBSDATEN KOMPLEXER PRODUKTE IN PRODUKTONTOLOGIEN. MASTERARBEIT IM FACH COMPUTER SCIENCE AN DER FERNUNIVERSITÄT HAGEN, 2007
- [160] KATHER, A.; VOIGT, T.: BETRIEBSDATENERFASSUNG BEI ABFÜLLANLAGEN ALS WERTVOLLER BAUSTEIN DER UNTERNEHMENS-IT-STRUKTUR. BRAUMANAGER (2005), NR. 6, S. 26-27
- [161] KATHER, A.; VOIGT, T.; LANGOWSKI, H.-C: PLUG AND ACQUIRE – THE NEW WEIHENSTEPHAN STANDARDS FOR PROCESS DATA ACQUISITION IN BOTTLING PLANTS. PROCEEDINGS OF THE 30TH EBC CONGRESS, PRAG. NÜRNBERG: HANS CARL, 2005, AUF CD
- [162] KATHER, A.; VOIGT T.: BETRIEBSDATENERFASSUNG AN ABFÜLLANLAGEN – WEIHENSTEPHANER STANDARDS KONFORME VERSUCHSANLAGE IN BETRIEB GENOMMEN. GETRÄNKEINDUSTRIE 59 (2005), NR. 11, S. 32-35
- [163] KATHER, A.; VOIGT, T.: WEIHENSTEPHANER STANDARDS FÜR DIE BETRIEBSDATENERFASSUNG BEI GETRÄNKEABFÜLLANLAGEN - TEIL 1: PHYSIKALISCHE SCHNITTSTELLENSPEZIFIKATION, VERSION 2005.03; TEIL 2: INHALTLICHE SCHNITTSTELLENSPEZIFIKATION, VERSION 2005.03; TEIL 3: DATENAUSWERTUNG UND BERICHTSWESEN, VERSION 2005.01; TEIL 4: ÜBERPRÜFUNG UND SICHERER BETRIEB, VERSION 2005.01, TU MÜNCHEN, LEHRSTUHL FÜR LEBENSMITTELVERPACKUNGSTECHNIK, 2004-2006
- [164] KECK, R.: K WIE KOSTENSENKUNG. BRAUINDUSTRIE 90 (2005), NR. 6, S. 10-13
- [165] KHANNA, G. ET AL.: AUTOMATED RULE-BASED DIAGNOSIS THROUGH A DISTRIBUTED MONITOR SYSTEM. IEEE TRANSACTIONS ON DEPENDABLE AND SECURE COMPUTING, 4 (2007), NR. 3, S. 1-14
- [166] KHOO, L. P.; ANG, C. L., ZHANG, J.: A FUZZY-BASED GENETIC APPROACH TO THE DIAGNOSIS OF MANUFACTURING SYSTEMS. ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE 13 (2000), S. 303-310
- [167] KIRSCH, H.; KROSCHER, K.: APPLYING BAYESIAN NETWORKS TO FAULT DIAGNOSIS. PROCEEDINGS OF THE IEEE CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS (1994), S. 895-900
- [168] KIYOSHI, Y.: AUTOMATIC DIAGNOSING SYSTEM FOR PROCESS ABNORMALITY OF PRODUCTION LINE. SCHUTZRECHT JP 10206200 A, 1998
- [169] KLEIN, R.: ALGORITHMISCHE GEOMETRIE – GRUNDLAGEN, METHODEN ANWENDUNGEN. 2. AUFLAGE, NEW YORK BERLIN HEIDELBERG: SPRINGER, 2005
- [170] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN, GENERALDIREKTION FÜR BINNENMARKT UND GEWERBLICHE WIRTSCHAFT: EG-LEITFADEN EINER GUTEN HERSTELLUNGSPRAXIS FÜR ARZNEIMITTEL. IN: AUTERHOFF, G. (HRSG.): EG-LEITFADEN EINER GUTEN HERSTELLUNGSPRAXIS FÜR ARZNEIMITTEL, EDITIO CANTOR VERLAG AULENDORF, 2. AUFLAGE, 1993
- [171] KOJI, O.: FAULT PREDICTING METHOD FOR INDUSTRIAL ROBOT. SCHUTZRECHT JP 10039908 A, 1998
- [172] KOJI, O.: INDUSTRIAL ROBOT AND ITS FAULT DETECTING METHOD, AND RECORDING MEDIUM WHERE FAULT DETECTING PROGRAM FOR INDUSTRIAL ROBOT IS RECORDED. SCHUTZRECHT JP 11202914 A, 1999
- [173] KONONENKO, I.: MACHINE LEARNING FOR MEDICAL DIAGNOSIS: HISTORY, STATE OF THE ART AND PERSPECTIVE. ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MEDICINE 23 (2001), S. 89-109
- [174] KOUIKOGLOU, S.: SENSITIVITY ANALYSIS AND DECOMPOSITION OF UNRELIABLE PRODUCTION LINES WITH BLOCKING, ANNALS OF OPERATIONS RESEARCH 93 (2000), NR. 1-4, S. 245-264
- [175] KRONES AG (HRSG.): KRONES LINIEN-DOKUMENTATIONS-SYSTEM. FIRMENSCHRIFT, 2008, QUELLE: [HTTP://BROCHURES.KRONES.COM/KRONES_MEDIASUITE_P/DE](http://brochures.krones.com/krones_mediasuite_p/de)

- [176] KRONES AG (HRSG.): KRONES LINE TUNING – ANALYSE UND OPTIMIERUNG VON ABFÜLL- UND VERPACKUNGSLINIEN. FIRMENSCHRIFT, 2008, QUELLE:
[HTTP://BROCHURES.KRONES.COM/KRONES_MEDIASUITE_P/DE](http://brochures.krones.com/krones_mediasuite_p/de)
- [177] KRONES AG (HRSG.): TRANSPORTTECHNIK - KRONES ACCUCASE – ACCUFLOW – ACCUTABLE – ACCUTOWER – ACCULINK - PUFFERSYSTEME. FIRMENSCHRIFT, 2005, QUELLE:
[HTTP://WWW.KRONES.DE/DOWNLOADS/PUFFERSYSTEME_D.PDF](http://www.krones.de/downloads/puffersysteme_d.pdf)
- [178] KROSSE, J.: GEN3 – DIE AUTOMATISIERUNG DER VERPACKUNGSMASCHINEN DER ZUKUNFT. IN: TU DRESDEN, FRAUNHOFER IVV (HRSG.): TAGUNGSBAND FACHTAGUNG VVD 2003 – VERARBEITUNGSMASCHINEN UND VERPACKUNGSTECHNIK – INNOVATIV UND EFFIZIENT. DRESDEN, 2003, S. 609-618
- [179] KRUG, W.: MODELLIERUNG, SIMULATION UND OPTIMIERUNG FÜR PROZESSE DER FERTIGUNG, ORGANISATION UND LOGISTIK, GHENT U. A., SCS-EUROPE, 2001
- [180] KUMPF, A.: ANFORDERUNGSGERECHTE MODELLIERUNG VON MATERIALFLUSSSYSTEMEN ZUR PLANUNGSBEGLEITENDEN SIMULATION. TU MÜNCHEN, LEHRSTUHL FÜR FÖRDERTECHNIK MATERIALFLUSS LOGISTIK, DISSERTATION, 2001
- [181] LANGENDIJK, J. P. ET AL.: TRACING THE ORIGIN OF ADENOCARCINOMAS WITH UNKNOWN PRIMARY USING IMMUNOHISTOCHEMISTRY: DIFFERENTIAL DIAGNOSIS BETWEEN COLONIC AND OVARIAN CARCINOMAS AS PRIMARY SITES. HUMAN PATHOLOGY, 29 (1998), NR. 5, S. 491-497
- [182] LANGER, M.: AUF DIE AUSNUTZUNG KOMMT ES AN – EFFIZIENZSTEIGERUNG IM FLASCHENKELLER FÜR DEN MITTELSTAND. BRAUINDUSTRIE 92 (2007), NR. 5, S. 18-20
- [183] LEE, H.-J. ET AL.: A FUZZY EXPERT SYSTEM FOR THE INTEGRATED FAULT DIAGNOSIS. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 15 (2000), NR. 2, S. 833-838
- [184] LI, B. ET AL.: NEURAL-NETWORK-BASED MOTOR ROLLING BEARING FAULT DIAGNOSIS. IN: IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 47 (2000), NR. 5, S. 1060-1069
- [185] LIBEROPOULOS, G.; TSAROUHAS, P.: RELIABILITY ANALYSIS OF AN AUTOMATED PIZZA PRODUCTION LINE. JOURNAL OF FOOD ENGINEERING 69 (2005), S. 79-96
- [186] LIN, K.-C.; LAI, C.-S.: FAULT RECOGNITION SYSTEM OF ELECTRICAL COMPONENTS IN SCRUBBER USING INFRARED IMAGES. IN: PALADE, V.; HOWLETT, R. J.; JAIN, L. C. (HRSG.): KES 2003, BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER, 2003, S. 1303-1310
- [187] LINDER, R.; KULBE, K.; DJONLAGIC, H.: 20 JAHRE NEURONALE NETZWERKE – INWIEWEIT PROFITIERT DIE MEDIZIN? FOCUS MUL, 23 (2006), NR. 3, S. 161-165
- [188] LIOLA, S.-H.: EXPERT SYSTEM METHODOLOGIES AND APPLICATIONS – A DECADE REVIEW FROM 1995 TO 2004. EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS 28 (2005), S. 93-103
- [189] LISBOA, P. J. G.: A REVIEW OF EVIDENCE OF HEALTH BENEFIT FROM ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN MEDICAL INTERVENTION. NEURAL NETWORKS 15 (2002), S. 11-39
- [190] LU, P.-J.: AN EVALUATION OF ENGINE FAULTS DIAGNOSTIC USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. JOURNAL OF ENGINEERING FOR GAS TURBINES AND POWER, 123 (2001), S. 340-346
- [191] LU, Y.; CHEN, T. Q.; HAMILTON, B.: A FUZZY SYSTEM FOR AUTOMOTIVE FAULT DIAGNOSIS: FAST RULE GENERATION AND SELF-TUNING. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, 40 (2000), NR. 2, S. 651-660
- [192] LUCAS, P. J. F.: BAYESIAN MODEL-BASED DIAGNOSIS. INTERNATIONAL JOURNAL OF APPROXIMATE REASONING 27 (2001), S. 99-119
- [193] LUCAS, P. J. F.: MODEL-BASED DIAGNOSIS IN MEDICINE. ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MEDICINE, 10 (1997), S. 201-208
- [194] MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W.: A LOGICAL CALCULUS OF THE IDEAS IMMANENT IN NERVOUS ACTIVITY FORMS. BULLETIN OF MATHEMATICAL BIOPHYSICS, 9 (1943), S. 127-147
- [195] MESA INTERNATIONAL (HRSG.): WHITE PAPER NO. 6: MES EXPLAINED: A HIGH LEVEL VISION. 1997
- [196] MEXIS, N. D.: HANDBUCH SCHWACHSTELLEN-ANALYSE ERFOLGREICHES INSTRUMENT ZUR KOSTENSENKUNG U. UNTERNEHMENS SICHERUNG, KÖLN: TÜV RHEINLAND, 1990

- [197] MEXIS, N. D.: HANDBUCH SCHWACHSTELLENANALYSE UND –BESEITIGUNG, KÖLN: TÜV RHEINLAND, 1994
- [198] MICHELS, K. ET AL.: FUZZY CONTROL – FUNDAMENTALS, STABILITY AND DESIGN OF FUZZY CONTROLLERS. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER, 2006
- [199] MÖLLER, H.; HÜBNER, L.: EXPERTENSYSTEM ZUR UNTERSTÜTZUNG DER FEHLERDIAGNOSE BEI MASCHINEN. HORIZONTE 27 (2005), S. 42-45
- [200] NAKAJIMA S.: INTRODUCTION TO TPM, CAMBRIDGE, PRODUCTIVITY PRESS, 1988
- [201] NAOTAKA, T.; MORIKAZU, T.; TAKAMICHI, O.: PLANT FAULT DIAGNOSING DEVICE. SCHUTZRECHT JP 58134313 A, 1983
- [202] NAOTAKA, T.; MORIKAZU, T.: PLANT DIAGNOSING DEVICE. SCHUTZRECHT JP 59201111 A, 1984
- [203] NEIL, M.; FENTON, N.; NIELSON, L.: BUILDING LARGE-SCALE-BAYESIAN NETWORKS. THE KNOWLEDGE ENGINEERING REVIEW 15 (2000), S. 257-284
- [204] NILSON, M.; SOLLENBORN, M.: ADVANCEMENTS AND TRENDS IN MEDICAL CASE-BASED REASONING: AN OVERVIEW OF SYSTEMS AND SYSTEM DEVELOPMENT. PROCEEDINGS OF THE 17TH INTERNATIONAL FLAIRS CONFERENCE, 2004, S. 1-6
- [205] NIXON, M. ET AL.: VERSCHMELZUNG VON PROZEBLEISTUNGSÜBERWACHUNG UND –STEUERUNG. SCHUTZRECHT DE 102 23 725 A 1, 2003
- [206] NOPHUT, C.; VOIGT, T.: SIMULATION VON GETRÄNKEABFÜLLANLAGEN. DER WEIHENSTEPHANER, 76 (2008), NR. 2, S. 71-74
- [207] NORVILAS; A. ET AL.: INTELLIGENT PROCESS MONITORING BY INTERFACING KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS AND MULTIVARIATE STATISTICAL MONITORING. JOURNAL OF PROCESS CONTROL, 10 (2000), S. 341-350
- [208] O. A.: CLIPS REFERENCE MANUAL – VOLUME I, BASIC PROGRAMMING GUIDE, VERSION 6.24, 2006, QUELLE: [HTTP://WWW.GHG.NET/CLIPS/DOWNLOAD/DOCUMENTATION/BPG.PDF](http://www.ghg.net/clips/download/documentation/bpg.pdf)
- [209] OECD 1-10: OECD SERIES ON PRINCIPLES OF GOOD LABORATORY PRACTICE AND COMPLIANCE MONITORING. (GLP). PARIS, 1992
- [210] OMAC USERS GROUP (HRSG.): ABOUT OMAC: QUELLE: [HTTP://WWW.OMAC.ORG/CONTENT/NAVIGATIONMENU/GENERAL_INFORMATION/PARTNERS_AND_AFFILIATES/OMAC1/GENERAL_INFORMATION1/ABOUT_OMAC/ABOUT_OMAC.HTM](http://www.omac.org/content/navigationmenu/general_information/partners_and_affiliates/omac1/general_information1/about_omac/about_omac.htm), MAI 2007
- [211] OMAC MOTION FOR PACKAGING WORKING GROUP, PACKML SUBTEAM (HRSG.): LINE TYPES DOCUMENT, VERSION 1.2, 2001
- [212] OMAC PACKAGING WORKING GROUP PACKML COMMITTEE (HRSG.): TAG NAMING GUIDELINES, VERSION 2.0, 2003
- [213] OMAC PACKAGING WORKING GROUP, PACKML SUBCOMMITTEE: AUTOMATIC MODE MACHINE STATES DEFINITION. VERSION 2.2, 2002
- [214] ONISKO, A.; LUCAS, P.; DRUZDEL, M. J.: COMPARISON OF RULE-BASED AND BAYESIAN NETWORK APPROACHES IN MEDICAL DIAGNOSTIC SYSTEMS. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER, 2001
- [215] OSMANI, A.; KRIEF, F.: MODEL-BASED DIAGNOSIS FOR FAULT MANAGEMENT IN ATM NETWORKS. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATM ICATM 99 (1999), S. 91-99
- [216] ÖZBAYRAK, M.; BELL, R.: A KNOWLEDGE-BASED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE MANAGEMENT OF PARTS AND TOOLS IN FMS. DECISION SUPPORT SYSTEMS, 35 (2003), S. 487-515
- [217] PAPADOPOULOS H. T.; HEAVEY, C.: QUEUEING THEORY IN MANUFACTURING SYSTEMS ANALYSIS AND DESIGN: A CLASSIFICATION OF MODELS FOR PRODUCTION AND TRANSFER LINES. EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH 92 (1996), NR. 1, S. 1-27
- [218] PAVLOPOULOS, S. A.; STASIS, A. C.; LOUKIS, E. N.: A DECISION TREE – BASED METHOD FOR THE DIFFERENTIAL DIAGNOSIS OF AORTIC STENOSIS FROM MITRAL REGURGITATION USING HEART SOUNDS. BIOMEDICAL ENGINEERING ONLINE, NR. 3 (2004), QUELLE: [HTTP://WWW.BIOMEDICAL-ENGINEERING-ONLINE.COM/CONTENT/3/1/21](http://www.biomedical-engineering-online.com/content/3/1/21)

- [219] PIERRA, G.: INTELLIGENT ELECTRONIC COMPONENT CATALOGUES FOR ENGINEERING AND MANUFACTURING, PROC. OF THE INTERNAT. SYMP. ON GLOBAL ENGINEERING NETWORKING GEN'97, ANTWERPEN, 1997
- [220] PIERRA, G.: CONTEXT-EXPLICATION IN CONCEPTUAL ONTOLOGIES: PLIB ONTOLOGIES AND THEIR USE FOR INDUSTRIAL DATA, JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING SYSTEMS, 2006
- [221] PIETERSMA, J.; GEMUND, A. J. C.: SYMBOLIC FACTORIZATION OF PROPAGATION DELAYS OUT OF DIAGNOSTIC SYSTEM MODELS. PROCEEDINGS OF THE DX-07, NASHVILLE, USA (2007), S. 170-177
- [222] PIETRUSZKA, W. D.: MATLAB UND SIMULINK IN DER INGENIEURSPRAXIS - MODELLBILDUNG, BERECHNUNG UND SIMULATION. 2. AUFLAGE, WIESBADEN: TEUBNER, 2006
- [223] POLAT, K.; SAHAN, S.; GÜNES, S.: A NEW METHOD TO MEDICAL DIAGNOSIS: ARTIFICIAL IMMUNE RECOGNITION SYSTEM (AIRS) WITH FUZZY WEIGHTED PRE-PROCESSING AND APPLICATION TO ECG ARRHYTHMIA. EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS, 31 (2006), Nr. 2, S. 264-269
- [224] POLKE, M.: PROZESSLEITTECHNIK. 2. AUFLAGE. MÜNCHEN, WIEN: OLDENBOURG, 1994
- [225] POOLE, D.: REPRESENTING DIAGNOSIS KNOWLEDGE. ANNALS OF METHMATICS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE (1994) NR. 11, S. 33-50
- [226] PREIST, C.: DEPLOYING A MODEL-BASED DIAGNOSIS SYSTEM IN THE MANUFACTURING TEST ENVIRONMENT. PROCEEDINGS OF THE IEEE COLLOQUIUM ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MANUFACTURING, 2 (1997), S. 1-4
- [227] PRITSCHOW, G.: EINFÜHRUNG IN DIE STEUERUNGSTECHNIK. MÜNCHEN, WIEN: HANSER, 2006
- [228] PROBST, W.: PLANUNG LÄRMARMER TRANSPORTSYSTEME FÜR FLASCHEN UND GLÄSER. FORSCHUNGSBERICHT NR. 313 DER BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ - UND UNFALLFORSCHUNG, DORTMUND, 1982
- [229] PULIDO, B.; GONZÁLES, A. A.: POSSIBLE CONFLICTS: A COMPILATION TECHNIQUE FOR CONSISTENCY-BASED DIAGNOSIS. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS – PART B: CYBERNETICS, 34 (2004) NR. 5, S. 2192-2206
- [230] PUPPE, F.: KNOWLEDGE REUSE AMONG DIAGNOSTIC PROBLEM-SOLVING METHODS IN THE SHELL-KIT D 3. IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF HUMAN-COMPUTER STUDIES 49 (1998), NR. 10, S. 627-649
- [231] PUPPE, F.: EINFÜHRUNG IN EXPERTENSYSTEME. BERLIN: SPRINGER VERLAG, 1991
- [232] PUPPE, F.: PROBLEMLÖSUNGSMETHODEN IN EXPERTENSYSTEMEN. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER-VERLAG, 1990
- [233] QUINLAN, R.: C4.5: PROGRAMS FOR MACHINE LEARNING. SAN FRANCISCO: MORGAN KAUFMANN, 1997
- [234] RÄDLER, T.: MODELLIERUNG UND SIMULATION VON ABFÜLLINIEN. FREISING-WEIHENSTEPHAN: TU MÜNCHEN, LEHRSTUHL FÜR BRAUEREIANLAGEN UND LEBENSMITTEL-VERPACKUNGSTECHNIK, DISSERTATION, 1999
- [235] REINHART, G.; FELDMANN, K.: SIMULATION – SCHLÜSSELTECHNOLOGIE DER ZUNKUNFT? MÜNCHEN: UTZ, 1997
- [236] REITER, R.: A THEORY OF DIAGNOSIS FROM FIRST PRINCIPLES. IN: ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 32 (1987) NR. 1, S. 57-95
- [237] REN, X.; ONG, M.; ALLAN, G.: INTEGRATED FAULT DIAGNOSIS ON THE GRID. PROCEEDINGS OF THE 9TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING COMPLEX COMPUTER SYSTEMS NAVIGATING COMPLEXITY IN THE E-ENGINEERING AGE (2004), S. 59-65
- [238] RILEY, G.: C LANGUAGE INTEGRATED PRODUCTION SYSTEM. IN: KENT, A.; WILLIAMS, J. G. (HRSG.): ENCYCLOPEDIA OF COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY, NR. 37, CRC PRESS, 1997
- [239] ROBERTSON, G. L.: FOOD PACKAGING – PRINCIPLES AND PRACTICE. 2. AUSGABE, CRC PRESS: BOCA RATON
- [240] RODRIGUES, M. A. ET AL.: LEARNING AND DIAGNOSIS IN MANUFACTURING PROCESSES THROUGH AN EXECUTABLE BAYESIAN NETWORK. IN: LONGANANTHARAJ, R. PALM, G. (HRSG.): INTELLIGENT PROBLEM SOLVING, METHODOLOGIES AND APPROACHES, PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL

- CONFERENCE ON INDUSTRIAL AND ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND EXPERT SYSTEMS, NEW ORLEANS, 2000, S. 390-395
- [241] ROHWER, R.; WYNNE-JONES, M.; WYSOTZKI, F.: NEURAL NETWORKS. IN: MICHIE, D.; SPIEGELHALTER, D. J.; TAYLOR, C. C. (HRSG.): MACHINE LEARNING, NEURAL AND STATISTICAL CLASSIFICATION. LONDON: ELLIS HORWOOD, 1994
- [242] ROMESSIS, C.; MATHIOUDAKIS, K.: BAYESIAN NETWORK APPROACH FOR GAS PATH FAULT DIAGNOSIS. JOURNAL OF ENGINEERING FOR GAS TURBINES AND POWER, 128 (2006), S. 64-72
- [243] RÖMISCH, P.: BERECHNUNG ZUVERLÄSSIGKEITSOPTIMALER SYSTEMSTRUKTUREN AM BEISPIEL VON GETRÄNKEABFÜLLANLAGEN. MASCHINENBAUTECHNIK 37 (1988), NR. 2, S. 62-64
- [244] RUDOLFER, S. M., PALIOURAS, G., PEERS, I. S.: A COMPARISON OF LOGISTIC REGRESSION TO DECISION TREE INDUCTION IN THE DIAGNOSIS OF CARPAL TUNNEL SYNDROME. COMPUTERS AND BIOMEDICAL RESEARCH, 32 (1999) S. 391-414
- [245] RUMMELHART, D.; HINTON, G.; WILLIAMS, R.: LEARNING REPRESENTATIONS BY BACK-PROPAGATION ERRORS. NATURE, 323 (1986), S. 533-536
- [246] SACHENBACHER, M.; STRUSS, P., WEBER, R.: ADVANCES IN DESIGN AND IMPLEMENTATION OF OBD FUNCTIONS FOR DIESEL INJECTION BASED ON A QUALITATIVE APPROACH TO DIAGNOSIS. PROCEEDINGS OF THE SAE 2000 WORLD CONGRESS, DETROIT, USA (2000), S. 23-32
- [247] SAMANTA, B.: GEAR FAULT DETECTION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND SUPPORT VECTOR MACHINES WITH GENETIC ALGORITHMS. MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, 18 (2004), NR. 3, S. 625-644
- [248] SAMMUTS, C.; HURST, S.; KEDZIER, D.; MICHIE, D.: LEARNING TO FLY. PROCEEDINGS OF THE NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, ABERDEEN, 1992
- [249] SCHMALBACH-LUBECA (HRSG.): PET CONTAINERS, 1L MINERALBRUNNEN. 1998
- [250] SCHMIDT, B.: SYSTEMANALYSE UND MODELLAUFBAU – GRUNDLAGEN DER SIMULATIONSTECHNIK. HEIDELBERG U. A., SPRINGER-VERLAG, 1985
- [251] SCHÖNEBURG, E.; HANSEN, N.; GAWELCZYK, A.: INDUSTRIELLE ANWENDUNG NEURONALER NETZE. BONN: ADDISON-WESLEY, 1993
- [252] SCHWARTZ ET AL.: MODEL BASED REASONING SYSTEM FOR NETWORK FAULT DIAGNOSIS. SCHUTZRECHT US 5,428,619, 1995
- [253] SEDLACZEK, J.: PROJEKTBEGLEITENDE ANLAGENSIMULATION SPART ZEIT UND KOSTEN. BRAUWELT 140 (2000), NR. 8, S. 311-315
- [254] SEITZ, M.: SPEICHERPROGRAMMIERBARE STEUERUNGEN – VON DEN GRUNDLAGEN DER PROZESSAUTOMATISIERUNG BIS ZUR VERTIKALEN INTEGRATION. LEIPZIG: CARL HANSER VERLAG, 2003
- [255] SELARU, F. M.: ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS DISTINGUISH AMONG SUBTYPES OF NEOPLASTIC COLORECTAL LESIONS. GASTROENTEROLOGY, 122 (2002), S. 606-613
- [256] SETIONO, R.; AZCARRAGA, A.: GENERATING CONCISE SETS OF LINEAR REGRESSION RULES FROM ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. JOURNAL OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS, 11 (2002), S. 189-202
- [257] SEUSS, S.: MES OPTIMIERT HERSTELLUNGSPROZESSE. INTERNATIONALER STANDARD ISA-95 BIETET PLANUNGSSICHERHEIT. A&D KOPMPENDIUM, 2005
- [258] SHIGERU, K.; YUKIO, S.; SADAHARU, S.: METHOD AND DEVICE FOR DIAGNOSING PLANT. SCHUTZRECHT JP 01026912 A, 1989
- [259] SICK AG (HRSG.): LASER-MESSSYSTEM LMS 400 – BETRIEBSANLEITUNG, REUTE, 2005
- [260] SICK AG (HRSG.): LMS SETZT NEUEN MABSTAB. IN: SICK INSIGHT, 2 (2003), QUELLE: [HTTP://WWW.SICK.COM/DE/ABOUT/MAGAZINE/AKTUELLE/DE.HTML](http://www.sick.com/de/about/magazine/aktuelle/de.html), JANUAR 2008
- [261] SKAANING, C.; JENSEN, F. V.; KJAERULFF, U.: PRINTER TROUBLESHOOTING USING BAYESIAN NETWORKS. IN: LONGANANTHARAJ, R. PALM, G. (HRSG.): INTELLIGENT PROBLEM SOLVING, METHODOLOGIES AND APPROACHES, PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL AND ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND EXPERT SYSTEMS, NEW ORLEANS, 2000, S. 367-379

- [262] SPINELLIS, D.; PAPADOPOULOS, C. T.: A SIMULATED ANNEALING APPROACH FOR BUFFER ALLOCATION IN RELIABLE PRODUCTION LINES. ANNALS OF OPERATIONS RESEARCH 93 (2000), S. 373-384
- [263] STEINDER, M.; SETHI, A. S.: END-TO-END SERVICE FAILURE DIAGNOSIS USING BELIEF NETWORKS. PROCEEDINGS OF THE IEEE / IFIP NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, FLORENCE, 2002, S. 375-390
- [264] STRUSS, P.; KATHER, A.; SCHNEIDER, D.; VOIGT, T.: QUALITATIVE MODELING FOR DIAGNOSIS OF MACHINES TRANSPORTING RIGID OBJECTS. 19TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON PRINCIPLES OF DIAGNOSIS (DX08), BLUE MOUNTAINS, AUSTRALIA
- [265] STRUSS, P.; KATHER, A.; SCHNEIDER, D.; VOIGT, T.: QUALITATIVE MODELING FOR DIAGNOSIS OF MACHINES TRANSPORTING RIGID OBJECTS. IN: BRADLEY, L. AND TRAVE-MASSUYES, L. (HRSG.). 22ND INTERNATIONAL WORKSHOP ON QUALITATIVE REASONING QR08, BOULDER, CO, 2008
- [266] STRUSS, P.; KATHER, A.; SCHNEIDER, D.; VOIGT, T.: A COMPOSITIONAL MATHEMATICAL MODEL OF MACHINES TRANSPORTING RIGID OBJECTS. 18TH EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (ECAI-08), PATRAS, GREECE, 2008
- [267] STRUSS, P.: MODEL-BASED PROBLEM SOLVING. IN: VAN HARMELEN, F.; LIFSCHITZ, V.; PORTER, B. (HRSG.): HANDBOOK OF KNOWLEDGE REPRESENTATION. ELSEVIER, 2008
- [268] STRUSS, P.: MODELLBASIERTE SYSTEME UND QUALITATIVE MODELLIERUNG. ERSCHEIENEN IN: GÖRZ, G., ROLLINGER, C., SCHNEEBERGER, J. (HRSG.): HANDBUCH DER KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ, 3. AUFLAGE, OLDENBOURG VERLAG, MÜNCHEN, 2000
- [269] STRUSS, P.; DRESSLER, O.: PHYSICAL NEGATION – INTEGRATING FAULT MODELS INTO THE GENERAL DIAGNOSTIC ENGINE. PROCEEDING OF THE 11TH INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (1989), S. 153-158
- [270] STRUSS, P.; HELLER, U.: PROCESS-ORIENTED MODELING AND DIAGNOSIS – REVISING AND EXTENDING THE THEORY OF DIAGNOSIS FROM FIRST PRINCIPLES. WORKING NOTES OF THE 9TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON PRINCIPLES ON DIAGNOSIS (DX-98), SEA CREST, CAPE COD, USA (1998), S. 110-117
- [271] STRUSS, P.; HELLER, U.: MODEL-BASED SUPPORT FOR WATER TREATMENT. IN: R. MILNE (HRSG.): QUALITATIVE AND MODEL BASED REASONING FOR COMPLEX SYSTEMS AND THEIR CONTROL, WORKSHOP KRR-4 AT THE 16TH INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 1999, S. 84-90
- [272] STRUSS, P.; HELLER, U.: AN APPROACH TO CONSISTENCY-BASED PROCESS-DIAGNOSIS. IN: HOLTZ L.; STRUSS, P.; GUCKENBIEHL, T. (HRSG.): INTELLIGENT DIAGNOSIS IN INDUSTRIAL APPLICATIONS, SHAKER VERLAG, 2001, S. 85-94
- [273] STRUSS, P.; HELLER, U.; MALIK, A.; SACHENBACHER, M.: MODELLBASIERTE WERKZEUGE FÜR DIAGNOSE UND FEHLERANALYSE VON FAHRZEUGSUBSYSTEMEN. IN: HOLTZ L.; STRUSS, P.; GUCKENBIEHL, T. (HRSG.): INTELLIGENT DIAGNOSIS IN INDUSTRIAL APPLICATIONS. AACHEN: SHAKER, 2001, S. 17-40
- [274] STRUSS, P.; PRICE, C.: MOVING FORWARD – MODEL-BASED SYSTEMS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY. AI MAGAZINE 24 (2003) NR. 4 S.17–34
- [275] STRUSS, P.; SACHENBACHER, M.; DUMMERT, F.: DIAGNOSING A DYNAMIC SYSTEM WITH (ALMOST) NO OBSERVATIONS. PROCEEDINGS OF THE 11TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON QUALITATIVE REASONING (1997), S. 193-201
- [276] STUMPTNER, M.; WOTAWA, F.: DIAGNOSING TREE-STRUCTURED SYSTEMS. ARTIFICIAL INTELLIGENCE 127 (2001), S. 1-29
- [277] SU, Q.; ET AL.: A FUZZY DISSOLVED GAS ANALYSIS METHOD FOR THE DIAGNOSIS OF MULTIPLE INCIPIENT FAULTS IN A TRANSFORMER. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 15 (2000), NR. 2, S. 593-598
- [278] SURI, R.; FU, B. R.: ON USING CONTINUOUS FLOW LINES TO MODEL DISCRETE PRODUCTION LINES. JOURNAL OF DISCRETE EVENT DYNAMIC SYSTEMS, 4 (1994), S. 129-169
- [279] TAKAYAMA, Y.: METHOD AND SYSTEM FOR MONITORING INDUSTRIAL MACHINE. SCHUTZRECHT US 6,587812 B1, 2003

- [280] TAN, J. C.; CROSSLEY, P. A.; McLAREN, P.G.: FUZZY EXPERT SYSTEM FOR ONLINE FAULT DIAGNOSIS ON A TRANSMISSION NETWORK. PROCEEDINGS OF THE IEEE PES WINTER MEETING, COLUMBUS, USA (2001), Nr. 2, S. 775–780
- [281] THIÉBAUX, S. ET AL.: SUPPLY RESTORATION IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS – A CASE STUDY IN INTEGRATING MODEL-BASED DIAGNOSIS AND REPAIR PLANNING. IN: HORVITZ, E., & JENSEN, F. (HRSG.): PROCEEDINGS OF THE 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNCERTAINTY IN AI (UAI-96), PORTLAND, OR, USA, 1996, S. 525–532
- [282] TORASSO, P.: CASE-BASED REASONING IN DIAGNOSTIC PROBLEM SOLVING: ALTERNATIVE OR COMPLEMENTARY TO MBR? PROCEEDINGS OF THE 15TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON PRINCIPLES OF DIAGNOSIS, 2004
- [283] TORU, I.; HIROYUKI, F.: OPERATION DIAGNOSING METHOD FOR AUTOMATIC EXAMINATION DEVICE. SCHUTZRECHT JP 2001052172 A, 2001
- [284] TOSHIHARU, S.; TOSHIHIKO, H.: TROUBLE DIAGNOSTIC METHOD FOR PRODUCTION LINE. SCHUTZRECHT JP 03015735 A, 1991
- [285] TOSHIHARU, S.; TOSHIHIKO, H.: METHOD FOR DIAGNOSING FAILURE OF PRODUCTION LINE. SCHUTZRECHT JP 03180905 A, 1991
- [286] TRÄNKLER, H. R.; OBERMEIER, E.: SENSORTECHNIK, HANDBUCH FÜR PRAXIS UND WISSENSCHAFT, SPRINGER 1998
- [287] TRAVE-MASSUYES, L.; MILNE, R.: GAS TURBINE CONDITION MONITORING USING QUALITATIVE MODEL BASED DIAGNOSIS. IEEE EXPERT MAGAZINE, 1997, S. 22-33
- [288] TREIBER, K.: FLASCHENTRANSPORTEURE UND ANLAGENAUSBRINGUNGEN – TEIL 1. BRAUWELT 143 (2003), Nr. 48, S. 1626-1631
- [289] TREIBER, K.: FLASCHENTRANSPORTEURE UND ANLAGENAUSBRINGUNGEN – TEIL 2. BRAUWELT 143(2003), Nr. 49 S. 1665-1670
- [290] TVERSKY, A.; KAHNEMANN, D.: JUDGMENT UNDER UNCERTAINTY: HEURISTICS AND BIASES. SCIENCE, 185 (1974), S. 1124-1131
- [291] UHRIG, M. ET AL.: ERP-SYSTEME FÜR DIE PROZESSINDUSTRIE. HÖHENKIRCHEN: IT-RESEARCH, 1999
- [292] UNI (HRSG.): GOOD MANUFACTURING PRACTICE (GMP) – CRITERIA FOR THE ASEPTIC PACKAGING OF LIQUID FOOD. 2001
- [293] VDI RICHTLINIE 3633, BLATT 1: SIMULATION VON LOGISTIK-, MATERIALFLUSS- UND PRODUKTIONSSYSTEMEN – GRUNDLAGEN. BERLIN, BEUTH, 2000
- [294] VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; YIN, K.: A REVIEW OF PROCESS FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS: PART I: QUANTITATIVE MODEL-BASED METHODS; COMPUTERS AND CHEMICAL ENGINEERING, 27 (2003), Nr. 1, S. 293-311
- [295] VERBAND DER DEUTSCHEN FRUCHTSAFTINDUSTRIE (VDF) (HRSG.): 0,7 L MEHRWEG FRUCHTSAFTFLASCHE „VDF“, o. J.
- [296] VIERTL, R.; HARETER, D.: BESCHREIBUNG UND ANALYSE UNSCHARFER INFORMATIONEN. WIEN, NEW YORK: SPRINGER, 2006
- [297] VINTZILEOS, A. M. ET AL.: COST-BENEFIT ANALYSIS OF PARENTAL DIAGNOSIS FOR DOWN SYNDROME USING THE BRITISH OR THE AMERICAN APPROACH. OBSTETRICS & GYNECOLOGY, 95 (2000), Nr. 4, S. 577-583
- [298] VOGELPOHL, H.: ERGEBNISSE UND ERFAHRUNGEN AUS ABNAHMEVERSUCHEN. BRAUWELT 146 (2006), Nr. 7, S. 174-178
- [299] VOIGT, T.: ENTWICKELN EINES LEITSYSTEMS FÜR GETRÄNKEABFÜLLANLAGEN MITTELS FUNKTIONSBAUSTEINEN. ABSCHLUSSBERICHT ZUM PROJEKT B 66, BONN: WISSENSCHAFTSFÖRDERUNG DER DEUTSCHEN BRAUWIRTSCHAFT E. V., 2004
- [300] VOIGT, T.: NEUE METHODEN FÜR DEN EINSATZ DER INFORMATIONSTECHNOLOGIE BEI GETRÄNKEABFÜLLANLAGEN. FORTSCHRITT-BERICHT VDI REIHE 14, DÜSSELDORF: VDI-VERLAG, 2004

- [301] VOIGT, T.; GRABRUCKER, R.; VOGELPOHL, H.: ABNAHMEVERSUCHE BEI GETRÄNKEABFÜLLANLAGEN. DER WEIHENSTEPHANER 71 (2003), NR. 3, S. 110-116
- [302] VOIGT, T.; RÄDLER, T.; WEISSER, H.: STANDARD-INTERFACE BETWEEN FIELD AND PRODUCTION LEVEL OF FILLING LINES. PROCEEDINGS OF THE 28TH EBC CONGRESS. NÜRNBERG: FACHVERLAG HANS CARL, 2001
- [303] VOIGT, T.; RÄDLER, T.; WEISSER, H.: STANDARD-PFLICHTENHEFT FÜR BDE-SYSTEME INNERHALB VON GETRÄNKEABFÜLLLINIEN, FREISING: TU MÜNCHEN, LEHRSTUHL FÜR BRAUEREIANLAGEN UND LEBENSMITTEL-VERPACKUNGSTECHNIK, 2000
- [304] VOIGT, T.; SCHMIDT, M., WEISSER, H.: ENTWICKELN EINES WISSENSBASIERTEN WERKZEUGS ZUM ZUORDNEN FÜLLERRELEVANTER STÖRUNGEN. PROJEKTABSCHLUSSBERICHT, FREISING-WEIHENSTEPHAN: TU MÜNCHEN, LEHRSTUHL FÜR BRAUEREIANLAGEN UND LEBENSMITTEL-VERPACKUNGSTECHNIK, 2003
- [305] VOIGT, T.; KATHER, A; LANGOWSKI, H.-C: INFORMATION TECHNOLOGY AS A SUPPORTER TO INCREASE THE AVAILABILITY OF FILLING AND PACKAGING PLANTS. PROCEEDINGS OF THE 31ST EBC CONGRESS, VENEDIG. NÜRNBERG: HANS CARL, 2007, AUF CD
- [306] WALTER, D.; CHILUKURI, K. M.: CLADIA: A FUZZY CLASSIFIER SYSTEM FOR DISEASE DIAGNOSIS PROCEEDINGS OF THE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC-2000), LA JOLLA, USA (2000), S. 1429-1435
- [307] WANG, H.-P. ET AL.: MASCHINENFEHLERDIAGNOSESYSTEM UND -VERFAHREN. SCHUTZRECHT DE 44 47 288 A1, 1995
- [308] WANG, W.; WONG, A. K.: AUTOREGRESSIVE MODEL-BASED GEAR FAULT DIAGNOSIS. JOURNAL OF VIBRATIONS AND ACOUSTICS, 124 (2002), S. 172-179
- [309] WANG, X. ET AL.: ON THE OPTIMIZATION OF FUZZY DECISION TREES. FUZZY SETS AND SYSTEMS, 112 (2000), S. 117-125
- [310] WEBER, P.; SUHNER, M.-C.; IUNG, B.: SYSTEM APPROACH-BASED BAYESIAN NETWORK TO AID MAINTENANCE OF MANUFACTURING PROCESS. 6TH IFAC SYMPOSIUM ON COST ORIENTED AUTOMATION, LOW COST AUTOMATION, BERLIN, (2001), S. 33-39
- [311] WEILE, F.; BLEISCH, G.: BETRIEBSDATENERFASSUNG BEI VERPACKUNGSMASCHINEN - TEURER LUXUS ODER SINNVOLLE INVESTITION? VERPACKUNGS-RUNDSCHAU 48 (1996), NR. 11, S. 60-63
- [312] WEISSER, H.: BETRIEBSDATENERFASSUNG IN DER GETRÄNKEINDUSTRIE. FLÜSSIGES OBST 64 (1997), NR. 9, S. 502-506
- [313] WEIB, M.: SIMULATIONSGESTÜTZTE SCHWACHSTELLENANALYSE - PRODUKTIONSRESERVEN IN ANLAGEN ERSCHLIEßEN. INDUSTRIE ANZEIGER 118 (1996), NR. 49, S. 46-47
- [314] WEN, Z. ET AL.: CASE BASE REASONING IN VEHICLE FAULT DIAGNOSTICS. IEEE PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS (2003), S. 2679-2684
- [315] WILLIAMS, B.; NAYAK, P.: A MODEL-BASED APPROACH TO REACTIVE SELF-CONFIGURING SYSTEMS. 7TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON PRINCIPLES OF DIAGNOSIS (DX96), MONTREAL, 1996
- [316] WODTKE, E. W.: MES-LANDSCHAFT – EIN AKTUELLER ÜBERBLICK ÜBER MARKT, ANBIETER UND TRENDS. AUTOMATISIERUNGSTECHNISCHE PRAXIS (ATP), 47 (2005), NR. 1, S. 36-40
- [317] WU, L.-H. ET AL.: THE INTELLIGENT FAULT DIAGNOSIS FOR COMPOSITE SYSTEMS BASED ON MACHINE LEARNING. PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING AND CYBERNETICS, DALIAN, CHINA (2006), S. 571-575
- [318] YANG, D.-M. ET AL.: THIRD-ORDER SPECTRAL TECHNIQUES FOR THE DIAGNOSIS OF MOTOR BEARING CONDITION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, 16 (2002), NR. 2-3, S. 391-411
- [319] YANG, J. ET AL.: ARTIFICIAL NEURAL NETWORK CLASSIFICATION BASED ON HIGH-PERFORMANCE LIQUID CHROMATOGRAPHY OF URINARY AND SERUM NUCLEOSIDES FOR THE CLINICAL DIAGNOSIS OF CANCER. JOURNAL OF CHROMATOGRAPHY, 780 (2002), S. 27-33
- [320] YAO, J.; Y. J.-S.: FUZZY DECISION MAKING FOR MEDICAL DIAGNOSIS BASED ON FUZZY NUMBER AND COMPOSITIONAL RULE OF INFERENCE. FUZZY SETS AND SYSTEMS 120 (2001), S. 351-366
- [321] YASUHIRO, O.: PACKAGING PLANT DIAGNOSTIC SYSTEM. SCHUTZRECHT JP 10079599 A, 1998

- [322] YOUNES, H. L.; BOMAN, M.: TOOLS FOR ARTIFICIAL DECISION MAKING. PROCEEDINGS OF MAAMAW'99, VALENCIA, 1999
- [323] YUKIYOSHI, T.: METHOD FOR MONITORING INDUSTRIAL MACHINE AND DEVICE THEREFOR. SCHUTZRECHT JP 2000210800 A, 2000
- [324] ZADEH, L. A.: FUZZY SETS. IN: INFORMATION AND CONTROL, NR. 8 (1965), S. 338-353
- [325] ZADEH, L. A.: FUZZY SETS AS A BASIS FOR THEORY OF POSSIBILITY. FUZZY SETS AND SYSTEMS NR. 1 (1978), S. 3-28
- [326] ZELL, A.: SIMULATION NEURONALER NETZE. MÜNCHEN: OLDENBURG, 1999
- [327] ZHOU, Z.-H.: MEDICAL DIAGNOSIS WITH C4.5 RULE PRECEDED BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK ENSEMBLE. IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION TECHNOLOGY IN BIOMEDICINE, 7 (2003), NR. 1, S. 37-42
- [328] ZHOU, Z.-H. ET AL.: LUNG CANCER CELL IDENTIFICATION BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK ENSEMBLES. ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MEDICINE, 24 (2002), S. 25-36.
- [329] ZWICKLER, E.: UNTERSTÜTZUNG DER UNTERNEHMENSÜBERGREIFENDEN PRODUKTENTWICKLUNG DURCH DEN EINSATZ MODERNER INFORMATIONSTECHNOLOGIEN. DISSERTATION EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE, ZÜRICH 1998

8. Anhang

Anhang A

Kennzahlen für Abfüll- und Verpackungsanlagen

Die Bewertung der Effizienz von Lebensmittelverpackungsanlagen wird auf der Basis von Kennzahlen durchgeführt. In der Literatur finden sich zahlreiche verschiedene Kennzahlenmodelle. Das Spektrum reicht dabei von einer speziellen Betrachtung der einzelnen Verluste an den Maschinen bis zu einer ganzheitlichen Sicht, in der die Laufzeit der Anlage in Bezug zur insgesamt verfügbaren Zeit der entsprechenden Periode gesetzt wird [81], [82], [84], [123], [200].

Da in der vorliegenden Arbeit Methoden zur automatischen Fehlerlokalisierung in Lebensmittelverpackungsanlagen entwickelt werden, die hauptsächlich Auswirkungen auf eine Erhöhung der technischen Verfügbarkeit der Anlage haben sollen, werden im Folgenden die Kennzahlensysteme für Abfüll- und Verpackungsanlagen nach DIN vorgestellt und in der Arbeit verwendet. Modelle, wie die Overall Equipment Effectiveness (OEE) oder die Overall Performance Indicators (OPI), die eine detailliertere Betrachtung der organisatorischen Verfügbarkeit erlauben, sollen keine Verwendung finden.

Maschinenarbeitszeit t_m			
Betriebszeit t_{btr}			Nebenzeit t_{neb}
Laufzeit t_l		Ausfallzeit t_a	
Qualitätszeit t_q	Ausschusszeit t_{aus}	Leerlaufzeit t_e	
	Verlustzeit t_v		

Bild 78: Zeitbegriffe der DIN 8743 [81]

Für die Berechnung der Kennzahlen einer Verpackungsanlage benötigt man eine Differenzierung des Zeitbegriffs, wie sie aus Bild 78 ersichtlich ist. Hierbei wird die Maschinenarbeitszeit einer Verpackungsanlage t_{mA} in die Qualitätszeit der Anlage t_{qA} , verschiedene Verlustzeiten der Anlage t_{vA} und die geplanten Nebenzeiten der Anlage t_{nebA} untergliedert. Bei den Verlustzeiten werden Ausschusszeiten t_{ausA} , in denen die Anlage Ausschuss produziert, Leerlaufzeiten t_{eA} , in denen die Anlage zwar läuft, jedoch keine Einheiten produziert, und Ausfallzeiten t_{aA} , in denen die Anlage aufgrund eines Ausfallkriteriums, wie z. B. eines technischen Defekts, nicht läuft, unterschieden. Dabei gilt der Stillstand des Zentralaggregats bzw. der Engpassmaschine als Anlagenstillstand. Bei den einzelnen Zeiten wird zusätzlich zwischen organisatorischen Verlustzeiten (t_{voA}) und technischen Verlustzeiten (t_{vtA}) unterschieden, die wiederum in anlagenfremd (t_{vtfA}) und anlagebedingt (t_{vtmA}) untergliedert werden. Für eine genaue Definition der Begriffe sei auf [81] verwiesen.

Zur Bewertung der Verpackungsanlage werden die verschiedenen Wirkungsgrade der Anlage herangezogen. Man unterscheidet:

den Gesamtwirkungsgrad einer Verpackungsanlage:

$$\eta_{gA} = \frac{\text{Betriebsausbringung}}{\text{Einstellausbringung}} \times 100 \quad \text{(Formel 8.1)}$$

den technischen Wirkungsgrad einer Verpackungsanlage:

$$\eta_{tA} = \frac{\text{Betriebsausbringung}}{\text{Einstellausbringung} \cdot (1 - (t_{voA}/t_{btrA}))} \times 100 \quad \text{(Formel 8.2)}$$

den anlagentechnischen Wirkungsgrad:

$$\eta_{aA} = \frac{\text{Effektivausbringung}}{\text{Einstellausbringung}} \times 100 \quad \text{(Formel 8.3)}$$

Dabei ist die Einstellausbringung „die rechnerische Anzahl qualitätsgerechter Packungen je Zeiteinheit, die die Verpackungsanlage bei der eingestellten Arbeitsgeschwindigkeit bei ununterbrochenem Lauf und störungsfreier Produktion herstellt“. Bei der Betriebsausbringung handelt es sich um die tatsächliche Anzahl qualitätsgerechter Packungen bezogen auf die Betriebszeit der Anlage. Bei der Einstellausbringung wird die tatsächliche Anzahl der Packungen auf die Betriebszeit abzüglich der organisatorisch verursachten sowie der anlagenfremd verursachten Verluste bezogen [81].

Für Getränkeabfüllanlagen, als Spezialfall der Lebensmittelverpackungsanlage, sind die Zeitbegriffe und daraus resultierend auch die Kennzahlen für die Anlage in einer eigenen DIN Norm abweichend definiert [82]. Da es sich bei den Beispielanlagen in der vorliegenden Arbeit um verschiedene Abfüll- und Verpackungsanlagen aus der Getränkeindustrie handelt, sollen die Getränkeabfüllanlagen-spezifischen Kennzahlen erläutert und zu den allgemeinen Kennzahlen für Verpackungsanlagen in Bezug gesetzt werden. Die Differenzierung des Zeitbegriffs ist für Getränkeabfüllanlagen wie aus Bild 79 ersichtlich definiert.

Effektive Laufzeit	Maschinen- oder Anlagenbedingte Störzeiten	Maschinen- oder Anlagenfremde Störzeiten	Nebenzeiten
Allgemeine Laufzeit			
Betriebszeit			
Arbeitszeit			

Bild 79: Zeitbegriffe der DIN 8782 [82]

Ein Vergleich von Bild 78 und Bild 79 macht deutlich, dass sich bei der Differenzierung der Zeitbegriffe lediglich Unterschiede bei der Aufgliederung der Anlagenlaufzeit ergeben. Während die DIN 8782 für Getränkeabfüllanlagen lediglich anlagefremde und anlagebedingte Störzeiten unterscheidet, findet sich in der DIN 8743 die oben dargestellte Aufgliederung in die verschiedenen Verlustzeiten, die ihrerseits anlagefremd oder anlagebedingt sein können. Ein einfacher Vergleich der Allgemeinen Laufzeit aus DIN 8782 mit der Laufzeit aus DIN

8743 ist somit nicht möglich. Die Effektive Laufzeit ist definiert als die „Summe der Zeiträume, in denen die Füllmaschine störungsfrei arbeitet. Zeiträume in denen die Maschine mit verminderter Ausbringung läuft, werden anteilig zugerechnet“. Sie ist damit äquivalent zu der Qualitätszeit einer Verpackungsanlage, auch wenn hier keine explizite Aussage zur Anrechnung von Zeiten mit verminderter Ausbringung gemacht wird, da die Qualitätszeit als Quotient der qualitätsgerechten Packungen und der Einstellausbringung definiert ist.

Die Norm für Getränkeabfüllanlagen definiert für die Bewertung der Anlagen folgende Kennzahlen:

Liefergrad der Abfüllanlage

$$\lambda_A = \frac{\text{Effektivausbringung}}{\text{Nennausbringung}} \quad (\text{Formel 8.4})$$

Ausnutzungsgrad der Abfüllanlage

$$\varphi_A = \frac{\text{Durschnittsausbringung}}{\text{Nennausbringung}} \quad (\text{Formel 8.5})$$

Wirkungsgrad der Abfüllanlage

$$\eta_A = \frac{\text{Effektivausbringung der Anlage}}{\text{Einstellausbringung der Füllmaschine}} \quad (\text{Formel 8.6})$$

Dabei entspricht der Wirkungsgrad der Abfüllanlage dem prozentualen anlagentechnischen Wirkungsgrad einer Verpackungsanlage bezogen auf das Zentralaggregat.

Die Kennzahlen Liefergrad und Ausnutzungsgrad der Anlage haben hingegen keine Entsprechung in der DIN 8743, da sie sich auf die Nennausbringung der Anlage beziehen, die in der DIN 8782 als die Ausbringung definiert ist, auf die das Zentralaggregat, bei Abfüllanlagen meist die Füllmaschine, ausgelegt ist. Sie ermöglichen damit auch Werte über 100 %, da in der DIN 8782 definierte Nennausbringung im Gegensatz zur Nennausbringung der DIN 8743 keine maximal mögliche Ausbringung darstellt. Der Ausnutzungsgrad stellt dadurch, dass die Durchschnittsausbringung als Quotient der abgefüllten Einheiten zur Arbeitszeit definiert ist, eine Kennzahl zur Bewertung aller Verluste während der Arbeitszeit dar. Der Liefergrad hingegen bezieht sich lediglich auf die anlagebedingten Verluste und ähnelt damit dem technischen Wirkungsgrad einer Verpackungsmaschine.

Bei der Verwendung der Kennzahlen ist wegen der unterschiedlichen Bezugszeiten auf den genauen Kontext zu achten, um Verwechslungen zu vermeiden.

Anhang B

Definition des Befehls Read Single Value für die Abfrage eines Einzelwertes mit der entsprechenden Fehlerbehandlung.

Der Aufbau des Befehls ist dabei in nachstehend erläuterten Schema dargestellt:

Inhalt	Speicherbedarf	Codierung
--------	----------------	-----------

Hierbei ist der Speicherbedarf durch WORD und DWORD angegeben, was im Falle von WORD einen 16 Bit Speicherbedarf und im Falle von DWORD einen 32 Bit Speicherbedarf bezeichnet. Die Codierung erfolgt in hexadezimaler Darstellung. In die leeren Codierungsbereiche der Tabellen sind die variablen Werte für die einzelnen Inhalte einzufügen.

Befehlsname: READ_SVALUE

Beschreibung: Anforderung an den Server, einen Wert mit der Tag-Nummer TAG_NUM zurückzuschicken. Die Dummies dienen der Erzeugung eines Befehlsblocks konstanter Länge.

Befehlsaufbau:

READ_SVALUE	WORD	0x0002
TAG_NUM	WORD	
DUMMY	DWORD	0x00000000

Antwort: Die Antwort besteht aus dem Resultcode RESULT_CODE, der Tag-Nummer des angefragten Datenpunkts TAG_NUM sowie dessen Wert VALUE.

Aufbau der fehlerfreien Antwort:

RESULT_CODE	WORD	0x0000
TAG_NUM	WORD	
VALUE	DWORD	

Fehlerbehandlung:

Unplausibles Argument: Dieser Fall tritt ein, wenn ein nicht vorhandener Datenpunkt abgefragt wird. Die Antwort besteht aus dem Resultcode 0xDDDD, dem WS_Error Tag sowie der Tag-Nummer FEHLTAG des unplausiblen Arguments. Der Dummy dient der Erzeugung eines Ant-

wortblocks mit konstanter Länge. Nach dem Senden der Antwort wird der Befehl verworfen.

Aufbau der Antwort:

RESULT_CODE	WORD	0xDDDD
WS_Error	WORD	0x0000
FEHLTAG	WORD	
DUMMY	WORD	0x0000

Unerlaubter Zugriff:

Dieser Fall tritt ein, wenn die Zugriffsrechte eines Datenpunkts verletzt werden. Die Fehlerbehandlung erfolgt wie bei „unplausibles Argument“, jedoch mit dem Resultcode 0xB BBB.

Für die Fehlerbehandlung der Befehl-unabhängigen Fehler, wie Serverüberlastung usw., sei auf [163] verwiesen.

Anhang C

Standard-Datenpunkt zum Betriebszustand [163]:

Name: Betriebszustand (Operating State)

Tag-Nummer: 00300

Tag-Name: WS_Cur_State

Datenformat: Hex32 oder Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Beim Abarbeiten des programmgemäßen Steuerungsablaufs können bei störungsbehafteten Maschinen verschiedene Betriebszustände auftreten: *Stoppzustand (Stopped)*, *Startroutine (Starting)*, *Vorbereitet (Prepared)*, *Mangel am Einlauf (Lack)*, *Stau am Auslauf (Tailback)*, *Mangel im Nebenstrom (Lack in Branch Line)*, *Stau im Nebenstrom (Tailback in Branch Line)*, *Betrieb (Operating)*, *Stoppoutine (Stopping)*, *Abbruch (Aborting)*, *Eigenstörung (Equipment Failure)*, *Fremdstörung (External Failure)*, *Not-Aus (Emergency Stop)*, *Anhalten (Holding)* oder *Angehalten (Held)* die „exklusiv oder“ auftreten können. Der Betriebszustand ist bitweise zu codieren oder als Integer-Zahl zu dokumentieren.

Stoppzustand (Stopped):

Die Maschine steht unter elektrischer Spannung, ist jedoch in einem stationären Zustand. Dieser Zustand befähigt die Maschine zur Kommunikation, sie ist jedoch noch nicht initialisiert oder bereit ihre vorgesehene Funktion auszuführen.

Startroutine (Starting):

Die Maschine befindet sich im Initialisierungsschritt. Hierunter ist nicht das Programm *Produktion Anlaufen / Vollfahren (Start Up)* zu verstehen. Es handelt sich ausschließlich um die Initialisierung der Maschine. Als Beispiel hierfür wäre ein Selbsttest eines Packroboters zu verstehen, der in Form eines Bewegungstests die Funktionalität der einzelnen Servoantriebe überprüft. In der BDE ist die Zeitspanne der *Startroutine* dem *Stoppzustand (Stopped)* zuzuordnen.

Vorbereitet (Prepared):

Die Maschine ist bereit, ihre vorgesehene Funktion auszuführen; sie ist allerdings gerade in einem Wartezustand und muss vom Bedienenden in Betrieb gesetzt werden oder läuft automatisch an (kein Mangel- oder Stauzustand).

Mangel am Einlauf (Lack):

Die Maschine führt ihre vorgesehene Funktion infolge eines vom Sensorsystem der Steuerung erkannten Gutstrommangels in der Zuführung der Maschine nicht aus (Maschinenstopp). Bei Maschinen, die mehrere Einläufe besitzen, bezieht sich der Zustand Mangel im Einlauf auf den Hauptstrom, d. h. auf das Gut (Kasten, Flasche), welches in Richtung der Füllmaschine (zentrale Maschine) geführt wird bzw. von der Füllmaschine weggeführt wird. Der Mangel im Einlauf ist eine Fremdstörung, wird aber aufgrund der Bedeutung für die Visualisierung und das technische Berichtswesen separat aufgelegt.

Stau im Auslauf (Tailback):

Die Maschine führt ihre vorgesehene Funktion infolge eines vom Sensorsystem der Steuerung erkannten Staus in der Gutstromabführung der Maschine nicht aus (Maschinenstopp). Bei Maschinen, die mehrere Abführungen besitzen, bezieht sich der Zustand Stau im Auslauf auf den Hauptstrom, d. h. auf das Gut (Kasten, Flasche), welches in Richtung der Füllmaschine (zentrale Maschine) geführt wird bzw. von der Füllmaschine weggeführt wird. Der Stau im Auslauf ist eine Fremdstörung, wird aber aufgrund der Bedeutung für die Visualisierung und das technische Berichtswesen separat aufgelegt.

Stau/Mangel im Nebenstrom (Lack/Tailback Branch Line):

Die Maschine führt ihre vorgesehene Funktion infolge eines vom Sensorsystem der Steuerung erkannten Mangels in der Nebenstromzuführung oder Staus in der Nebenstromabführung der Maschine nicht aus (Maschinenstopp). Dieser Zustand kann nur bei Maschinen auftreten, die zwei Ab- bzw. Zuführungen besitzen und bei denen der Nebenstrom wiederum Eingang bzw. Ausgang einer vor- oder nachgeschalteten Maschine der Abfüllanlage ist (Pack- und Palettiermaschinen). Der Nebenstrom bezieht sich auf das Gut (Palette, Kasten), das weiter entfernt von der Füllmaschine (zentrale Maschine) geführt wird. Der Stau/Mangel im Nebenstrom ist eine Fremdstörung, wird aber aufgrund der Bedeutung für die Visualisierung und das technische Berichtswesen separat aufgelegt.

Betrieb (Operating):

Die Maschine führt ihre vorgesehene Funktion aus (DIN EN 292-1).

Stopproutine (Stopping)

Die Maschine wird über eine kontrollierte Stopproutine in den *Stoppzustand (Stopped)* überführt. Hierunter ist nicht das Programm *Produktion Auslaufen / Leerfahren* zu verstehen. Es handelt sich vielmehr um maschineninterne Routinen zum Erreichen eines stationären Zustands. Als Beispiel ist hierunter das Einnehmen einer Parkposition des Packkopfes eines Packroboters zu nennen. In der BDE ist die Zeitspanne der Stopproutine dem *Stoppzustand (Stopped)* zuzuordnen.

Abbruch (Aborting):

Die Maschine befindet sich in der Zeitspanne zwischen dem Auftreten des Fehlers und dem daraus resultierenden Endzustand (*Equipment Failure, External Failure, Emergency Stop*). Diese Zeitspannen sind in der BDE den entsprechenden Störungen zuzuordnen.

Eigenstörung (maschinenbedingte Störung) (Equipment Failure):

Störung, die an der Maschine selbst auftritt und die zu einem Maschinenstopp führt (nach DIN 8782). Im Betriebszustand *Eigenstörung* führt die Maschine ihre vorgesehene Funktion infolge einer vom Sensorsystem der Steuerung der Maschine erkannten, unzulässigen Abweichung vom Soll-Zustand (Störmeldung) nicht aus (Maschinenstopp). Die unzulässige Abweichung ist in der Steuerung als Eigenstörung parametrisiert.

Fremdstörung (maschinenfremde Störung) (External Failure):

Störung, die der Maschine nicht selbst zuzuordnen ist, aber dennoch zu einem Maschinenstopp führt (nach DIN 8782). Im Betriebszustand *Fremdstörung* führt die Maschine ihre vorgesehene

Funktion infolge einer vom Sensorsystem der Steuerung erkannten, unzulässigen Abweichung vom Soll-Zustand (Störmeldung) nicht aus (Maschinenstopp). Die unzulässige Abweichung ist in der Steuerung als Fremdstörung parametrisiert. Die Fremdstörungen *Mangel am Einlauf*, *Stau am Auslauf* und *Stau/Mangel im Nebenstrom* werden separat erfasst und werden somit nicht diesem Betriebszustand zugeordnet. Sonstige Mangel- oder Stausituationen werden dagegen als *Fremdstörungen* erfasst.

Not-Aus (Emergency Stop)

Zustand, der nach Betätigen des Not-Aus-Schalters eintritt. Die Störungsursachen sind nach Möglichkeit durch den Bediener in maschinenfremde und maschinenbedingte Störungen einzuteilen.

Anhalten (Holding)

Die Maschine befindet sich in der Zeitspanne zwischen dem Einleiten des Anhaltens durch den Bediener und dem daraus resultierenden Endzustand (*Held*). Diese Zeitspanne ist in der BDE dem Zustand *Angehalten (Held)* zuzuordnen.

Angehalten (Held)

Die Maschine führt ihre vorgesehene Funktion infolge einer nicht vom Sensorsystem der Steuerung sondern vom Bediener erkannten unzulässigen Abweichung vom Soll-Zustand nicht aus (Maschinenstopp), so dass der Bediener eingreift und hierfür trennende Schutzeinrichtungen öffnet oder die Maschine mittels Hand-Aus außer Betrieb setzt. Die Störungsursachen sind nach Möglichkeit durch den Bediener in maschinenfremde und maschinenbedingte Störungen einzuteilen.

Die unterschiedlichen Betriebszustände können nur „exklusiv oder“ verknüpft auftreten, d. h., es kann immer nur ein Betriebszustand zur gleichen Zeit auftreten. Die Codierung der Betriebszustände in binärer Form und die zugehörigen Integer Zahlen sind in Tabelle 20 aufgeführt (in binärer Form sind die höheren Bytes 0).

Selbst definierter Datenpunkt einer fiktiven Firma XYZ AG für die Verschleißkraft eines Verschleißstempels einer Verschleißmaschine:

Name:	Verschleißkraft Verschleißstempel
Tag-Nummer:	31101 (im freien Bereich der Parameter)
Tag-Name:	XYX_Closure_Force
Format:	Unsigned32
Lese-/Schreibzugriff:	RW
Beschreibung:	Gibt die Verschleißkraft des Verschleißstempels in N an.

Tabelle 20: Codierung der Betriebszustände

Betriebszustand	Binäre Codierung im zweiten Byte	Binäre Codierung im ersten Byte	Integer-Codierung
Stopped	00000000	00000001	1
Starting	00000000	00000010	2
Prepared	00000000	00000100	4
Lack	00000000	00001000	8
Tailback	00000000	00010000	16
Lack Branch Line	00000000	00100000	32
Tailback Branch Line	00000000	01000000	64
Operating	00000000	10000000	128
Stopping	00000001	00000000	256
Aborting	00000010	00000000	512
Equipment Failure	00000100	00000000	1024
External Failure	00001000	00000000	2048
Emergency Stop	00010000	00000000	4096
Holding	00100000	00000000	8192
Held	01000000	00000000	16384

Anhang D

Das XML-Schema der Gerätebeschreibungsdatei als Skizze und in Textform [163]

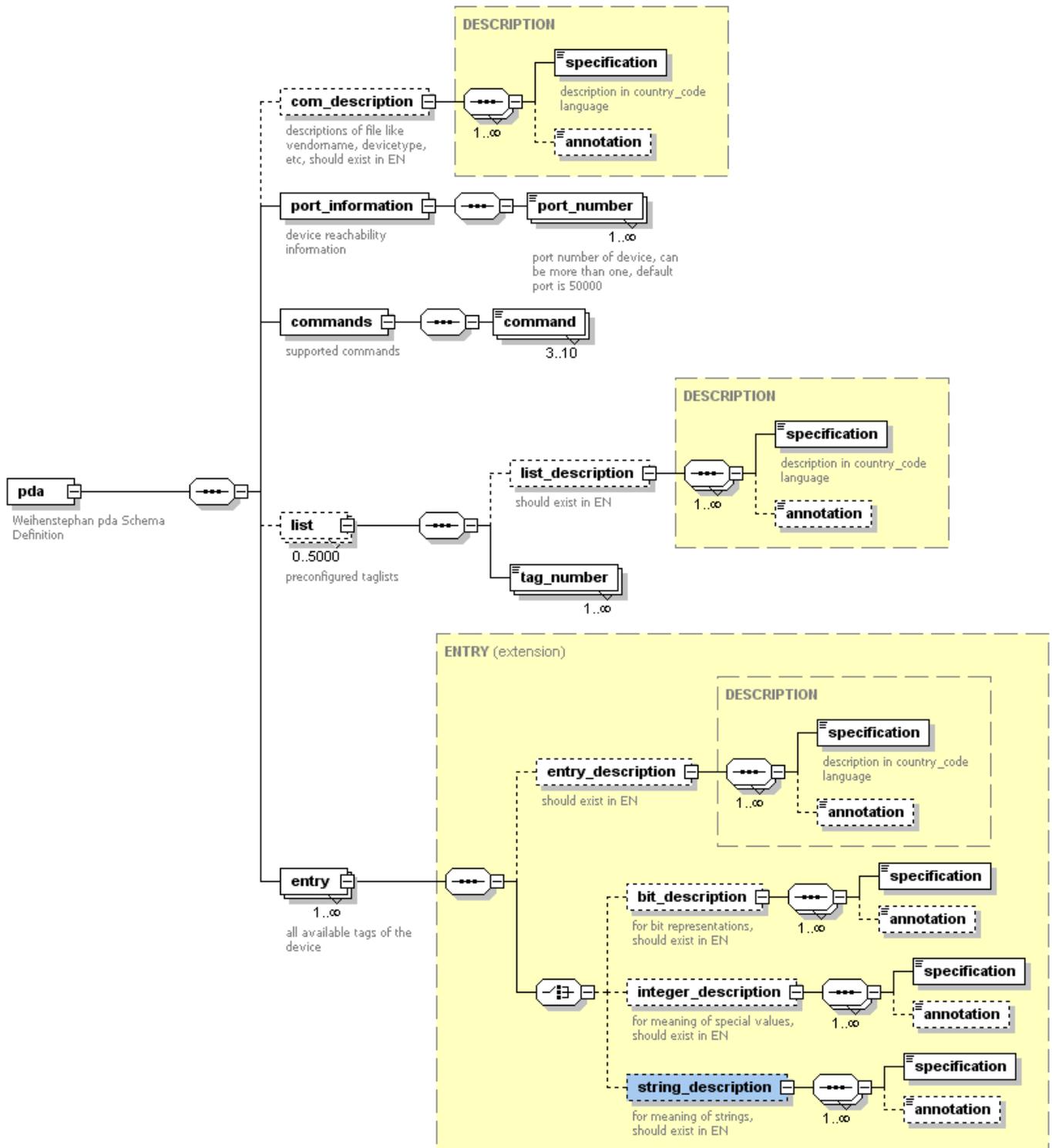


Bild 80: Bildliche Darstellung des XML-Schemas der Gerätebeschreibungsdatei nach den Weihenstephaner Standards

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  elementFormDefault="qualified" attributeFormDefault="unqualified">
  <xs:element name="pda">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Weihenstephan pda Schema Definition</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element name="com_description" type="DESCRIPTION" minOccurs="0">
          <xs:annotation>
            <xs:documentation>descriptions of file like vendorname, devicetype, etc, should exist in EN</xs:documentation>
          </xs:annotation>
        </xs:element>
        <xs:element name="port_information">
          <xs:annotation>
            <xs:documentation>device reachability information</xs:documentation>
          </xs:annotation>
          <xs:complexType>
            <xs:sequence>
              <xs:element name="port_number" maxOccurs="unbounded">
                <xs:annotation>
                  <xs:documentation>port number of device, can be more than one, default port is 50000</xs:documentation>
                </xs:annotation>
                <xs:simpleType>
                  <xs:restriction base="xs:nonNegativeInteger">
                    <xs:maxInclusive value="65535"/>
                  </xs:restriction>
                </xs:simpleType>
              </xs:element>
            </xs:sequence>
            <xs:attribute name="max_connections" use="required">
              <xs:annotation>
                <xs:documentation>maximum no of connections at the same time at one port</xs:documentation>
              </xs:annotation>
              <xs:simpleType>
                <xs:restriction base="xs:nonNegativeInteger">
                  <xs:maxInclusive value="65535"/>
                </xs:restriction>
              </xs:simpleType>
            </xs:attribute>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="commands">
          <xs:annotation>
            <xs:documentation>supported commands</xs:documentation>
          </xs:annotation>
          <xs:complexType>
            <xs:sequence>
              <xs:element name="command" minOccurs="3" maxOccurs="10">
                <xs:complexType>
                  <xs:simpleContent>
                    <xs:extension base="COMMANDS"/>
                  </xs:simpleContent>
                </xs:complexType>
              </xs:element>
            </xs:sequence>
            <xs:attribute name="max_requests" type="xs:nonNegativeInteger" use="required">
              <xs:annotation>
                <xs:documentation>maximum no of single requests per second</xs:documentation>
              </xs:annotation>
            </xs:attribute>
            <xs:attribute name="max_values" type="xs:nonNegativeInteger" use="optional">
              <xs:annotation>
                <xs:documentation>optional maximum no of values in one request</xs:documentation>
              </xs:annotation>
            </xs:attribute>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="list" minOccurs="0" maxOccurs="5000">
          <xs:annotation>
            <xs:documentation>preconfigured taglists</xs:documentation>
          </xs:annotation>
        </xs:element>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>

```

```

</xs:annotation>
<xs:complexType>
  <xs:sequence>
    <xs:element name="list_description" type="DESCRIPTION" minOccurs="0">
      <xs:annotation>
        <xs:documentation>should exist in EN</xs:documentation>
      </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:element name="tag_number" maxOccurs="unbounded">
      <xs:simpleType>
        <xs:restriction base="xs:nonNegativeInteger">
          <xs:maxInclusive value="65535"/>
        </xs:restriction>
      </xs:simpleType>
    </xs:element>
  </xs:sequence>
  <xs:attribute name="list_number" use="required">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>number for List identification, has to be unique</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:simpleType>
      <xs:restriction base="xs:nonNegativeInteger">
        <xs:minInclusive value="60000"/>
        <xs:maxInclusive value="64999"/>
      </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
  </xs:attribute>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="entry" maxOccurs="unbounded">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>all available tags of the device</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:complexContent>
      <xs:extension base="ENTRY">
        <xs:attribute name="tag_number" use="required">
          <xs:simpleType>
            <xs:restriction base="xs:nonNegativeInteger">
              <xs:maxInclusive value="65535"/>
            </xs:restriction>
          </xs:simpleType>
        </xs:attribute>
        <xs:attribute name="tag_name" use="required">
          <xs:simpleType>
            <xs:restriction base="xs:Name">
              <xs:maxLength value="20"/>
            </xs:restriction>
          </xs:simpleType>
        </xs:attribute>
        <xs:attribute name="data_type" type="DATATYPES" use="required"/>
        <xs:attribute name="rw_access" type="RWACCESS" use="required"/>
        <xs:attribute name="min_incl" type="xs:float">
          <xs:annotation>
            <xs:documentation>optional minimal value, value included</xs:documentation>
          </xs:annotation>
        </xs:attribute>
        <xs:attribute name="max_incl" type="xs:float">
          <xs:annotation>
            <xs:documentation>optional maximal value, value included</xs:documentation>
          </xs:annotation>
        </xs:attribute>
      </xs:extension>
    </xs:complexContent>
  </xs:complexType>
</xs:element>
</xs:sequence>
<xs:attribute name="src" type="xs:anyURI" use="required"/>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:simpleType name="COMMANDS">
  <xs:annotation>

```

```

    <xs:documentation>supported Commandnames</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:restriction base="xs:Name">
    <xs:enumeration value="READ_SVALUE"/>
    <xs:enumeration value="WRITE_SVALUE"/>
    <xs:enumeration value="NOOP"/>
    <xs:enumeration value="READ_LIST"/>
    <xs:enumeration value="WRITE_LIST"/>
    <xs:enumeration value="READ_MVALUE"/>
    <xs:enumeration value="WRITE_MVALUE"/>
    <xs:enumeration value="READ_STRING"/>
    <xs:enumeration value="WRITE_STRING"/>
    <xs:enumeration value="READ_CONFIG"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="DATATYPES">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>possible datatypes of tags</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:restriction base="xs:Name">
    <xs:enumeration value="SIGNED32"/>
    <xs:enumeration value="UNSIGNED32"/>
    <xs:enumeration value="HEX32"/>
    <xs:enumeration value="STRING16"/>
    <xs:enumeration value="REAL"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="RWACCESS">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>access on tag read, write, read_write</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:restriction base="xs:Name">
    <xs:enumeration value="R"/>
    <xs:enumeration value="W"/>
    <xs:enumeration value="RW"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="TYPEOFOR">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>disjunction or antivalence (exclusive or) of bits</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:restriction base="xs:Name">
    <xs:enumeration value="OR"/>
    <xs:enumeration value="XOR"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<xs:complexType name="DESCRIPTION">
  <xs:sequence maxOccurs="unbounded">
    <xs:element name="specification">
      <xs:annotation>
        <xs:documentation>description in country_code language</xs:documentation>
      </xs:annotation>
      <xs:complexType>
        <xs:simpleContent>
          <xs:extension base="xs:string">
            <xs:attribute name="country_code" type="xs:language" use="required">
              <xs:annotation>
                <xs:documentation>ISO639 2-letter code</xs:documentation>
              </xs:annotation>
            </xs:attribute>
          </xs:extension>
        </xs:simpleContent>
      </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="annotation" minOccurs="0">
      <xs:complexType>
        <xs:simpleContent>
          <xs:extension base="xs:string">
            <xs:attribute name="country_code" type="xs:language" use="required">
              <xs:annotation>
                <xs:documentation>ISO639 2-letter code</xs:documentation>
              </xs:annotation>
            </xs:attribute>
          </xs:extension>
        </xs:simpleContent>
      </xs:complexType>
    </xs:element>
  </xs:sequence>

```

```

        </xs:attribute>
      </xs:extension>
    </xs:simpleContent>
  </xs:complexType>
</xs:element>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
<xs:complexType name="ENTRY">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="entry_description" type="DESCRIPTION" minOccurs="0">
      <xs:annotation>
        <xs:documentation>should exist in EN</xs:documentation>
      </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:choice>
      <xs:element name="bit_description" minOccurs="0">
        <xs:annotation>
          <xs:documentation>for bit representations, should exist in EN</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
          <xs:sequence maxOccurs="unbounded">
            <xs:element name="specification">
              <xs:complexType>
                <xs:simpleContent>
                  <xs:extension base="xs:string">
                    <xs:attribute name="bit_number" use="required">
                      <xs:simpleType>
                        <xs:restriction base="xs:nonNegativeInteger">
                          <xs:maxInclusive value="32"/>
                        </xs:restriction>
                      </xs:simpleType>
                    </xs:attribute>
                    <xs:attribute name="type_of_or" type="TYPEOFOR" use="required"/>
                    <xs:attribute name="country_code" type="xs:language" use="required"/>
                  </xs:extension>
                </xs:simpleContent>
              </xs:complexType>
            </xs:element>
            <xs:element name="annotation" minOccurs="0">
              <xs:complexType>
                <xs:simpleContent>
                  <xs:extension base="xs:string">
                    <xs:attribute name="bit_number" use="required">
                      <xs:simpleType>
                        <xs:restriction base="xs:nonNegativeInteger">
                          <xs:maxInclusive value="32"/>
                        </xs:restriction>
                      </xs:simpleType>
                    </xs:attribute>
                    <xs:attribute name="type_of_or" type="TYPEOFOR" use="optional"/>
                    <xs:attribute name="country_code" type="xs:language" use="required">
                      <xs:annotation>
                        <xs:documentation>ISO639 2-letter code</xs:documentation>
                      </xs:annotation>
                    </xs:attribute>
                  </xs:extension>
                </xs:simpleContent>
              </xs:complexType>
            </xs:element>
          </xs:sequence>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
    </xs:choice>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
<xs:element name="integer_description" minOccurs="0">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>for meaning of special values, should exist in EN</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence maxOccurs="unbounded">
      <xs:element name="specification">
        <xs:complexType>
          <xs:simpleContent>
            <xs:extension base="xs:string">

```

```

        <xs:attribute name="integer_number" type="xs:integer" use="required"/>
        <xs:attribute name="country_code" type="xs:language" use="required">
          <xs:annotation>
            <xs:documentation>ISO639 2-letter code</xs:documentation>
          </xs:annotation>
        </xs:attribute>
      </xs:extension>
    </xs:simpleContent>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="annotation" minOccurs="0">
  <xs:complexType>
    <xs:simpleContent>
      <xs:extension base="xs:string">
        <xs:attribute name="integer_number" type="xs:integer" use="required"/>
        <xs:attribute name="country_code" type="xs:language" use="required">
          <xs:annotation>
            <xs:documentation>ISO639 2-letter code</xs:documentation>
          </xs:annotation>
        </xs:attribute>
      </xs:extension>
    </xs:simpleContent>
  </xs:complexType>
</xs:element>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="string_description" minOccurs="0">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>for meaning of strings, should exist in EN</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence maxOccurs="unbounded">
      <xs:element name="specification">
        <xs:complexType>
          <xs:simpleContent>
            <xs:extension base="xs:string">
              <xs:attribute name="string_char" type="xs:string" use="required"/>
              <xs:attribute name="country_code" type="xs:language" use="required">
                <xs:annotation>
                  <xs:documentation>ISO639 2-letter code</xs:documentation>
                </xs:annotation>
              </xs:attribute>
            </xs:extension>
          </xs:simpleContent>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
      <xs:element name="annotation" minOccurs="0">
        <xs:complexType>
          <xs:simpleContent>
            <xs:extension base="xs:string">
              <xs:attribute name="string_char" type="xs:string" use="required"/>
              <xs:attribute name="country_code" type="xs:language" use="required">
                <xs:annotation>
                  <xs:documentation>ISO639 2-letter code</xs:documentation>
                </xs:annotation>
              </xs:attribute>
            </xs:extension>
          </xs:simpleContent>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
</xs:choice>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:schema>

```

Anhang E

Gerätebeschreibungsdatei einer Naßklebe-Etikettiermaschine [163]

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<pda xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://www.wzw.tum.de/lvt/WS_200503.xsd " src="..\AbfuellLabel\ETIMABSP">
  <port_information max_connections="1">
    <port_number>50000</port_number>
  </port_information>
  <commands max_requests="100">
    <command>NOOP</command>
    <command>READ_SVALUE</command>
    <command>WRITE_SVALUE</command>
    <command>READ_LIST</command>
    <command>READ_CONFIG</command>
  </commands>
  <!-- Liste der Test-Tags für die Kommunikation -->
  <list list_number="60001">
    <list_description>
      <specification country_code="EN">List of all Test-Tags</specification>
    </list_description>
    <tag_number>00011</tag_number>
    <tag_number>00012</tag_number>
    <tag_number>00013</tag_number>
    <tag_number>00014</tag_number>
    <tag_number>00015</tag_number>
    <tag_number>00016</tag_number>
    <tag_number>00017</tag_number>
    <tag_number>00018</tag_number>
    <tag_number>00019</tag_number>
    <tag_number>00020</tag_number>
    <tag_number>00021</tag_number>
    <tag_number>00022</tag_number>
    <tag_number>00023</tag_number>
    <tag_number>00024</tag_number>
    <tag_number>00025</tag_number>
  </list>
  <!-- Standard-Datenpunkte nach Weihenstephan -->
  <entry tag_number="00000" tag_name="WS_Error" data_type="HEX32" rw_access="R">
    <entry_description>
      <specification country_code="EN">Error Tag for detecting communication failures</specification>
    </entry_description>
  </entry>
  <entry tag_number="00001" tag_name="WS_PDACONF_Length" data_type="UNSIGNED32" rw_access="RW">
    <entry_description>
      <specification country_code="EN">Lenght of PDACONF.XML in Bytes</specification>
    </entry_description>
  </entry>
  <entry tag_number="00011" tag_name="WS_Test_Unsigned32_1" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
    <entry_description>
      <specification country_code="EN">Optional Test Tag for Unsigned32, Value: 0</specification>
    </entry_description>
  </entry>
  <entry tag_number="00012" tag_name="WS_Test_Unsigned32_2" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
    <entry_description>
      <specification country_code="EN">Optional Test Tag for Unsigned32, Value: 4294967295</specification>
    </entry_description>
  </entry>
  <entry tag_number="00013" tag_name="WS_Test_Unsigned32_3" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
    <entry_description>
      <specification country_code="EN">Test Tag for Unsigned32, Value: 1234561890</specification>
    </entry_description>
  </entry>
  <entry tag_number="00014" tag_name="WS_Test_Signed32_1" data_type="SIGNED32" rw_access="R">
    <entry_description>
      <specification country_code="EN">Optional Test Tag for Signed32, Value: -2147483648</specification>
    </entry_description>
  </entry>
  <entry tag_number="00015" tag_name="WS_Test_Signed32_2" data_type="SIGNED32" rw_access="R">
    <entry_description>

```

```

    <specification country_code="EN">Optional Test Tag for Signed32, Value: 2147483647</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00016" tag_name="WS_Test_Signed32_3" data_type="SIGNED32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Test Tag for Signed32, Value: 0</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00017" tag_name="WS_Test_Real_1" data_type="REAL" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Optional Test Tag for Real, Value: -3,40282347 * 10 ^38</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00018" tag_name="WS_Test_Real_2" data_type="REAL" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Optional Test Tag for Real, Value: 3,40282347 * 10^38</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00019" tag_name="WS_Test_Real_3" data_type="REAL" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Test Tag for Real, Value: 0</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00020" tag_name="WS_Test_Hex32_1" data_type="HEX32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Optional Test Tag for Hex32, Value: 00000000</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00021" tag_name="WS_Test_Hex32_2" data_type="HEX32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Optional Test Tag for Hex32, Value: FFFFFFFF</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00022" tag_name="WS_Test_Hex32_3" data_type="HEX32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Test Tag for Hex32, Value: 13579BDF</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00023" tag_name="WS_Test_String16_1" data_type="STRING16" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Optional Test Tag for String16, Value: T</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00024" tag_name="WS_Test_String16_2" data_type="STRING16" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Optional Test Tag for String16, Value: E</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00025" tag_name="WS_Test_String16_3" data_type="STRING16" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Test Tag for String16, Value: S</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00061" tag_name="WS_Set_Batch_ID_L" data_type="UNSIGNED32" rw_access="RW">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Low Integer for Set of 64 Bit Fillingbatch-ID</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00062" tag_name="WS_Set_Batch_ID_H" data_type="UNSIGNED32" rw_access="RW">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">High Integer for Set of 64 Bit Fillingbatch-ID</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00063" tag_name="WS_Cur_Batch_ID_L" data_type="UNSIGNED32" rw_access="RW">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Low Integer for 64 Bit Current Fillingbatch-ID</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00064" tag_name="WS_Cur_Batch_ID_H" data_type="UNSIGNED32" rw_access="RW">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">High Integer for 64 Bit Current Fillingbatch-ID </specification>
  </entry_description>
</entry>

```

```

</entry>
<entry tag_number="00100" tag_name="WS_Cur_Mode" data_type="HEX32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">XOR linked Bits for detecting current Machine State</specification>
  </entry_description>
  <bit_description>
    <specification bit_number="0" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Off</specification>
    <specification bit_number="1" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Manual</specification>
    <specification bit_number="2" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Semi-automatic</specification>
    <specification bit_number="3" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Automatic</specification>
  </bit_description>
</entry>
<entry tag_number="00200" tag_name="WS_Cur_Prog" data_type="HEX32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">XOR linked Bits for detecting current Program</specification>
  </entry_description>
  <bit_description>
    <specification bit_number="0" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Production</specification>
    <specification bit_number="1" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Start Up</specification>
    <specification bit_number="2" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Run Down</specification>
    <specification bit_number="3" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Clean</specification>
    <specification bit_number="4" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Changeover</specification>
    <specification bit_number="5" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Maintenance</specification>
    <specification bit_number="6" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Break</specification>
  </bit_description>
</entry>
<entry tag_number="00210" tag_name="WS_Prog_Step" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Integernumber for the current Program Step</specification>
  </entry_description>
  <integer_description>
    <specification integer_number="1" country_code="EN">a defined Program Step</specification>
    <specification integer_number="2" country_code="EN">another defined Program Step</specification>
    <specification integer_number="3" country_code="EN">another defined Program Step</specification>
    <specification integer_number="4" country_code="EN">another defined Program Step</specification>
    <specification integer_number="5" country_code="EN">another defined Program Step</specification>
    <specification integer_number="6" country_code="EN">another defined Program Step</specification>
    <specification integer_number="7" country_code="EN">another defined Program Step</specification>
  </integer_description>
</entry>
<entry tag_number="00300" tag_name="WS_Cur_State" data_type="HEX32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">XOR linked Bits for detecting current Operating State</specification>
  </entry_description>
  <bit_description>
    <specification bit_number="0" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Stopped</specification>
    <specification bit_number="1" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Starting</specification>
    <specification bit_number="2" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Prepared</specification>
    <specification bit_number="3" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Lack</specification>
    <specification bit_number="4" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Tailback</specification>
    <specification bit_number="5" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Lack in Branch Line</specification>
    <specification bit_number="6" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Tailback in Brach
Line</specification>
    <specification bit_number="7" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Operating</specification>
    <specification bit_number="8" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Stopping</specification>
    <specification bit_number="9" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Aborting</specification>
    <specification bit_number="10" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Equipment Failure</specification>
    <specification bit_number="11" country_code="EN" type_of_or = "XOR">External Failure</specification>
    <specification bit_number="12" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Emergency Stop</specification>
    <specification bit_number="13" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Holding</specification>
    <specification bit_number="14" country_code="EN" type_of_or = "XOR">Held</specification>
  </bit_description>
</entry>
<entry tag_number="00401" tag_name="WS_Cur_Mach_Spd" data_type="REAL" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Current Machine Speed in primary packages per minute</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00402" tag_name="WS_Set_Mach_Spd" data_type="REAL" rw_access="RW">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">The set Machine Speed in primary packages per minute</specification>
  </entry_description>

```

```

</entry>
<entry tag_number="00403" tag_name="WS_Mach_Design_Spd" data_type="REAL" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">The maximum design speed of the machine in primary packages per
minute (not the maximum speed specified by the manufacturer, but rather the speed the machine is designed to run in
its installed environment).</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00501" tag_name="WS_Mach_Cycle" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Number of complete Machine Cycles (with or without prod-
uct)</specification>
  </entry_description>
</entry>
<entry tag_number="00601" tag_name="WS_Mat_Ready" data_type="HEX32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Binary coded information if the materials for the process are ready (1
equaling ready, 0 equaling not ready).</specification>
  </entry_description>
  <bit_description>
    <specification bit_number="0" country_code="EN" type_of_or = "OR">Glue</specification>
    <specification bit_number="1" country_code="EN" type_of_or = "OR">Labels</specification>
  </bit_description>
</entry>
<entry tag_number="00602" tag_name="WS_Mat_Low" data_type="HEX32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Binary coded information if the material is running low (1 equaling okay, 0
equaling running low).</specification>
  </entry_description>
  <bit_description>
    <specification bit_number="0" country_code="EN" type_of_or = "OR">Glue</specification>
    <specification bit_number="1" country_code="EN" type_of_or = "OR">Labels</specification>
  </bit_description>
</entry>
<!-- Empfohlene Datenpunkte für Etikettiermaschinen -->
<!-- Notice of Failure -->
<entry tag_number="10000" tag_name="WS_Not_Of_Fail_Code" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Codes for Notices of Failure</specification>
  </entry_description>
  <integer_description>
    <specification integer_number="1" country_code="EN">Failure because of ...</specification>
    <specification integer_number="2" country_code="EN">Failure because of ...</specification>
  </integer_description>
</entry>
<!-- Pointer -->
<entry tag_number="20000" tag_name="WS_Pointer_Code" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Codes for Pointers</specification>
  </entry_description>
  <integer_description>
    <specification integer_number="1" country_code="EN">Pointer because of ...</specification>
    <specification integer_number="2" country_code="EN">Pointer because of ...</specification>
  </integer_description>
</entry>
<!-- Parameters -->
<entry tag_number="30031" tag_name="WS_Date_Coding" data_type="UNSIGNED32" rw_access="RW">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Date Coding as Integer Number in format ddmmyyyy</specification>
  </entry_description>
</entry>
<!-- Measured Values -->
<entry tag_number="40141" tag_name="WS_Temp_Glue" data_type="REAL" rw_access="R" min_incl="0"
max_incl="200">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Temperature of Glue in °Celsius</specification>
  </entry_description>
</entry>
<!-- Counters -->
<entry tag_number="50005" tag_name="WS_Total_Bottles" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Number of total Bottles processed</specification>

```

```
</entry_description>
</entry>
<entry tag_number="50010" tag_name="WS_Label" data_type="UNSIGNED32" rw_access="R">
  <entry_description>
    <specification country_code="EN">Number of total Labels processed</specification>
  </entry_description>
</entry>
</pda>
```

Anhang F

Beispiel für die Einordnung von Datenpunkten in der Standard-Ontologie für Lebensmittelverpackungsanlagen [159]

Zuordnung der allgemeinen Datenpunkte auf der höchsten Ebene

Zuordnung der Datenpunkte für Hilfs- und Betriebsmittel auf der zweiten Ebene

Zuordnung der Datenpunkte für Etiketten und Maschinenzyklen auf der dritten Ebene

Zuordnung der Datenpunkte für die Leimtemperatur auf der untersten Ebene

Anhang G

Auflistung der verallgemeinerten Datenpunkte nach den Weihenstephaner Standards

Im Rahmen der Standarderweiterung mussten sowohl im Bereich der Parameter als auch der Zählwerte neue Datenpunkte definiert werden. Diese wurden unter den nachstehenden Tag-Nummern und Tag-Namen in die vorgesehenen Bereiche eingeordnet.

Neue Datenpunkte im Bereich Parameter

Name: Packungstyp (Package Type)
Tag-Nummer: 30100
Tag-Name: WS_Package_Type
Datenformat: Unsigned32
Lese-/Schreibzugriff: RW

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt informiert über den aktuellen Packungstyp. Die Integer-Zahlen, die für verschiedene Packungstypen stehen, sind in der Gerätebeschreibungsdatei zu dokumentieren.

Name: Verpackungstyp (Packaging Type)
Tag-Nummer: 30101
Tag-Name: WS_Packaging_Type
Datenformat: Unsigned32
Lese-/Schreibzugriff: RW

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt informiert über den aktuellen Verpackungstyp. Die Integer-Zahlen, die für verschiedene Verpackungstypen stehen, sind in der Gerätebeschreibungsdatei zu dokumentieren.

Name: Packguttyp (Packaged Good Type)
Tag-Nummer: 30102
Tag-Name: WS_Pack_Good_Type
Datenformat: Unsigned32
Lese-/Schreibzugriff: RW

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt informiert über den aktuellen Packguttyp. Die Integer-Zahlen, die für verschiedene Packguttypen stehen, sind in der Gerätebeschreibungsdatei zu dokumentieren.

Name: Packmitteltyp (Packaging Mean Type)
Tag-Nummer: 30103
Tag-Name: WS_Pack_Mean_Type
Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: RW

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt informiert über den aktuellen Packmitteltyp. Die Integer-Zahlen, die für verschiedene Packmitteltypen stehen, sind in der Gerätebeschreibungsdatei zu dokumentieren.

Name: Packhilfsmitteltyp (Auxiliary Packaging Mean Type)

Tag-Nummer: 30104

Tag-Name: WS_Aux_PackMean_Type

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: RW

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt informiert über den aktuellen Packhilfsmitteltyp. Die Integer-Zahlen, die für verschiedene Packhilfsmitteltypen stehen, sind in der Gerätebeschreibungsdatei zu dokumentieren.

Neue Datenpunkte im Bereich Zählwerte

Name: Packungen gesamt (Total Packages)

Tag-Nummer: 50220

Tag-Name: WS_Tot_Package

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl der verarbeiteten Packungen.

Name: Verpackungen gesamt (Total Packaging)

Tag-Nummer: 50221

Tag-Name: WS_Tot_Packaging

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl der verarbeiteten Verpackungen.

Name: Packgut gesamt (Total Packaged Good)

Tag-Nummer: 50222

Tag-Name: WS_Tot_Pack_Good

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl/Menge des verarbeiteten Packguts. Die Einheit ist in der Gerätebeschreibungsdatei anzugeben. Es wird empfohlen, SI-Einheiten zu verwenden.

Name: Packmittel gesamt (Total Packaging Mean)

Tag-Nummer: 50223

Tag-Name: WS_Tot_Pack_Mean

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl der verarbeiteten Packmittel.

Name: Packhilfsmittel gesamt (Total Auxiliary Packaging Mean)

Tag-Nummer: 50224

Tag-Name: WS_Tot_Aux_PackMean

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl/Menge des verarbeiteten Packhilfsmittels. Die Einheit ist in der Gerätebeschreibungsdatei anzugeben. Es wird empfohlen, SI-Einheiten zu verwenden.

Name: Gutpackungen gesamt (Good Packages)

Tag-Nummer: 50230

Tag-Name: WS_Good_Packages

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl der qualitätsgerechten Packungen.

Name: Gutverpackungen gesamt (Good Packaging)

Tag-Nummer: 50231

Tag-Name: WS_Good_Packaging

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl der qualitätsgerechten Verpackungen.

Name: Gutes Packgut gesamt (Good Packaged Good)

Tag-Nummer: 50232

Tag-Name: WS_Good_Pack_Good

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl des qualitätsgerechten Packguts.

Name: Schlechte Packungen gesamt (Bad Packages)

Tag-Nummer: 50240

Tag-Name: WS_Bad_Packages

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl der nicht qualitätsgerechten Packungen.

Name: Schlechte Verpackungen gesamt (Bad Packaging)

Tag-Nummer: 50241

Tag-Name: WS_Bad_Packaging

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl der nicht qualitätsgerechten Verpackungen.

Name: Schlechtes Packgut gesamt (Bad Packaged Good)

Tag-Nummer: 50242

Tag-Name: WS_Bad_Pack_Good

Datenformat: Unsigned32

Lese-/Schreibzugriff: R

Beschreibung:

Dieser Datenpunkt liefert die Anzahl des nicht qualitätsgerechten Packguts.

Anhang H

Abbilden der Betriebszustände der WS auf verallgemeinerte Stati:

$Holding \vee Held \vee Aborting \vee Equipment_Failure \vee External_Failure \vee Emergency_Stop$
 $= Failure$

$Stopped \vee Stopping \vee Starting = Stop$

$Lack \vee Lack_Branch_Line = G_Lack$

$Tailback \vee Tailback_Branch_Line = G_Tailback$

$Prepared \vee Stop = C_No_Op$

$Failure \vee C_No_Op = Own_Downtime$

$Own_Downtime \vee G_Lack \vee G_Tailback = Downtime$

$Operating \vee Downtime = true$

G_Lack entspricht General Lack

G_Tailback entspricht General Tailback

C_No_Op entspricht Controlled No Operation

Anhang I

Erweiterbare Standardtabellen der Value IDs und der Machine IDs:

type_id	Typ	Datentyp	Beschreibung
1	Q	real	Ausbringung der Maschine
2	state	int	Betriebszustand nach Weihenstephaner Standard 2005
3	program	int	Betriebsprogramm nach Weihenstephaner Standard 2005
4	counterin	int	Gebindezähler in die Maschine hinein
5	counter_branch_in	int	Gebindezähler in die Maschine hinein Nebenstrom
6	counterout	int	Gebindezähler aus der Maschine heraus Hauptstrom
7	counter_branch_out	int	Gebindezähler aus der Maschine heraus Nebenstrom
8	counter_lock_out	int	Gebindezähler aus der Maschine heraus Ausschleusung
9	vin	real	Geschwindigkeit in die Maschine hinein
10	vout	real	Geschwindigkeit aus der Maschine heraus
11	barrin	bool	Mechanische Barriere Maschineneingang gesetzt (=1) / nicht gesetzt (=0)
12	barrout	bool	Mechanische Barriere Maschinenausgang gesetzt (=1) / nicht gesetzt (=0)
13	buffer fillfactor	real	Prozentuale Angabe der Pufferbelegung

Mach_ID	Machine	Mach_ID	Machine
1001	Depalletizer	18001	Crate Transporter
2001	Crate-Inspector	19001	Pallet Transporter 1
3001	Crate Unpacker	19002	Pallet Transporter 2
4001	Descrewer	...	
5001	Unlabeling Machine	19212	Pallet Transporter 212
6001	Sniffer	20001	Pallet magazine unchecked
7001	Bottle Washer	21001	Pallet control
8001	Empty Bottle Inspector	22001	Pallet magazine checked
9001	Bottle Filler	23001	Pallet binder
10001	Labeling Machine	24001	Pallet labeling
11001	Crate Packer	25001	Fill Height Inspection
12001	Filled Crate Inspector	26001	Manual sorting
13001	Bottle Orientor		
14001	Palletizer		
15001	Crate Washer		
16001	Crate magazine		
17001	Bottle Transporter		

Anhang J

Auszug aus der Datenbankschnittstelle für die Diagnose:

<i>mach_id</i>	<i>type_id</i>	<i>start_time</i>	<i>end_time</i>	<i>int_value</i>	<i>real_value</i>	<i>bool_value</i>
17002	5	1182240004	1182240007	NULL	7.8000002	NULL
17003	6	1182240004	1182240304	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240004	1182240024	NULL	30.6	NULL
17005	6	1182240005	1182240305	NULL	0.0	NULL
17002	5	1182240007	1182240307	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240024	1182240026	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240026	1182240046	NULL	30.700001	NULL
17041	6	1182240046	1182240056	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240056	1182240074	NULL	30.6	NULL
7001	1	1182240069	1182240969	NULL	31000.0	NULL
17041	6	1182240074	1182240077	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240077	1182240097	NULL	30.700001	NULL
17041	6	1182240097	1182240105	NULL	0.0	NULL
17003	5	1182240103	1182240403	NULL	30.4	NULL
17211	6	1182240104	1182240404	NULL	50.400002	NULL
17041	6	1182240105	1182240125	NULL	30.700001	NULL
17002	6	1182240118	1182240418	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240125	1182240128	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240128	1182240148	NULL	30.700001	NULL
17041	6	1182240148	1182240158	NULL	0.0	NULL
16001	2	1182240148	1182240188	128	NULL	NULL
14001	3	1182240150	1182240210	NULL	8.0	NULL
13001	2	1182240150	1182240165	256	NULL	NULL
17041	6	1182240158	1182240176	NULL	30.6	NULL
17006	5	1182240163	1182240463	NULL	48.400002	NULL
13001	2	1182240165	1182240214	1	NULL	NULL
17041	6	1182240176	1182240179	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240179	1182240199	NULL	30.700001	NULL
17001	5	1182240182	1182240482	NULL	42.700001	NULL
16001	2	1182240188	1182241708	8	NULL	NULL
14001	2	1182240190	1182240207	128	NULL	NULL
17041	6	1182240199	1182240206	NULL	0.0	NULL
17041	6	1182240206	1182240228	NULL	30.700001	NULL
14001	2	1182240207	1182241948	8	NULL	NULL
13001	2	1182240214	1182240229	128	NULL	NULL
17041	6	1182240228	1182240230	NULL	0.0	NULL
13001	2	1182240229	1182241911	8	NULL	NULL
17041	6	1182240230	1182240251	NULL	30.700001	NULL

Anhang L

Der Zähler *counter* gibt jederzeit wieder, wie viele Flaschen das Sensorsystem passiert haben, wodurch sich ein exakter Pufferfüllungsgrad berechnen lässt:

algorithm bulkcount (n)

{zaehlt Flaschen oder aehnliche Objekte mithilfe der Flanken der Sensoren n}

counter := 0

while TRUE **do**

for each $i \in n$ **do**

if Flanke_i := positiv

then setze positiven Impulsmerker $\Gamma_i^+ = 1$

elseif Flanke_i := negativ

then setze negativen Impulsmerker $\Gamma_i^- := 1$

fi

if $\Gamma_i^+ = 1$

then setze positiven Merker $M_i^+ = 1$

 aktiviere Signalhaltezeit t_i

fi

if $\Gamma_i^- = 1 \wedge t_i = \text{aktiv}$

then setze positiven Merker zurück $M_i^+ := 0$

elseif $\Gamma_i^- = 1 \wedge t_i = \neg\text{aktiv}$

then setze negativen Merker $M_i^- := 1$

fi

if $M_i^+ = 1 \wedge M_i^- = 1$

if $\neg(M_{i+1}^+ = 1 \vee M_{i+1}^- = 1 \vee M_{i-1}^+ = 1 \vee M_{i-1}^- := 1)$

then Hochzaehlen counter := counter +1

 Ruecksetzen der Merker $M_i^+, M_i^- := 0$

fi

if $(M_{i+1}^+ = 1 \wedge M_{i+1}^- := 1) \wedge \neg(M_{i+2}^+ = 1 \vee M_{i+2}^- := 1)$

$\vee (M_{i-1}^+ = 1 \wedge M_{i-1}^- = 1) \wedge \neg(M_{i-2}^+ = 1 \vee M_{i-2}^- := 1)$

then Hochzaehlen counter := counter +1

 Ruecksetzen der $M_i^+, M_i^- := 0$, sowie aller beteiligten $M_{i+/-n}^{+/-} := 0$

fi

if $(M_{i+1}^+ \text{ bis } i+n = 1 \wedge M_{i+1}^- \text{ bis } i+n = 1) \wedge \neg(M_{i+(n+1)}^+ = 1 \vee M_{i+(n+1)}^- := 1)$

$\vee (M_{i-1}^+ \text{ bis } i-n = 1 \wedge M_{i-1}^- \text{ bis } i-n = 1) \wedge \neg(M_{i-(n-1)}^+ = 1 \vee M_{i-(n-1)}^- := 1)$

then Hochzaehlen counter := counter +1

 Ruecksetzen der $M_i^+, M_i^- := 0$, sowie aller beteiligten $M_{i+/-n}^{+/-} := 0$

fi

fi

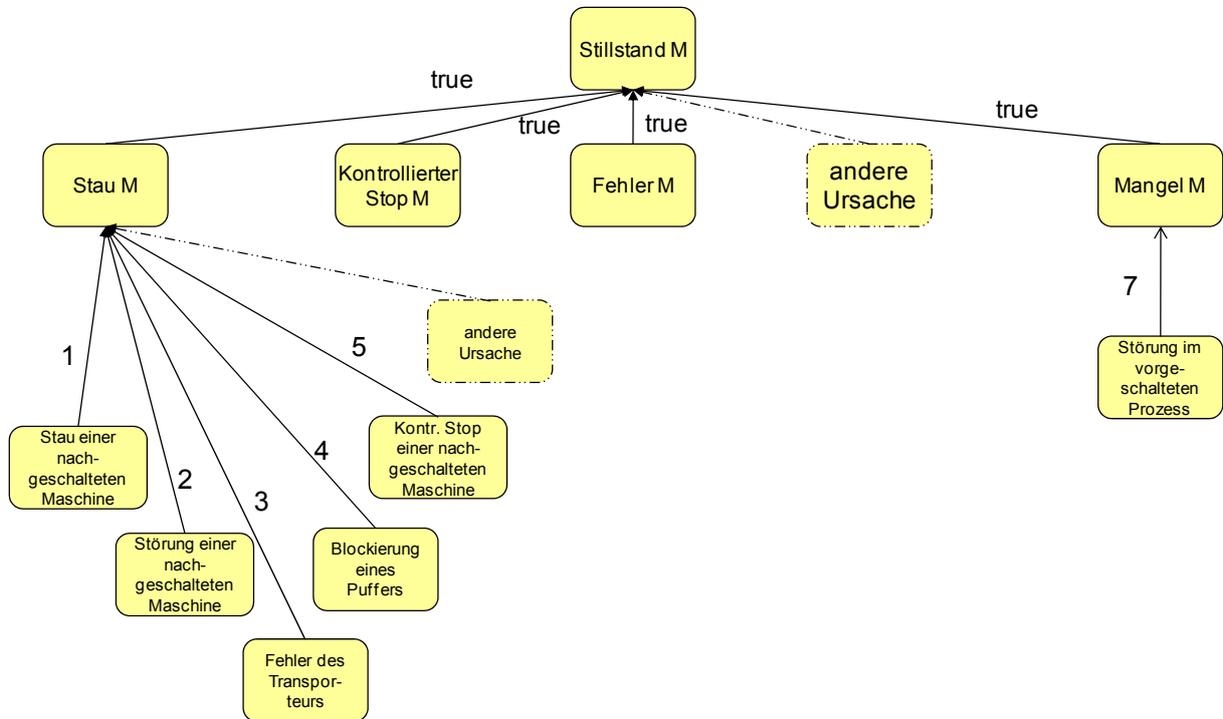
od

od

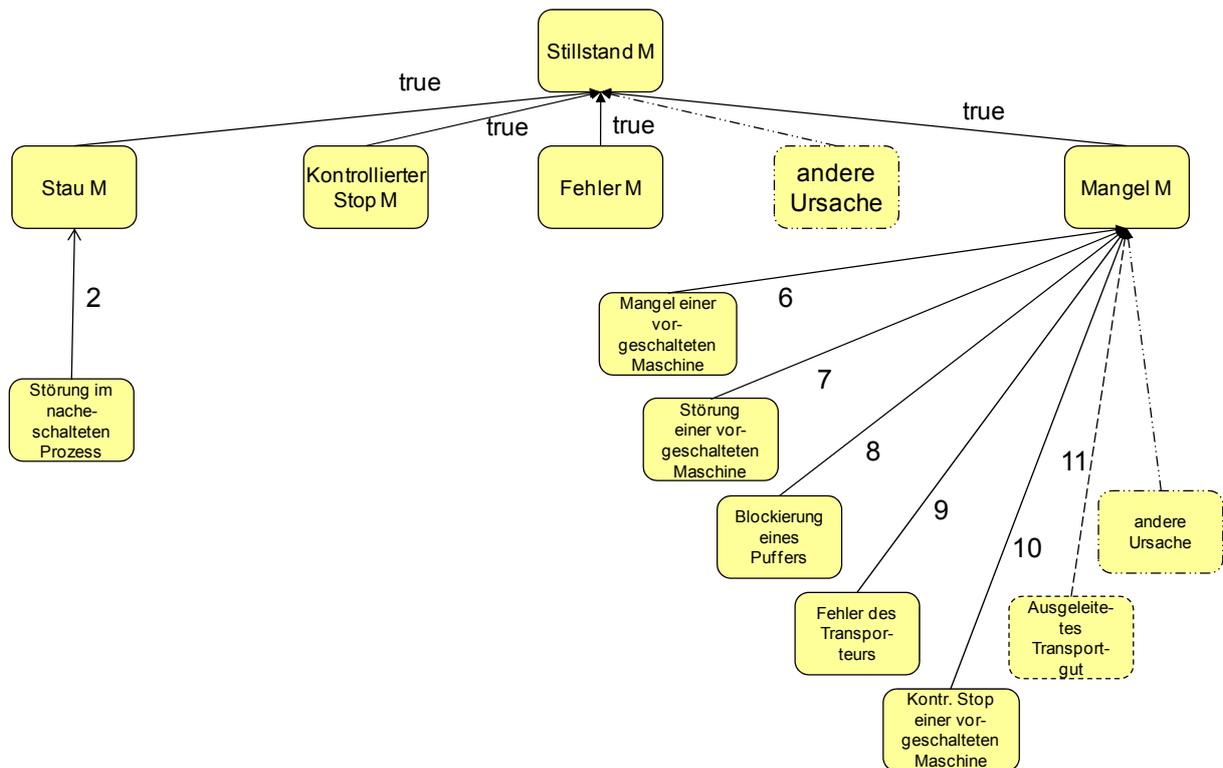
Anhang M

Graphen für die Regelbasis

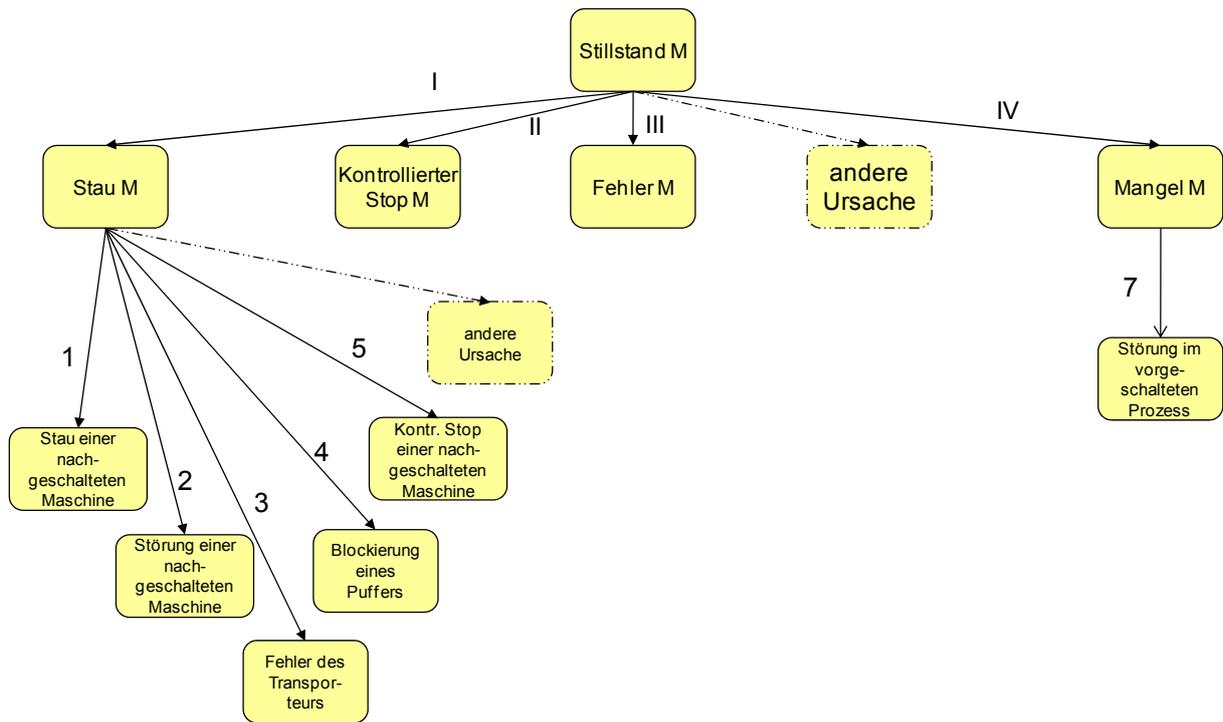
Baum für die erste Maschine



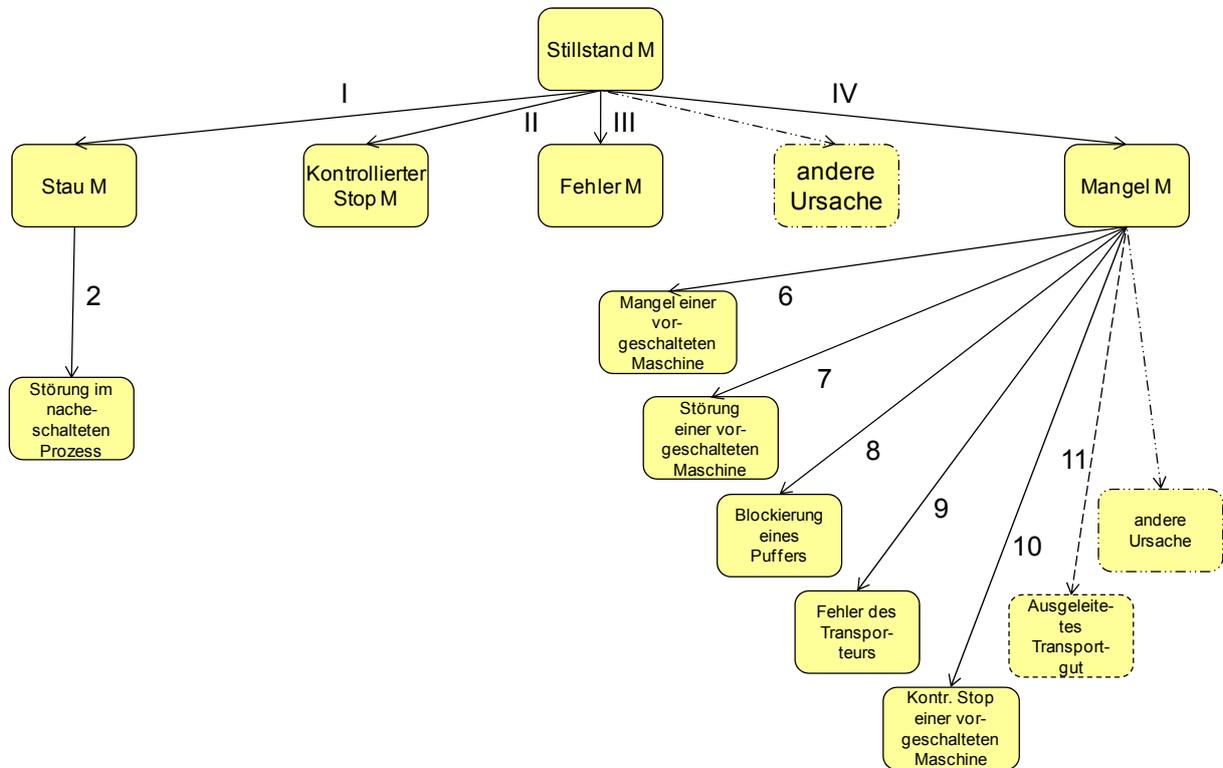
Baum für die letzte Maschine



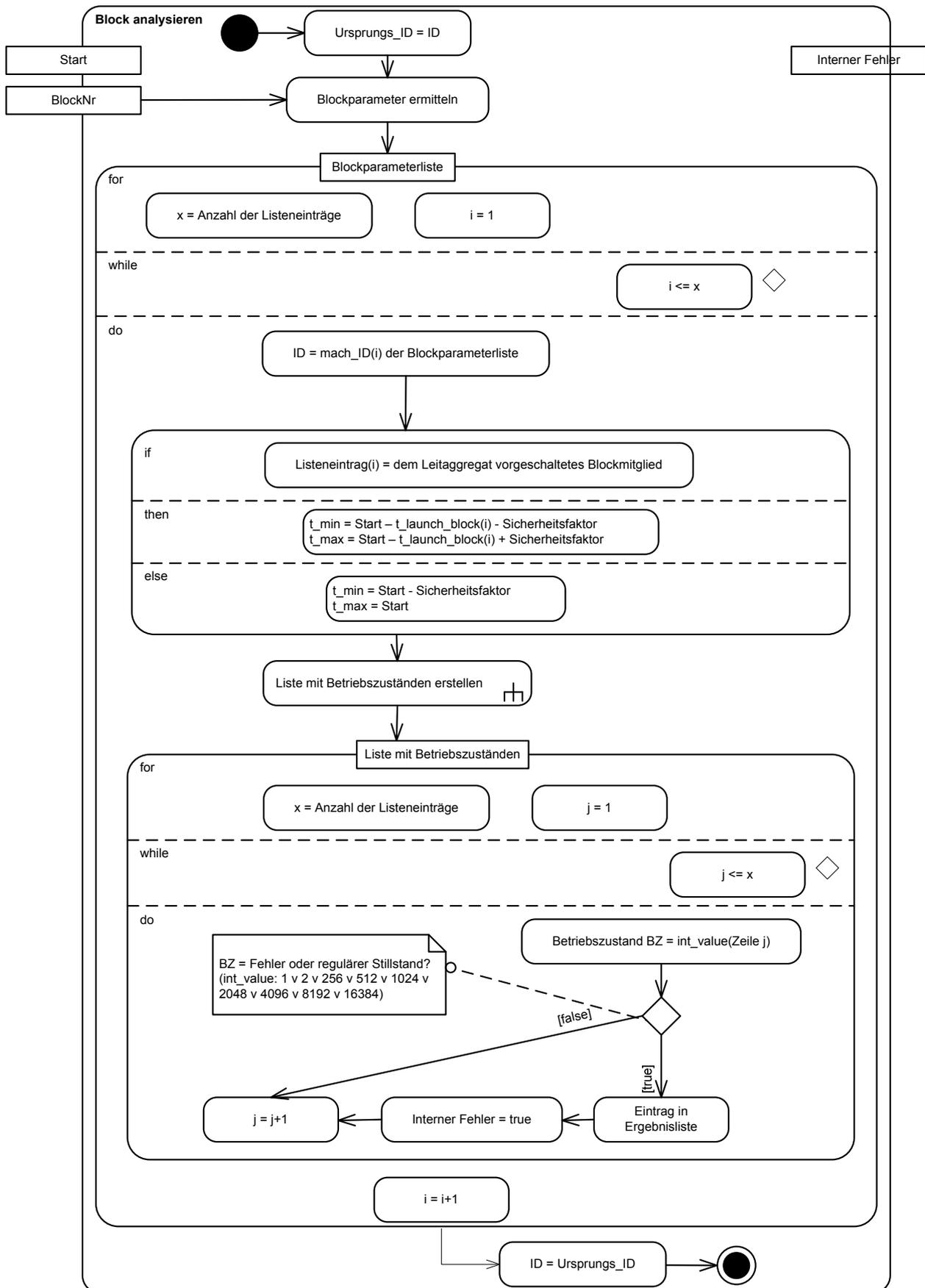
Ursachenbaum für die erste Maschine

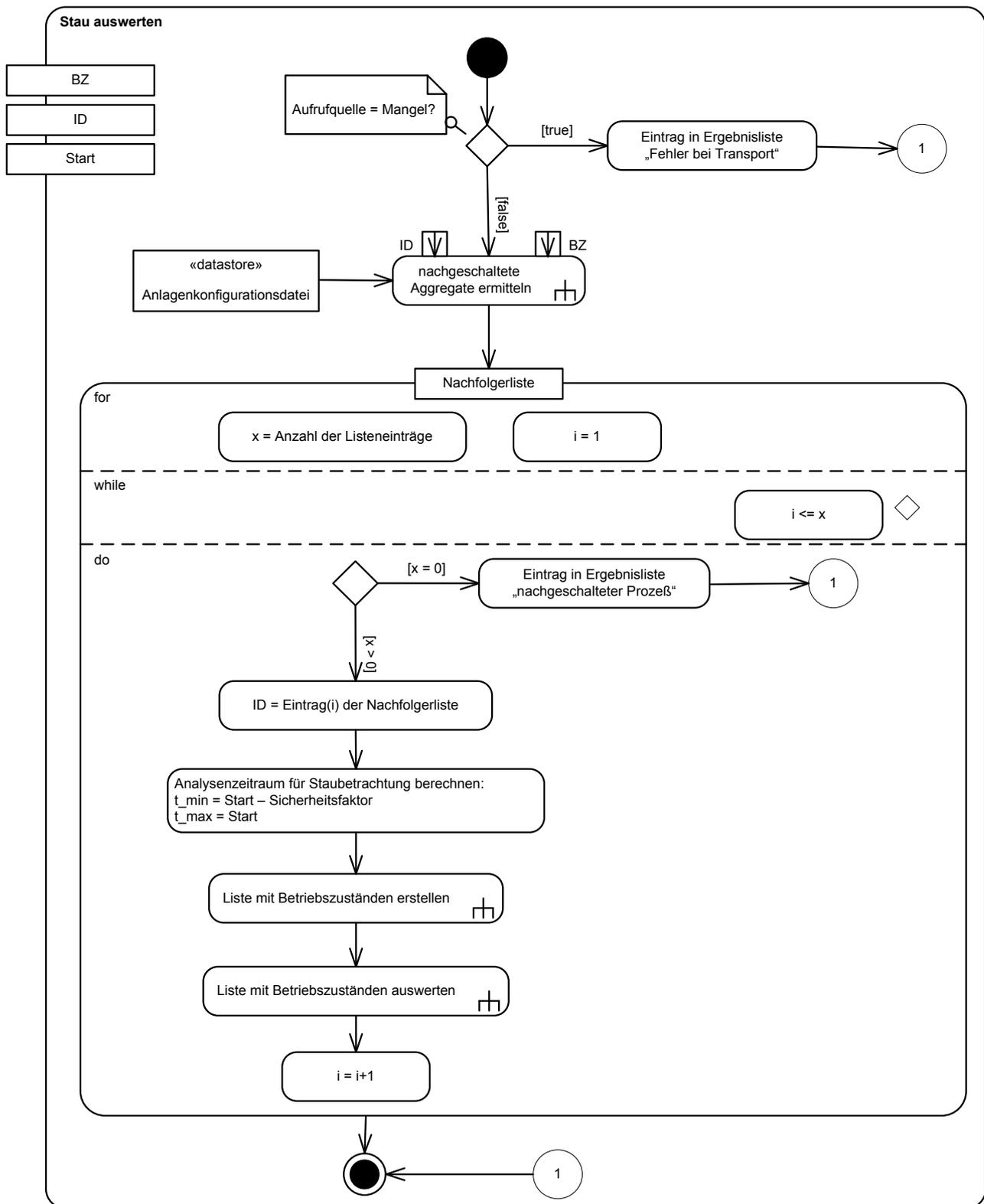


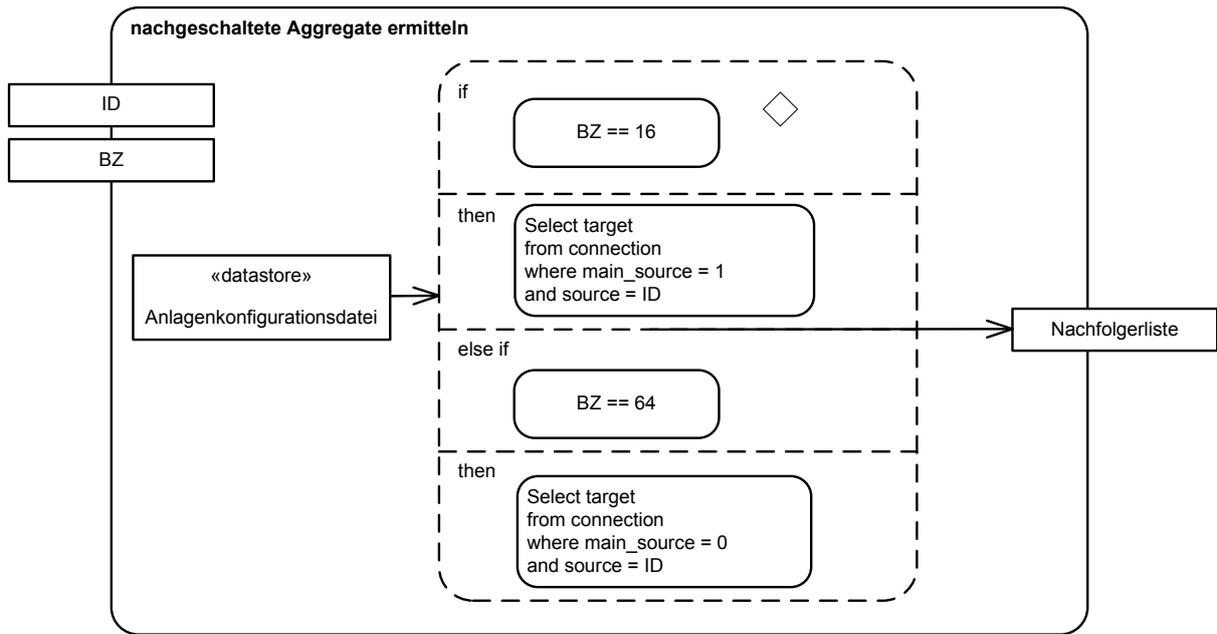
Ursachenbaum für die letzte Maschine



Anhang N

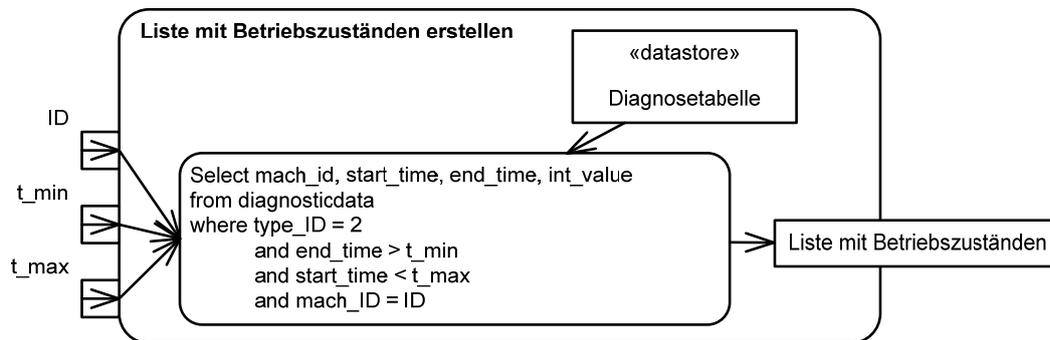
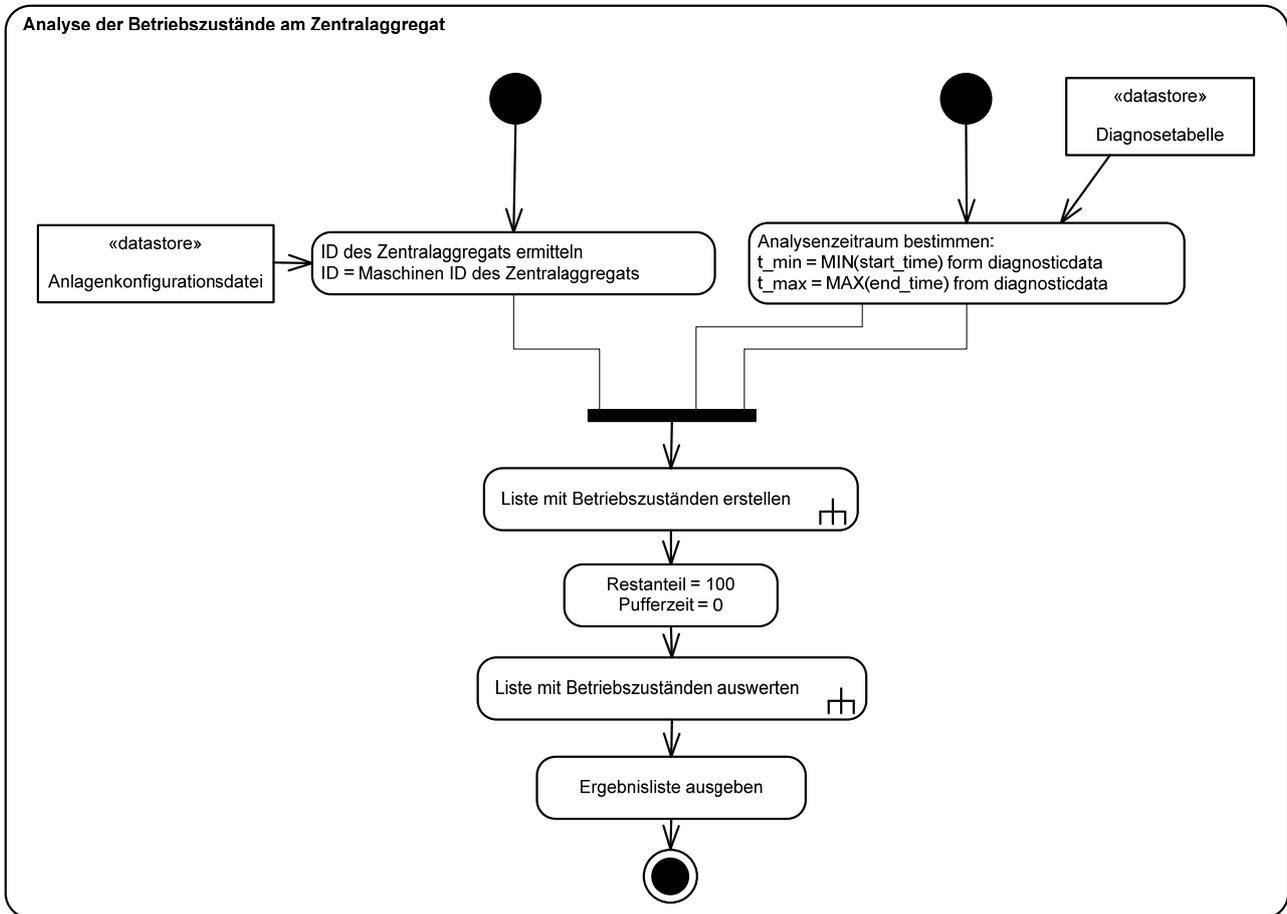


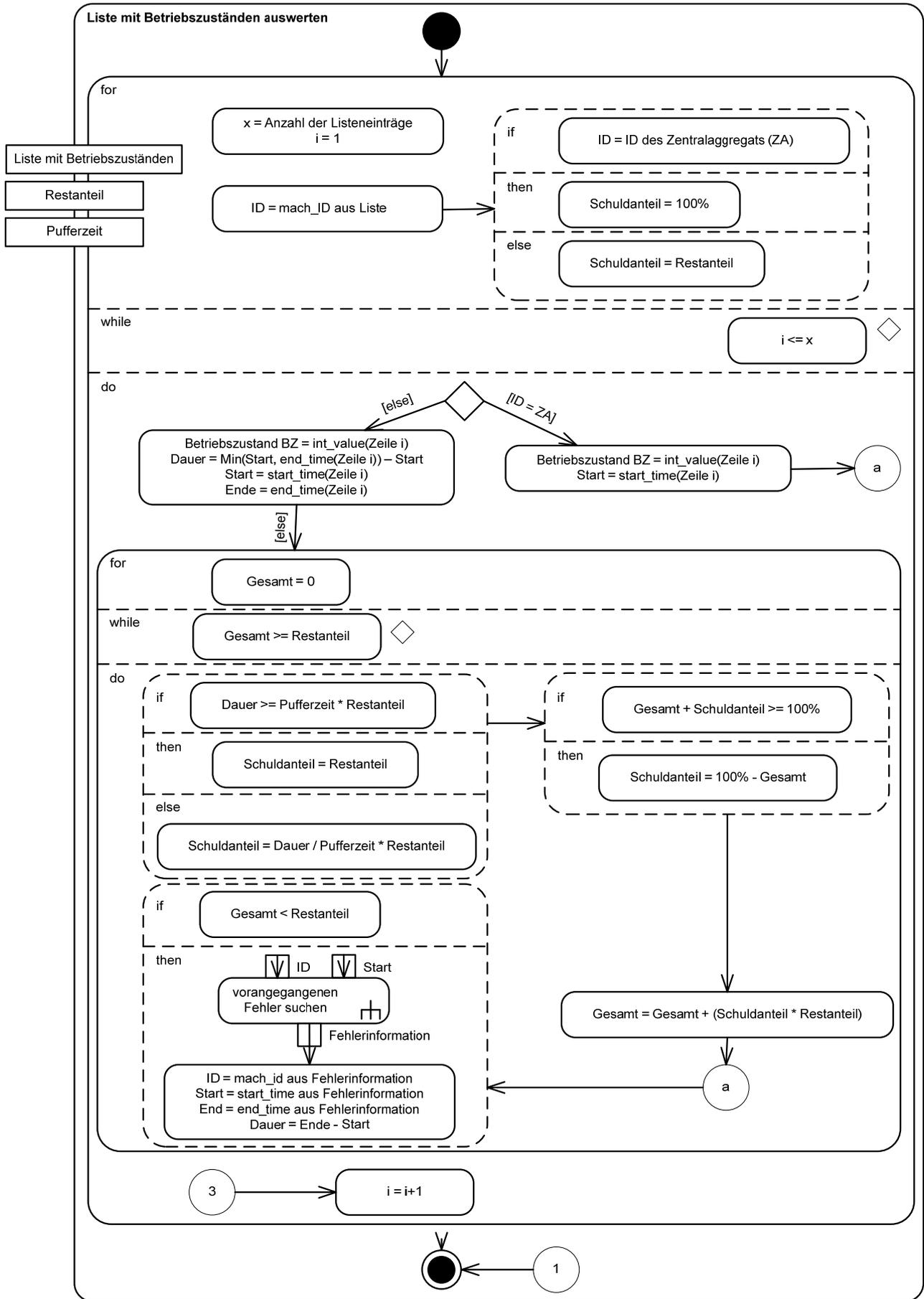


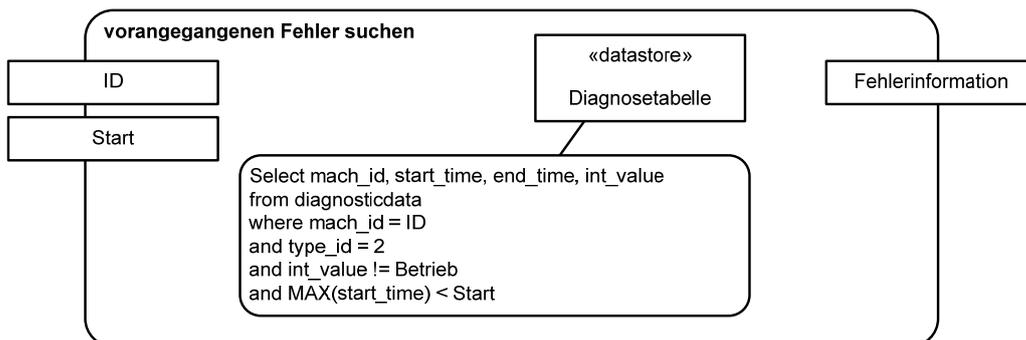
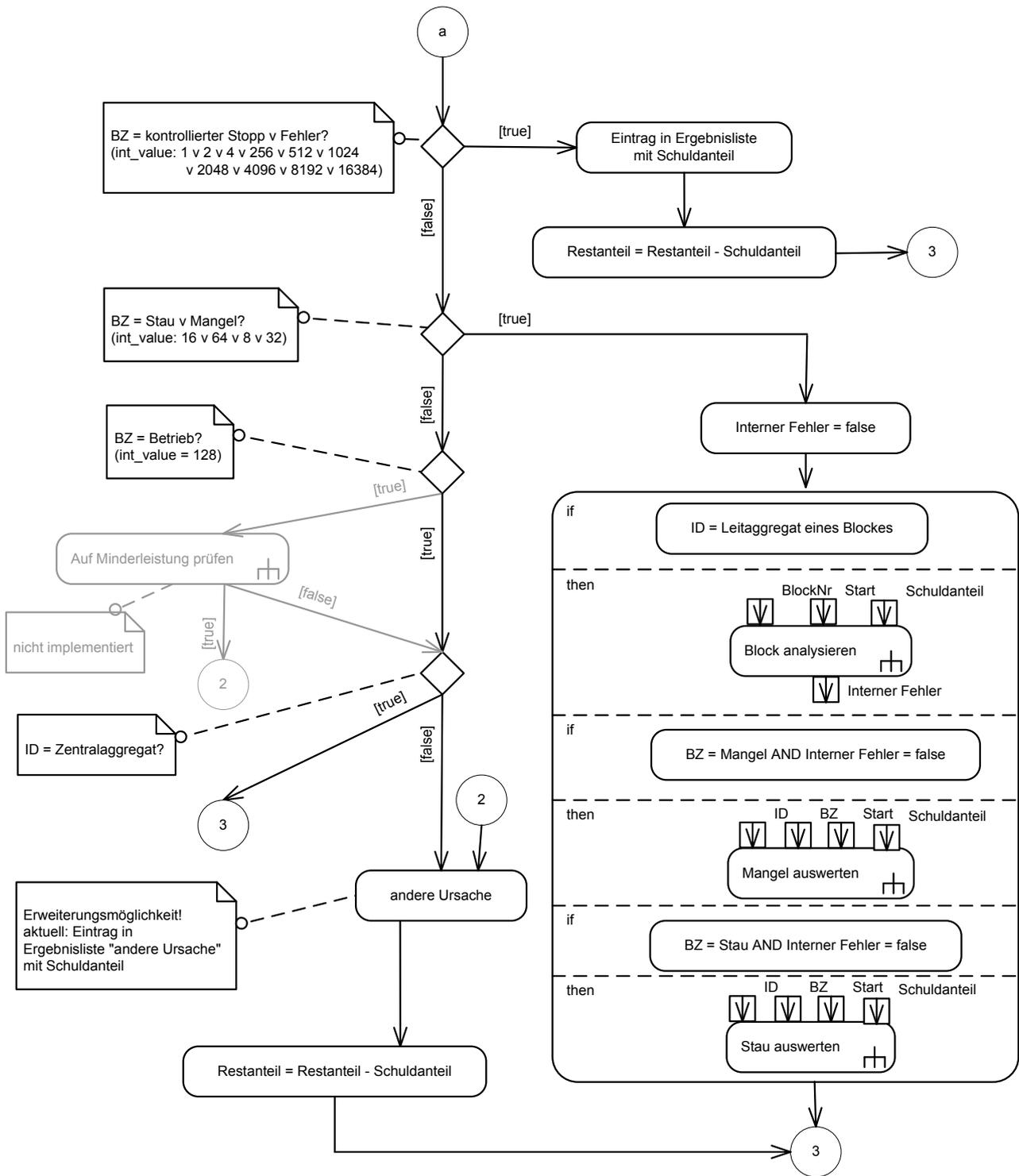


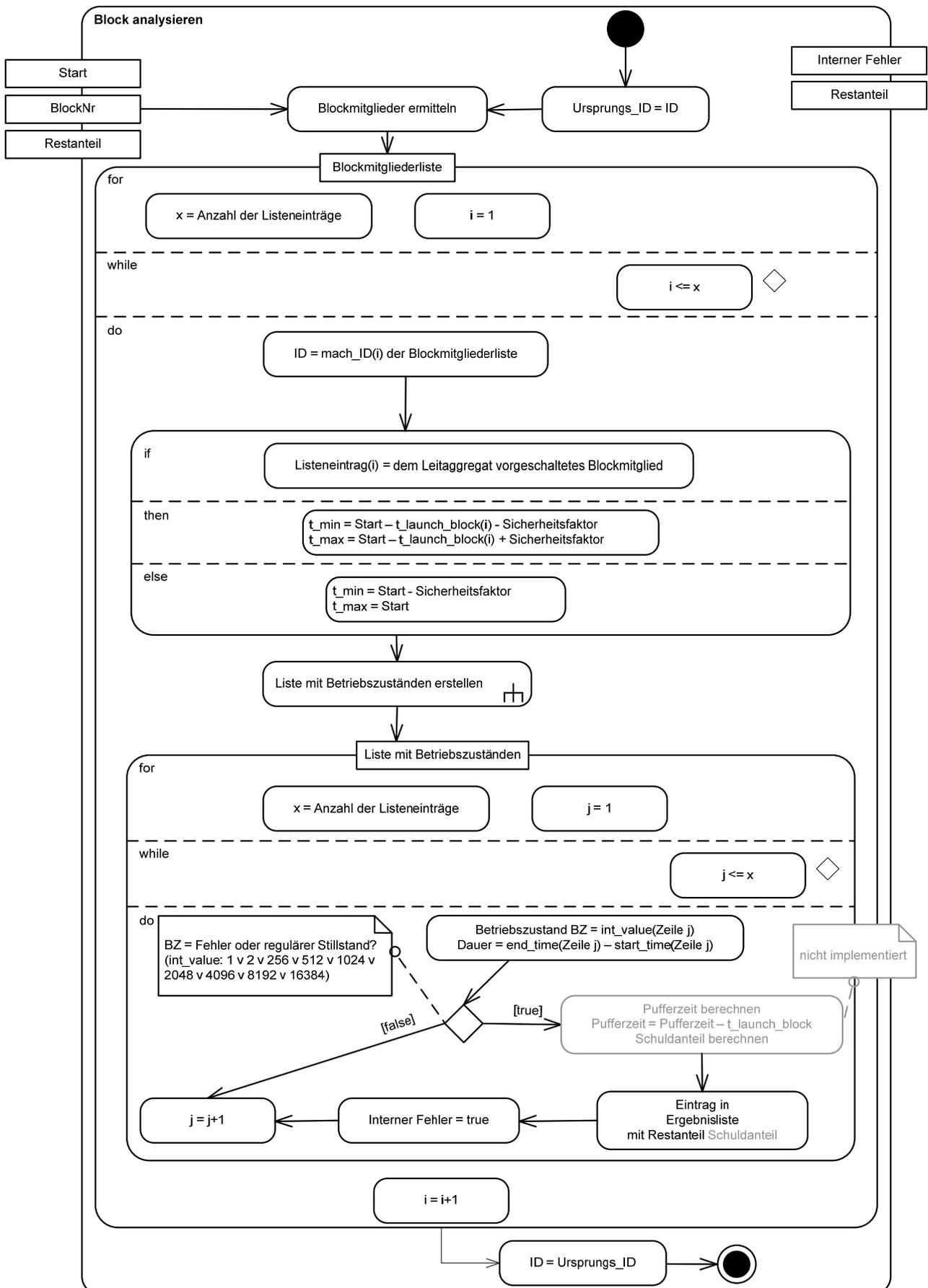
Anhang 0

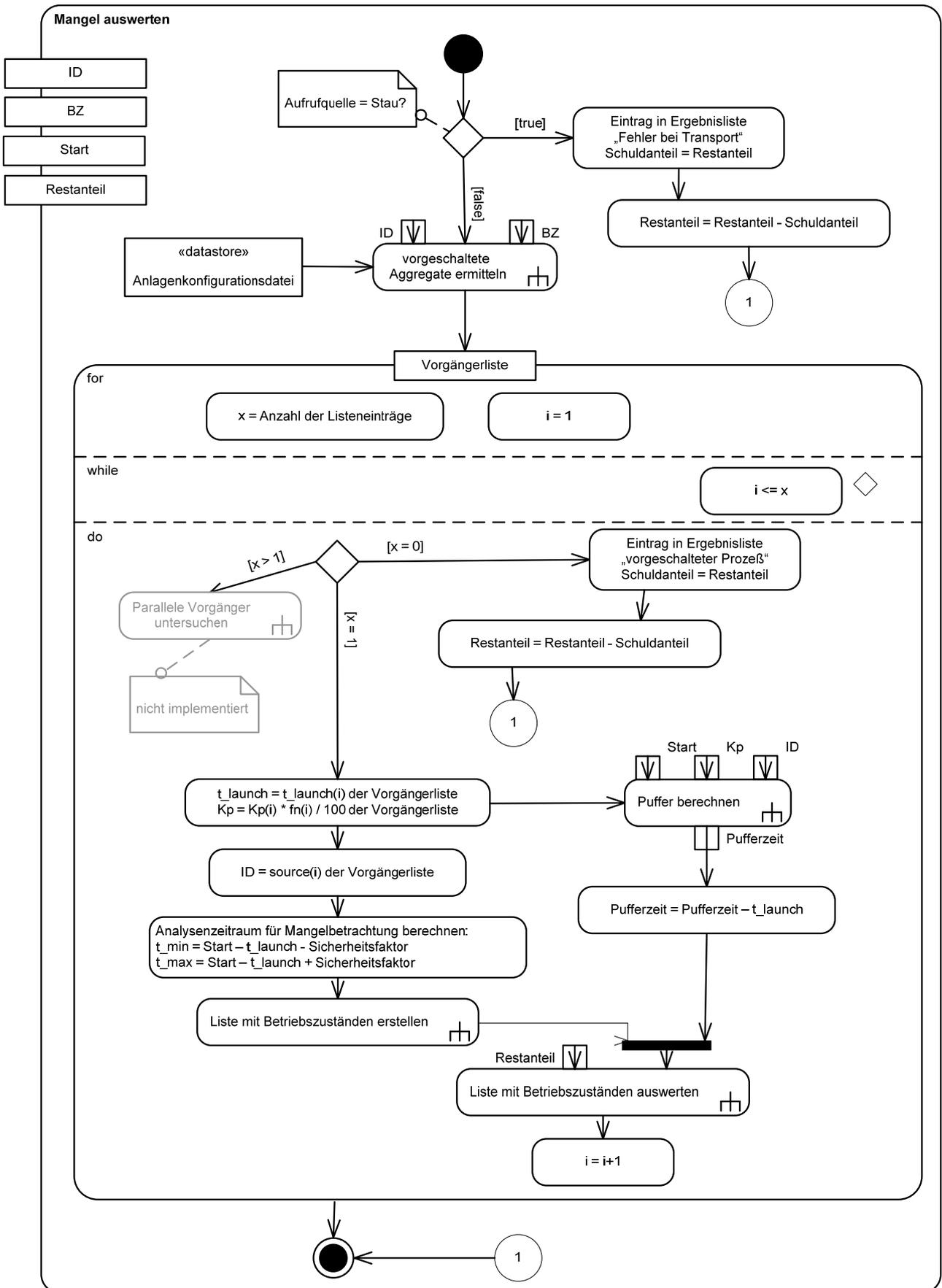
Algorithmus zur anteiligen Verursacherberechnung (vollständige Darstellung)

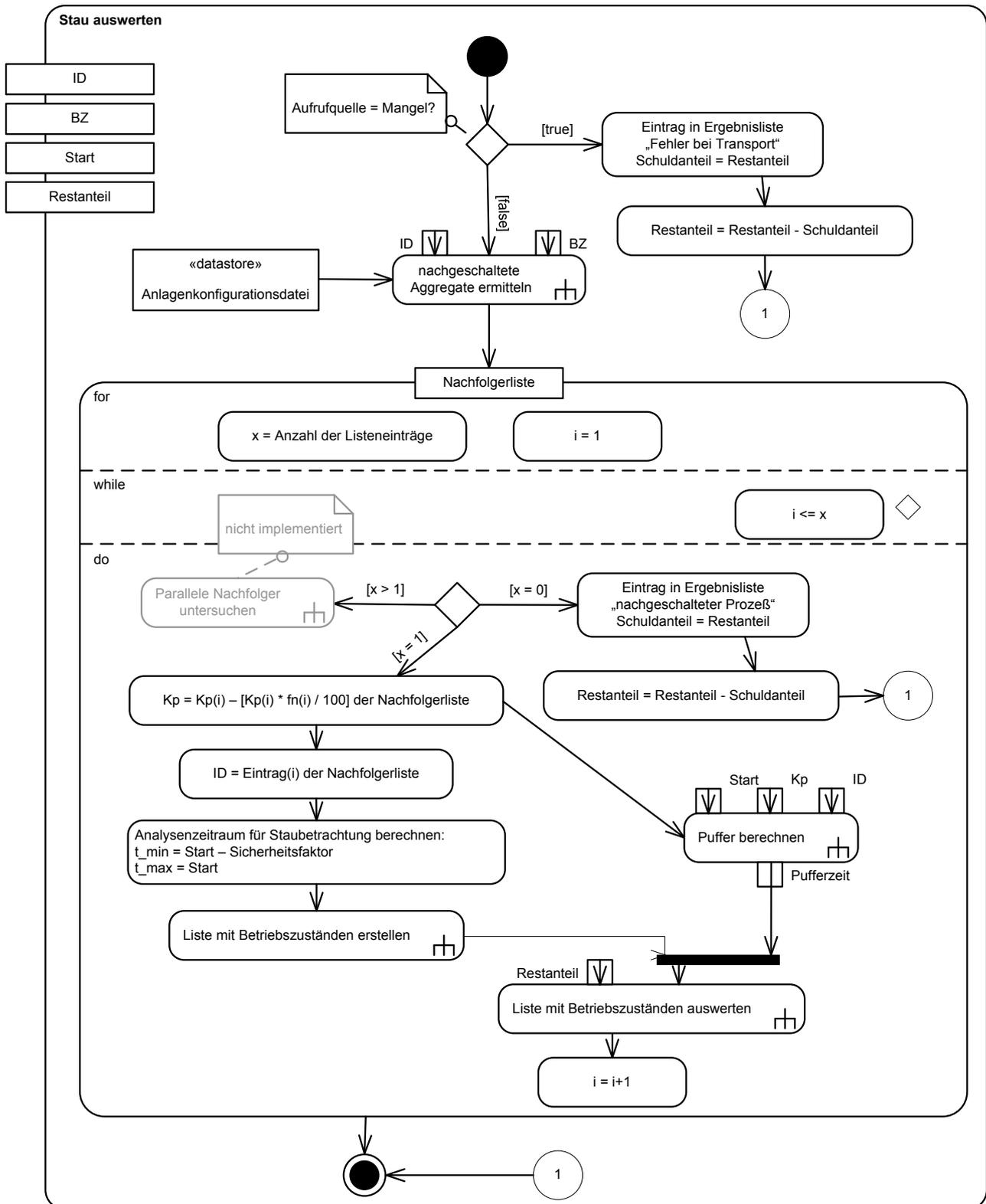


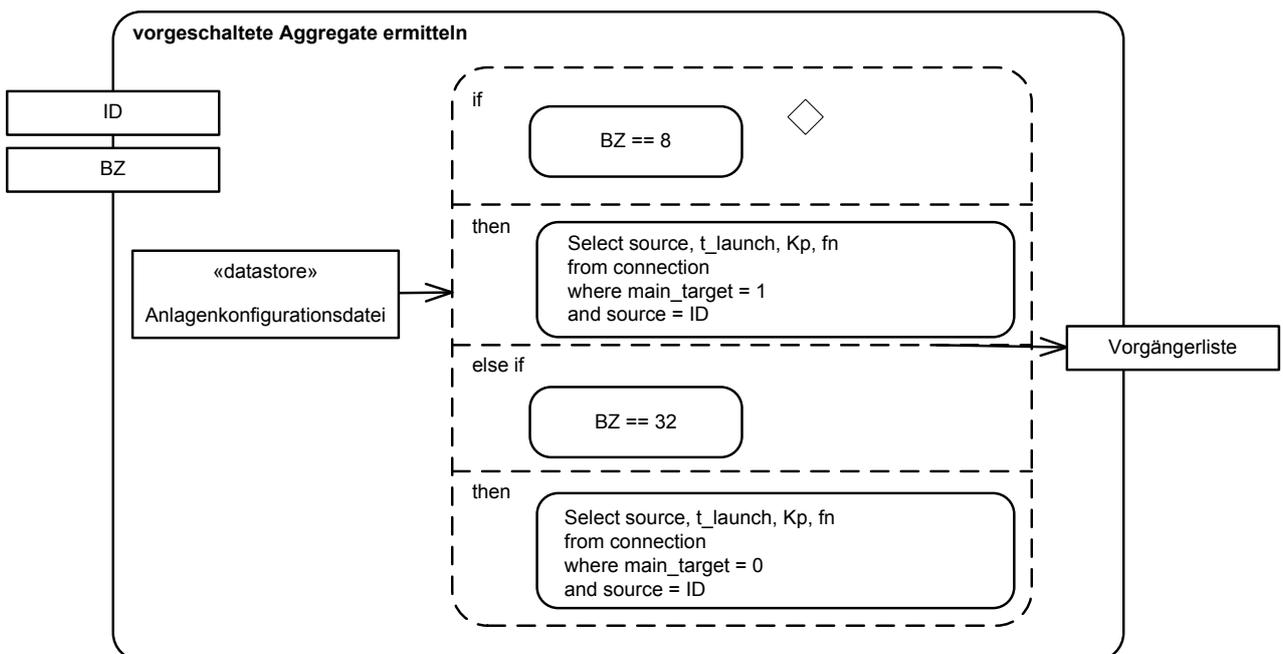
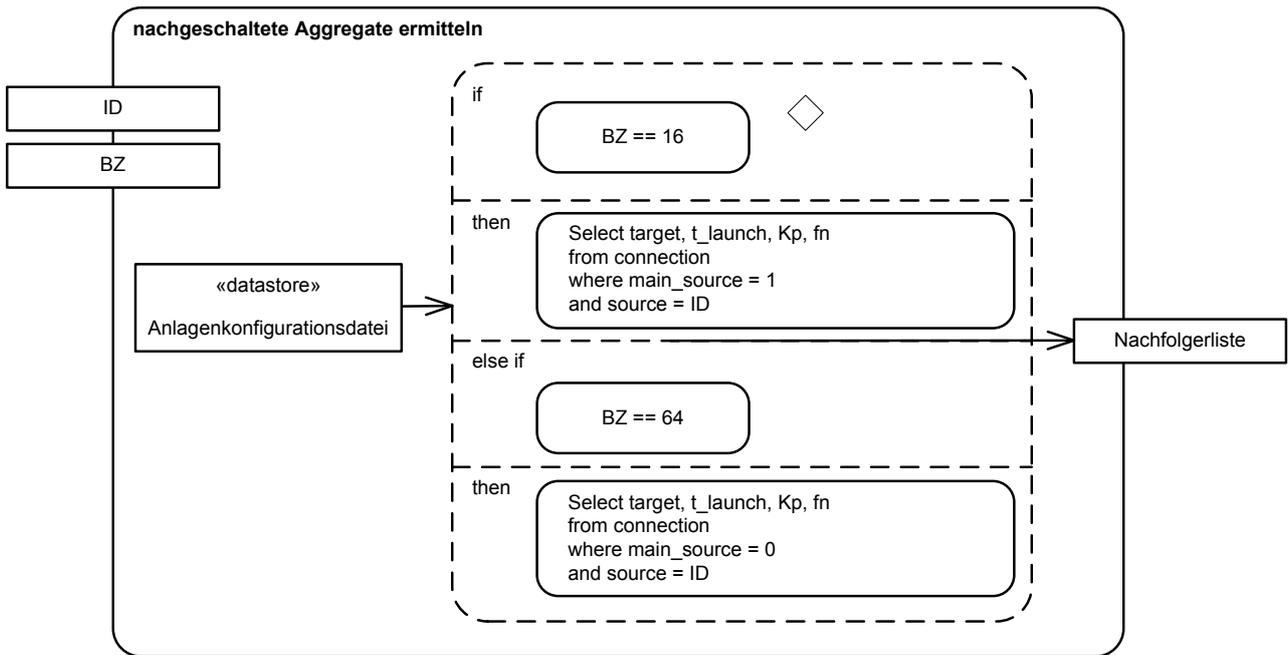


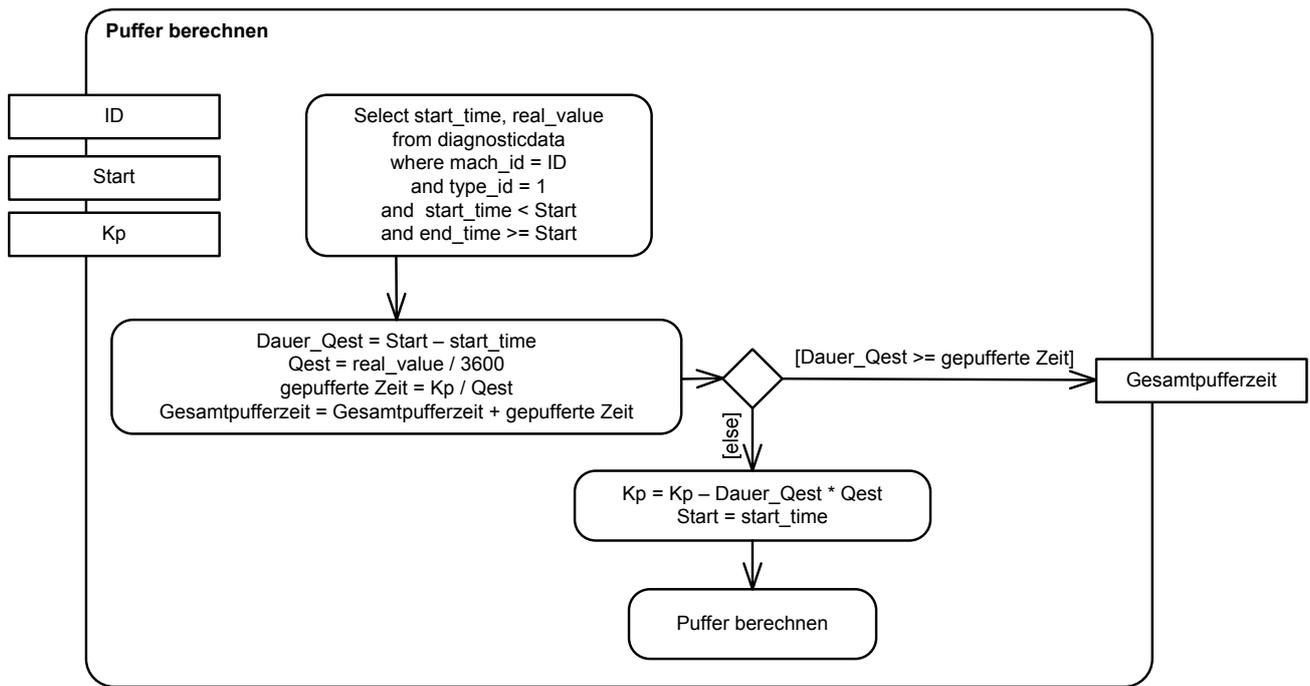






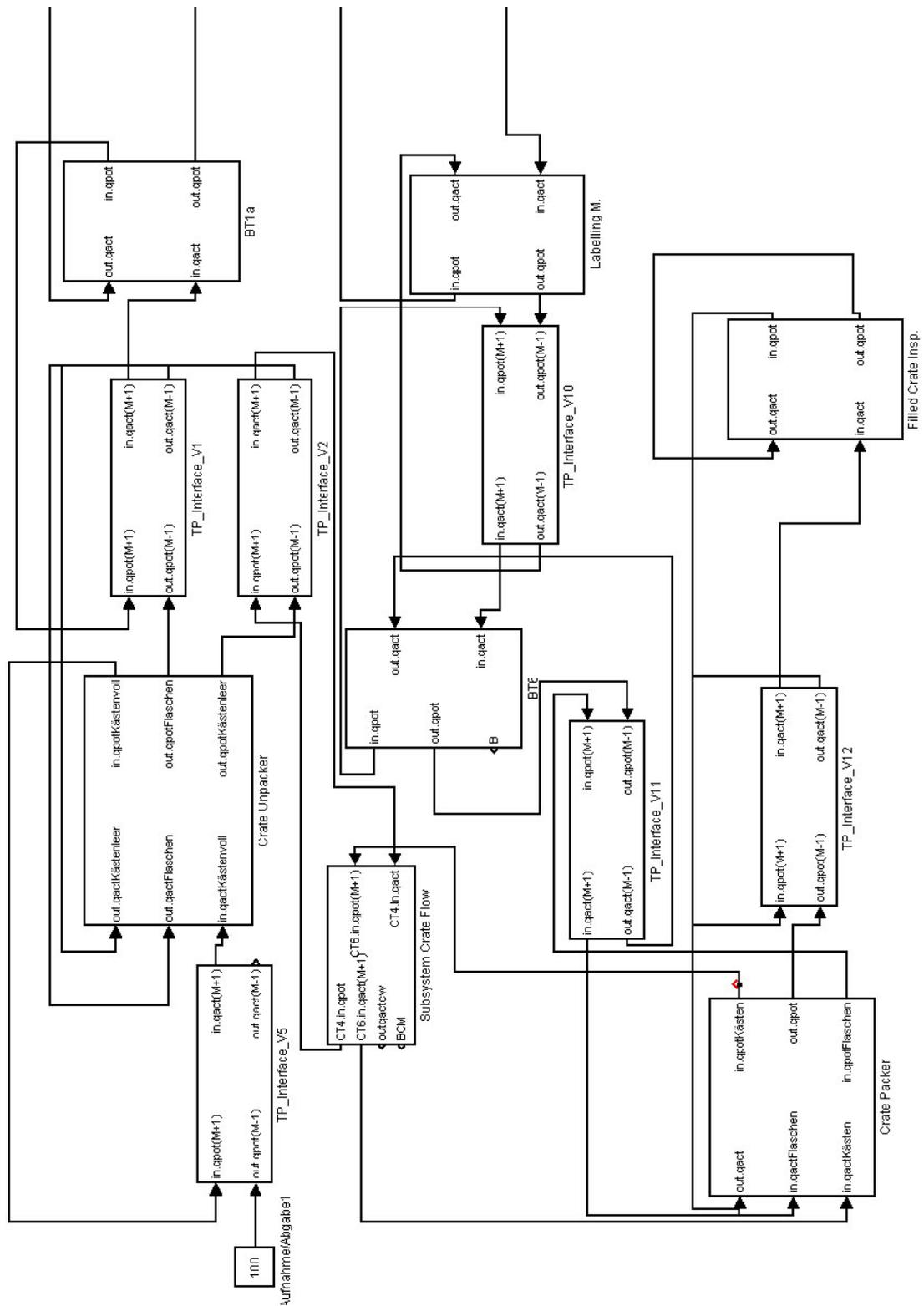


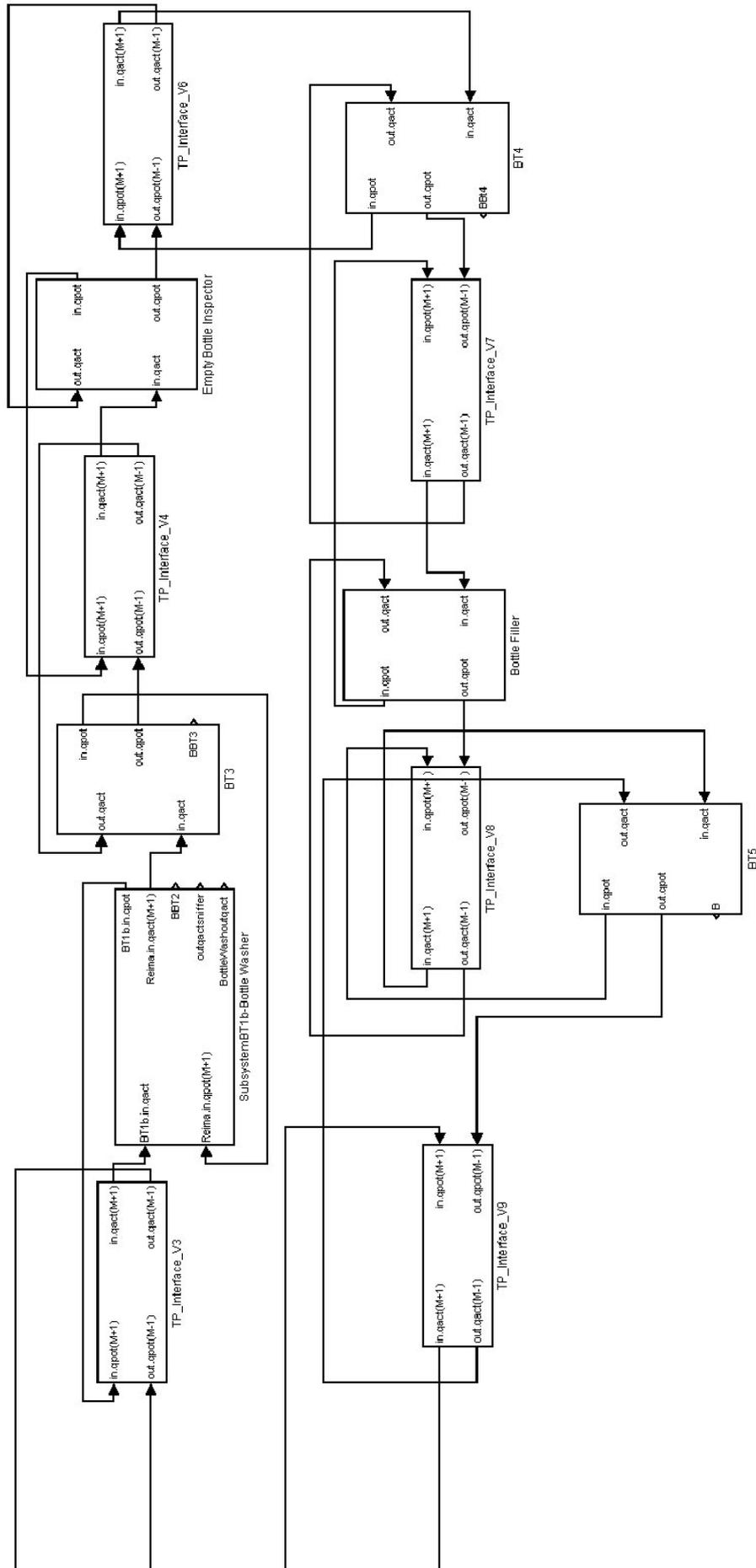




Anhang P

Simulink® Modell der Beispielanlage A (zweigeteilt)





Anhang Q

Alternative für das Komponenten-Modell CE

Combine Element Alternative		
STATE VARIABLES		DOMAINS
B_i	gespeicherte Objekte des Typs $in_i.type$	$=\{0, \dots, n_i\}$
v_i	Geschwindigkeit des Objektflusses in die Komponente am Eingang in_i [m/s]	$=\{R_0^+\}$
v_{out}	Geschwindigkeit des Objektflusses aus der Komponente [m/s]	$=\{R_0^+\}$
v_p	Geschwindigkeit der Objekte innerhalb von CE [m/s]	$=\{R_0^+\}$
PARAMETERS		
n_i	Anzahl der Objekte am Eingang in_i ($in_i.type$) die ein Objekt am Ausgang out ($out.type$) bilden	$=\{N^+\}$
td	Totzeit [s]	$=\{R_0^+\}$
INTERFACES		
$in_i.A_e$	Projektionsfläche der Objekte [m^2]	$=\{R_0^+\}$
$out.A_e$	Projektionsfläche der Objekte [m^2]	$=\{R_0^+\}$
$in_i.d_0$	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung [m]	$=\{R_0^+\}$
$out.d_0$	größte Ausdehnung der Objekte in Flussrichtung [m]	$=\{R_0^+\}$
$in_i.q_{pot}$	potentielle Flüsse in CE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, v_{in} / in_i.d_0\}$
$out.q_{pot}$	potentieller Fluss aus CE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, -v_{out} / out.d_0\}$
$q_{p,act}$	Fluss innerhalb von CE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, -v_p / out.d_0\}$
$in_i.q_{act}$	aktuelle Flüsse in CE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, v_{in} / in_i.d_0\}$
$out.q_{act}$	aktueller Fluss aus CE [$elements/s$]	$=\{0, \dots, -v_{out} / out.d_0\}$
$in_i.type$	Objekttyp am Eingang in_i	$=\{objects\}$ in der Anlage vor kommende Objekte
$out.type$	Objekttyp am Ausgang	$=\{objects\}$ in der Anlage vor kommende Objekte

Der Kombinationsprozess wird wie ein Transporter mit der Durchschnittsgeschwindigkeit v_p und dem Fluss $q_{p,act}$ modelliert:

$$\forall i \text{ in}_i \cdot q_{pot}(t) = \frac{v_i(t)}{\text{in}_i \cdot d_0} \quad \text{if } B_i(t) < n_i$$

$$\forall i \text{ in}_i \cdot q_{pot}(t) = q_{p,act} * n_i \quad \text{if } B_i(t) = n_i$$

$$\forall i \frac{dB_i}{dt} = q_{p,act} * n_i + \text{in}_i \cdot q_{act}$$

$$\forall i \frac{dB_{out,i}(t)}{dt} = q_{p,act}(t) * n_i + \text{in}_i \cdot q_{act}(t - t_d)$$

$$q_{p,act} = \min\left(\frac{v_p}{\text{out} \cdot d_0}; \frac{\text{in}_i \cdot q_{act}}{n_i}\right)$$

$$\text{out} \cdot q_{act}(t) = v_p(t) * \frac{q_{p,act}(t - t_d)}{v_p(t - t_d)}$$

Dabei bestimmt der langsamste Zufluss den gesamten Prozessfluss, woraus folgt, dass der aktuelle Fluss nicht mehr ausschließlich durch den Konnektor der einzelnen Inputs bestimmt ist.

Die Totzeit t_d ist dabei als die durchschnittliche Zeit des gesamten Kombinationsprozesses definiert. Darin sind alle Transportprozesse und die Zeit für das Kombinieren der unterschiedlichen Objekte enthalten. Dies ist vergleichbar mit den anderen Maschinentotzeiten.

Anhang R

Tabelle zur Validierung der Einzelkomponenten:

Variation der Variable	MT (jeweils mit 1, 2 und 3 Ein-/Ausgängen und verschiedenen K_P und t_d)	TC	CE (jeweils mit 1, 2 und 3 Eingängen)	SE (jeweils mit 1, 2 und 3 Ausgängen)
v_{in}	✓		✓	✓
v_{out}	✓		✓	✓
Bar_{in}	✓			
Bar_{out}	✓			
t_d	✓			
K_P	✓			
n_i			✓	✓
$MT_{n+1} \cdot in \cdot q_{pot}$		✓		
$MT_n \cdot out \cdot q_{pot}$		✓		

Konfiguration des Modells:

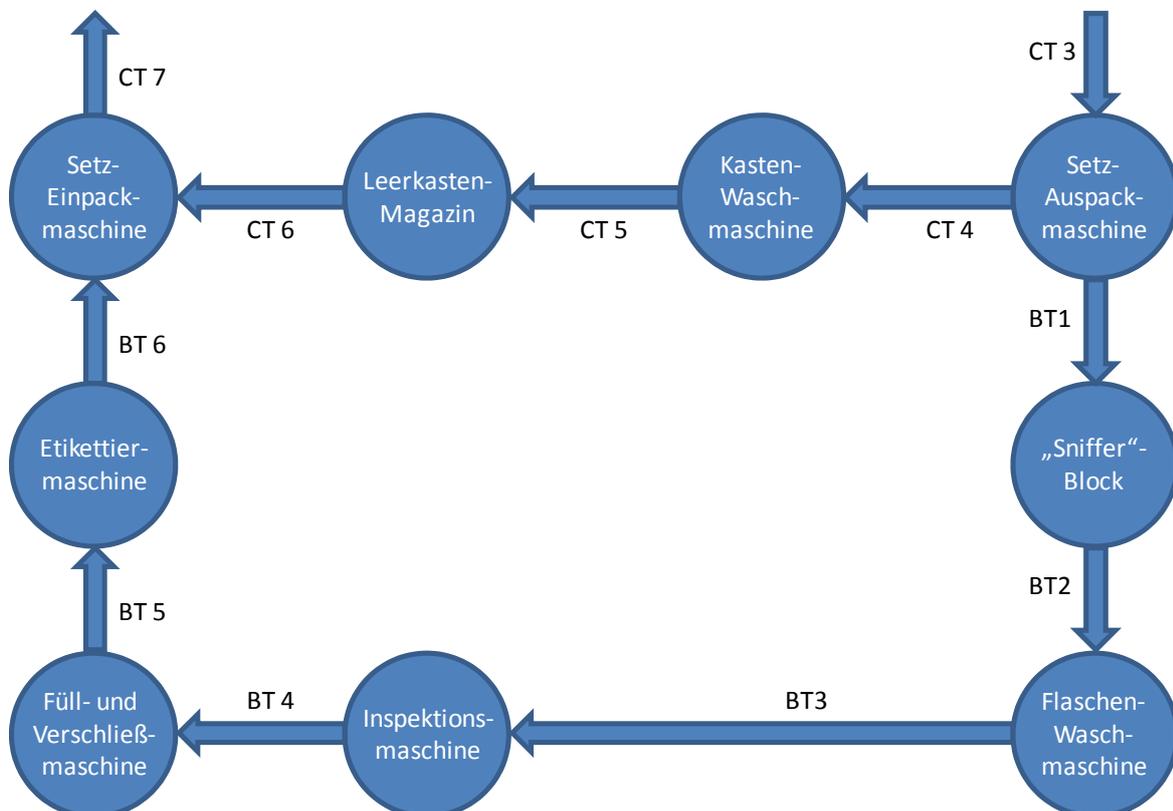


Tabelle zur Validierung der Komponenten im Verbund:

Komponente	Simulierter Fehler führt über Fortpflanzung zum Stau	Simulierter Fehler führt über Fortpflanzung zum Mangel
CT3	✓	✓
Setz-Einpackmaschine	✓	✓
BT1	✓	✓
„Sniffer“-Block	✓	✓
BT2	✓	✓
Flaschen-Waschmaschine	✓	✓
BT3	✓	✓
Inspektionsmaschine	✓	✓
BT4	✓	✓
Füll- und Verschleißmaschine	✓	✓
BT5	✓	✓
Etikettiermaschine	✓	✓
BT6	✓	✓
Setz-Einpackmaschine	✓	✓
CT7	✓	✓
CT4	✓	✓
Kasten-Waschmaschine	✓	✓
CT5	✓	✓
Leerkasten-Magazin	✓	✓
CT6	✓	✓

Anhang S

Daten der Versuchsanlagen

Reale Anlage A:

Maschinentabelle:

mach_ID	description	central_ assembly	part_of _block	td_block	Kp_block	block_leader
3001	Crate Unpacker	0	0			1
4001	Descrewer	0	0			0
7001	Bottle Washer	0	0			0
8001	Empty Bottle Inspector	0	1	100	1750	0
9001	Bottle Filler	1	1			1
10001	Labeling Machine	0	0			0
11001	Crate Packer	0	0			0
12001	Filled Crate Inspector	0	0			0
13001	Bottle Orientor	0	0			0
14001	Palletizer	0	0			0
16001	Crate Magazine	0	0			0

Verbindungstabelle:

source	target	Kp	td	main_source	main_target	MDS_source	MDS_target
3001	4001	2957	122	1	1	44100	40000
4001	7001	3451	151	1	1	40000	40000
9001	10001	3177	147	1	1	32500	33800
10001	11001	1942	101	1	1	33800	44100
3001	16001	174	104	0	1	2320	1580
16001	11001	140	151	1	0	1580	2320
7001	9001	2957	112	1	1	40000	32500

Reale Anlage B:

Maschinentabelle:

mach_ID	description	central_ assembly	part_of _block	td_block	Kp_block	block_leader
1001	Depalletizer	0	0			0
3001	Crate Unpacker	0	0			0
4001	Descrewer	0	1			1
7001	Bottle Washer	0	0			0
8001	Empty Bottle Inspector	0	0			0
9001	Bottle Filler	1	0			0
10001	Labeling Machine	0	0			0
11001	Crate Packer	0	0			0
14001	Palletizer	0	0			0
26001	manual Sorting	0	1	41	51	0

Verbindungstabelle:

source	target	Kp	td	main_source	main_target	MDS_source	MDS_target
1001	14001	28	38	1	1	78	69
1001	4001	91	58	0	1	3120	3120
4001	3001	21	13	1	1	3120	3466
3001	11001	339	268	1	1	3466	2620
11001	14001	133	115	1	0	2620	2760
3001	7001	5200	124	0	1	69000	60000
7001	8001	3036	95	1	1	60000	52000
8001	9001	0	0	1	1	52000	50000
9001	10001	3590	120	1	1	50000	52000
10001	11001	3080	101	1	0	52000	52400

Simulationsanlage C:

Maschinentabelle:

mach_ID	description	central_ assembly	part_of _block	td_block	Kp_block	block_leader
3001	Crate Unpacker	0	0			0
4001	Descrewer	0	0			0
7001	Bottle Washer	0	0			0
8001	Empty Bottle Inspector	0	1	99	750	0
9001	Bottle Filler	1	1			1
10001	Labeling Machine	0	0			0
11001	Crate Packer	0	0			0
16001	Crate Magazine	0	0			0
5001	Crate Washer	0	0			0

Verbindungstabelle:

source	target	Kp	td	main_source	main_target	MDS_source	MDS_target
3001	4001	4020	93	0	1	45000	45000
4001	7001	4330	124	1	1	45000	45000
7001	9001	4220	34	1	1	45000	36000
9001	10001	4700	146	1	1	36000	40000
10001	11001	2530	91	1	0	40000	45000
3001	5001	96	14	1	1	3750	3750
5001	16001	50	7	1	1	3750	3750
16001	11001	139	19	1	1	3750	3750

Anhang T

Diagnose des letzten Verursachers auf Basis von Simulationsdaten

Störung aller Aggregate und Transporteure bis diese sich in einem Füllerstillstand äuserten --> eindeutige Schuld Ergebnisse des Letztverursacher - Algorithmus mit 1sec Sicherheitsfaktor für Zeitenberechnung					
Stördauer [s]	schuldiges Aggregat	Beschreibung	schuldiges Aggregat	Beschreibung	Bemerkung
126	nachgeschalteter Prozess	Störung Senke mit Stau Einpacker --> Etima --> Füller	nachgeschalteter Prozess	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	
129	Einpacker	Störung Einpacker mit Stau Etima --> Füller	Crate Packer	Equipment Failure	
75	Etima	Störung Etima mit Stau Füller	Labeling Machine	Equipment Failure	
9	Füller	Störung	Bottle Filler	Equipment Failure	
98	Inspektor	Störung Inspektor mit Mangel Füller	Empty Bottle Inspector	Equipment Failure	
64	Inspektor	ausgeleitetes Gut an Inspektor bis Mangel Füller		andere Ursache - 'Verursacher' ist in Betrieb. Evtl. Ausleitung oder Blockierung	Kontrolle auf Counterwerte nötig
271	Flawa	Störung Waschmaschine mit Mangel Inpektor --> Füller	Bottle Washer	Equipment Failure	
476	Abschrauber	Störung Abschrauber mit Mangel Flawa --> Inspektor --> Füller	Descrewer	Equipment Failure	
617	Auspacker	Störung Auspacker mit Mangel Abschrauber --> Flawa --> Inspektor --> Füller	Crate Unpacker	Equipment Failure	
644	vorgeschalteter Prozess	Störung Senke mit Mangel Auspacker --> Abschrauber --> Flawa --> Inspektor --> Füller	vorgeschalteter Prozess	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	

634	Kastenwascher	Störung Kastenwascher mit Stau Auspacker --> Mangel Abschrauber --> Flawa --> Inspektor --> Füller	Crate Washer	Equipment Failure	
650	Kastenmagazin	Störung Magazin mit Stau Kastenwascher --> Auspacker--> Mangel Abschrauber --> Flawa --> Inspektor --> Füller	Crate Magazine	Equipment Failure	
130	nachgeschalteter Prozess	bis Stillstand Füller	nachgeschalteter Prozess	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	
360	Transp. Kastenmagazin --> Einpacker	bis Stillstand Füller	Transporteur	Fehler zwischen 16001 und 11001	
97	Transp. Etima --> Einpacker	bis Stillstand Füller	Transporteur	Fehler zwischen 10001 und 11001	
14	Transp. Füller --> Etima	bis Stillstand Füller	Labeling Machine	andere Ursache - 'Verursacher' ist in Betrieb. Evtl. Ausleitung oder Blockierung	Blockierung hat sich noch nicht als Mangel an Etima durchgeschlagen
15	Transp. Inspektor --> Füller	bis Stillstand Füller	Transporteur	Fehler zwischen 7001 und 9001	keine Aussage über Verbindungen innerhalb eines Blockes möglich. Verbindung FlaWa --> Füller ist genauest mögliche
10	Transp. Flawa --> Inspektor	bis Stillstand Füller	Transporteur	Fehler zwischen 7001 und 9001	aufgrund Verblockung ist Verbindung FlaWa --> Inspektor als Verbindung FlaWa --> Füller hinterlegt

329	Transp. Abschrauber --> Flawa	bis Stillstand Füller	Transporteur	Fehler zwischen 4001 und 7001	
580	Transp. Auspacker --> Abschrauber	bis Stillstand Füller	Crate Unpacker	andere Ursache - 'Verursacher' ist in Betrieb. Evtl. Ausleitung oder Blockierung	Blockierung hat sich noch nicht als Stau an Auspacker durchgeschlagen
630	Transp. Kastenwascher --> Kastenmagazin	bis Stillstand Füller	Transporteur	Fehler zwischen 5001 und 16001	
2568	Transp. Auspacker --> Kastenwascher	bis Stillstand Füller	Transporteur	Fehler zwischen 3001 und 5001	
415	Abschrauber	30sec Störung 10sec Betrieb im Wechsel bis Stillstand Füller über Flawa --> Inspektor	Descrwer	Equipment Failure	
121	Einpacker	30sec Störung 10sec Betrieb im Wechsel bis Stillstand Füller über Etima	Crate Packer	Equipment Failure	
147	Einpacker	Störung Einpacker mit Stau Etima --> Füller	Crate Packer	Equipment Failure	
771	Einpacker	Störung Einpacker mit Stau Etima --> Füller	Crate Packer	Equipment Failure	
1013	Etima	zuvor lange Störung des Auspackers aber finaler Stillstand durch Etima	Labeling Machine	Equipment Failure	
272	Flawa	zuvor lange Störung des Abschraubers aber finaler Stillstand durch Flaschenwascher	Bottle Washer	Equipment Failure	

Ergebnisse des Letztverursacher - Algorithmus mit 1sec Sicherheitsfaktor für Zeitenberechnung

Stördauer [s]	schuldiges Aggregat	Beschreibung	schuldiges Aggregat	Beschreibung	Bemerkung
646	vorgeschalteter Prozess	Störung Transporteur vor Auspacker bis 9001 steht	vorgeschalteter Prozess	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	
617	vorgeschalteter Prozess mit <i>Teilschuld Auspacker</i>	Störung Transporteur vor Auspacker, dann Auspacker bis 9001 steht	vorgeschalteter Prozess	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	Erstverursachung lag bei erster Störung, Gesamtstördauer von zweiter Störung mitverursacht
615	Auspacker	Störung Auspacker bis Stillstand 9001	Crate Unpacker	Equipment Failure	
550	Auspacker mit <i>Teilschuld Abschrauber</i>	Störung Auspacker, dann Abschrauber bis Stillstand 9001			Erstverursachung lag bei erster Störung, Gesamtstördauer von zweiter Störung mitverursacht
473	Abschrauber	Störung Abschrauber bis Stillstand 9001	Descrewer	Equipment Failure	
425	FlaWa	Störung Abschrauber, dann FlaWa bis Stillstand 9001	Bottle Washer	Equipment Failure	
273	FlaWa	Störung FlaWa bis Stillstand 9001	Bottle Washer	Equipment Failure	
98	Inspektor	Störung FlaWa, dann Inspektor bis Stillstand 9001	Empty Bottle Inspector	Equipment Failure	
97	Inspektor	Störung Inspektor bis Stillstand 9001	Empty Bottle Inspector	Equipment Failure	
0	Füller	Eigenstörung	Bottle Filler	Equipment Failure	
74	Etima	Störung Etima bis Stillstand 9001	Labeling Machine	Equipment Failure	

125	Einpacker	Störung Einpacker bis Stillstand 9001	Crate Packer	Equipment Failure	
75	Etima	Störung Einpacker, dann Etima bis Stillstand 9001	Labeling Machine	Equipment Failure	
127	nachgeschalteter Prozess	Störung Transporteur nach Einpacker bis Stillstand 9001	nachgeschalteter Prozess	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	
125	nachgeschalteter Prozess mit <i>Teilschuld Einpacker</i>	Störung Transporteur nach Einpacker, dann Einpacker bis Stillstand 9001	nachgeschalteter Prozess	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	Erstverursachung lag bei erster Störung, Gesamtstördauer von zweiter Störung mitverursacht
630	Kastenwascher	Störung Kastenwascher bis Stillstand 9001	Crate Washer	Equipment Failure	
747	Kastenwascher mit <i>Teilschuld Auspacker</i>	Störung Kastenwascher mit Stillstand 9001, dann Auspacker gestört	Crate Washer	Equipment Failure	Erstverursachung lag bei erster Störung, Gesamtstördauer von zweiter Störung mitverursacht
747	Kastenwascher mit <i>Teilschuld Magazin</i>	Störung Kastenwascher mit Stillstand 9001, dann Magazin gestört	Crate Washer	Equipment Failure	Erstverursachung lag bei erster Störung, Gesamtstördauer von zweiter Störung mitverursacht
148	Kastenmagazin	Störung Magazin bis Stillstand 9001	Crate Magazine	Equipment Failure	
82	Kastenmagazin mit <i>Teilschuld Auspacker</i>	Störung Magazin, dann Auspacker bis Stillstand 9001	Crate Magazine	Equipment Failure	Erstverursachung lag bei erster Störung, Gesamtstördauer von zweiter Störung mitverursacht

87	Kastenmagazin mit Teilschuld Kastenwascher	Störung Magazin , dann Kastenwascher bis Stillstand 9001	Crate Magazine	Equipment Failure	Erstverursachung lag bei erster Störung, Gesamtstördauer von zweiter Störung mitverursacht
505	Transp. Auspacker --> Abschrauber	bis Stillstand 9001	Transporteur	Fehler zwischen 3001 und 4001	
328	Transp. Abschrauber --> Flawa	bis Stillstand 9001	Transporteur	Fehler zwischen 4001 und 7001	
11	Transp. Flawa --> Inspektor	bis Stillstand 9001	Transporteur	Fehler zwischen 7001 und 9001	aufgrund Verblockung ist Verbindung FlaWa --> Inspektor als Verbindung FlaWa --> Füller hinterlegt
14	Transp. Inspektor --> Füller	bis Stillstand 9001	Bottle Washer	andere Ursache - 'Verursacher' ist in Betrieb. Evtl. Ausleitung oder Blockierung	keine Aussage über Verbindungen innerhalb eines Blockes möglich --> an Flawa war noch Betrieb
13	Transp. Füller --> Etima	bis Stillstand 9001	Transporteur	Fehler zwischen 10001 und 9001	
96	Transp. Etima --> Einpacker	bis Stillstand 9001	Transporteur	Fehler zwischen 11001 und 10001	
620	Transp. Auspacker --> Kastenwascher	bis Stillstand 9001	Transporteur	Fehler zwischen 5001 und 3001	
635	Transp. Kastenwascher --> Magazin	bis Stillstand 9001	Transporteur	Fehler zwischen 5001 und 16001	
131	Transp. Magazin --> Einpacker	bis Stillstand 9001	Transporteur	Fehler zwischen 16001 und 11001	

126	nachgeschalteter Prozess	Transp. nach Einpacker bis Stillstand 9001	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	
528	Auspacker	Stottern Auspacker bis Stillstand 9001	Equipment Failure	
442	Abschrauber	Stottern Abschrauber bis Stillstand 9001	Equipment Failure	
268	FlaWa	Stottern FlaWa bis Stillstand 9001	Equipment Failure	
26	Inspektor	Stottern Inspektor bis Stillstand 9001	Equipment Failure	
100	Etima	Stottern Etima bis Stillstand 9001	Equipment Failure	
122	Einpacker	Stottern Einpacker bis Stillstand 9001	Equipment Failure	
544	Kastenwascher	Stottern Kastenwascher bis Stillstand 9001	Equipment Failure	
272	FlaWa mit Teilschuld Abschrauber	Abschrauber 13 min gestört bis Puffer dezimiert, dann FlaWa gestört bis Füllerstillstand	Equipment Failure	
237	FlaWa mit Teilschuld Abschrauber	Abschrauber 13 min gestört bis Puffer dezimiert, dann FlaWa gestört bis Lücke zu Füller gross genug --> Füllerstillstand	Equipment Failure	
2826	FlaWa mit Teilschuld Abschrauber	Abschrauber 12 min gestört bis Puffer dezimiert, dann FlaWa gestört bis Füllerstillstand	Equipment Failure	
244	FlaWa mit Teilschuld Abschrauber	Abschrauber 12 min gestört bis Puffer dezimiert, dann FlaWa gestört bis Lücke zu Füller gross genug --> Füllerstillstand	Equipment Failure	

272	FlaWa mit Teilschuld Abschrauber	Abschrauber 12 min gestört bis Puffer dezimiert, dann FlaWa gestört bis Füllerstillstand	Bottle Washer	Equipment Failure	
259	FlaWa mit Teilschuld Abschrauber	Abschrauber 12 min gestört bis Puffer dezimiert, dann FlaWa gestört bis Lücke zu Füller gross genug --> Füllerstillstand	Bottle Washer	Equipment Failure	
129	Einpacker	Störung Einpacker bis Stillstand 9001	Crate Packer	Equipment Failure	
94	Etima mit Teilschuld Einpacker	Störung Einpacker 7,5 min bis Puffer dezimiert, dann Etima bis Füllerstillstand	Labeling Machine	Equipment Failure	
74	Etima mit Teilschuld Einpacker	Störung Einpacker 7,5 min bis Puffer dezimiert, dann Etima bis Füllerstillstand	Labeling Machine	Equipment Failure	
74	Etima mit Teilschuld Einpacker	Störung Auspacker 6 min, dann 1 min Betrieb aller, dann 1 min Störung Etima, 15 sec Betrieb Etima, Störung Etima bis Stillstand 9001	Labeling Machine	Equipment Failure	
77	Etima mit Teilschuld Einpacker	Störung Einpacker 6 min, dann 1 min Betrieb aller, dann 1 min Störung Etima, 15 sec Betrieb Etima, 36 sec Störung Etima, 12 sec Betrieb, 3 sec Störung --> Stillstand 9001	Labeling Machine	Equipment Failure	
75	Etima	Störung Etima bis Stillstand 9001	Labeling Machine	Equipment Failure	
129	Einpacker	Störung Etima ohne Auswirkung auf Füller, dann Einpacker bis Stillstand 9001	Crate Packer	Equipment Failure	

Diagnose der anteiligen Verursachung auf Basis von Simulationsdaten:

Störnummer	Stillstand Beginn	Stillstand Ende	Dauer [s]	Verursacher	Störungsbeginn [Verursacher]	Störungsende [Verursacher]	Dauer [s]	Schuldanteil [%]	Beschreibung	Summe der Prozenste
1	01:21:57	01:32:43	646	vorgeschalteter Prozess	00:00:00	00:00:00	0	100,00	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	100,00
2	02:47:47	02:58:04	617	vorgeschalteter Prozess	00:00:00	00:00:00	0	100,00	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	100,00
3	04:11:24	04:21:39	615	Crate Unpacker	03:47:47	04:11:24	1417	100,00	Equipment Failure	100,00
4	05:35:09	05:44:19	550	Crate Unpacker	05:11:24	05:34:01	1357	100,00	Equipment Failure	100,00
5	06:53:28	07:01:21	473	Descrewer	06:36:26	06:53:28	1022	100,00	Equipment Failure	100,00
6	08:11:36	08:18:41	425	Bottle Washer	08:10:47	08:11:36	49	7,78	Equipment Failure	
6	08:11:36	08:18:41	425	Descrewer	07:53:28	08:10:47	1039	92,22	Equipment Failure	100,00
7	09:22:56	09:27:29	273	Bottle Washer	09:11:36	09:22:56	680	100,00	Equipment Failure	100,00
8	10:35:13	10:36:51	98	Bottle Washer	10:22:56	10:33:16	620	81,43	Equipment Failure	81,43

9	11:37:10	11:38:47	97	Bottle Washer	10:22:56	10:33:16	620	28,57	Equipment Failure	28,57
10	12:37:10	12:37:10	0	Bottle Filler	12:37:10	12:37:10	0	100,00	Equipment Failure	100,00
11	13:42:33	13:43:47	74	Labeling Machine	13:37:10	13:42:33	323	100,00	Equipment Failure	100,00
12	14:50:59	14:53:04	125	Crate Packer	14:42:33	14:50:59	506	100,00	Equipment Failure	100,00
13	15:59:26	16:00:41	75	Labeling Machine	15:58:25	15:59:26	61	20,89	Equipment Failure	
13	15:59:26	16:00:41	75	Crate Packer	15:50:59	15:58:25	446	79,11	Equipment Failure	100,00
14	17:08:39	17:10:46	127	nachgeschalteter Prozess	00:00:00	00:00:00	0	100,00	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	100,00
15	18:17:47	18:19:52	125	nachgeschalteter Prozess	00:00:00	00:00:00	0	100,00	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	100,00
16	19:43:33	19:54:03	630	Crate Washer	19:17:47	19:43:33	1546	100,00	Equipment Failure	100,00
17	21:06:23	21:18:50	747	Crate Washer	20:43:33	21:08:19	1486	87,50	Equipment Failure	87,50
18	22:31:10	22:43:37	747	Crate Washer	22:08:19	22:33:05	1486	87,50	Equipment Failure	87,50

19	23:43:57	23:46:25	148	Crate Magazine	23:33:05	23:43:57	652	100,00	Equipment Failure	100,00
20	00:54:55	00:56:17	82	Crate Magazine	00:44:20	00:53:49	569	100,00	Equipment Failure	100,00
21	02:05:47	02:07:14	87	Crate Magazine	01:54:55	02:04:47	592	100,00	Equipment Failure	100,00
22	14:04:54	14:07:00	126	nachgeschalteter Prozess	00:00:00	00:00:00	0	100,00	kein Fehler in betrachtetem Anlagenteil	100,00
23	15:36:36	15:45:24	528	Crate Unpacker	15:29:44	15:30:14	30	25,87	Equipment Failure	
23	15:36:36	15:45:24	528	Crate Unpacker	15:23:04	15:23:34	30	47,14	Equipment Failure	73,02
24	17:01:09	17:08:31	442	Descrewer	16:57:04	16:57:34	30	15,71	Equipment Failure	
24	17:01:09	17:08:31	442	Descrewer	16:50:24	16:50:54	30	47,14	Equipment Failure	
24	17:01:09	17:08:31	442	Descrewer	16:43:04	16:43:34	30	37,14	Equipment Failure	100,00
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:16:24	18:16:54	30	4,76	Equipment Failure	
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:15:44	18:16:14	30	4,76	Equipment Failure	
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:15:04	18:15:34	30	4,76	Equipment Failure	
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:14:24	18:14:54	30	4,76	Equipment Failure	

25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:13:44	18:14:14	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:13:04	18:13:34	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:12:24	18:12:54	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:11:44	18:12:14	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:11:04	18:11:34	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:10:24	18:10:54	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:09:44	18:10:14	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:09:04	18:09:34	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:08:24	18:08:54	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:07:44	18:08:14	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:07:04	18:07:34	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:06:24	18:06:54	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:05:44	18:06:14	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:05:04	18:05:34	30	4,76	Equipment Failure
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:04:24	18:04:54	30	4,76	Equipment Failure

25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:03:44	18:04:14	30	4,76	Equipment Failure	100,00
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:03:04	18:03:34	30	4,76	Equipment Failure	
25	18:17:26	18:21:54	268	Bottle Washer	18:02:24	18:02:54	30	0,00	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:27:44	20:28:14	30	1,71	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:27:04	20:27:34	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:26:24	20:26:54	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:25:44	20:26:14	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:25:04	20:25:34	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:24:24	20:24:54	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:23:44	20:24:14	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:23:04	20:23:34	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:22:24	20:22:54	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:21:44	20:22:14	30	10,27	Equipment Failure	
26	20:27:49	20:29:29	100	Labeling Machine	20:21:04	20:21:34	30	5,82	Equipment Failure	
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:37:44	21:38:14	30	1,24	Equipment Failure	

27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:37:04	21:37:34	30	7,42	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:36:24	21:36:54	30	7,42	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:35:44	21:36:14	30	7,42	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:35:04	21:35:34	30	7,42	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:34:24	21:34:54	30	7,42	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:33:44	21:34:14	30	7,42	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:32:24	21:32:54	30	6,55	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:31:44	21:32:14	30	10,33	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:31:04	21:31:34	30	10,33	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:30:24	21:30:54	30	10,33	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:29:44	21:30:14	30	10,33	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:29:04	21:29:34	30	10,33	Equipment Failure
27	21:39:51	21:41:53	122	Crate Packer	21:28:24	21:28:54	30	10,33	Equipment Failure
28	23:13:55	23:22:59	544	Crate Washer	23:06:24	23:06:54	30	20,42	Equipment Failure
28	23:13:55	23:22:59	544	Crate Washer	23:05:44	23:06:14	30	23,33	Equipment Failure
								114,29	

28	23:13:55	23:22:59	544	Crate Washer	22:59:44	23:00:14	30	41,39	Equipment Failure	187,50
28	23:13:55	23:22:59	544	Crate Washer	22:59:04	22:59:34	30	47,30	Equipment Failure	
28	23:13:55	23:22:59	544	Crate Washer	22:53:04	22:53:34	30	25,69	Equipment Failure	
28	23:13:55	23:22:59	544	Crate Washer	22:52:24	22:52:54	30	29,37	Equipment Failure	
29	01:43:26	01:45:35	129	Crate Packer	01:35:00	01:43:29	509	100,00	Equipment Failure	100
30	02:53:26	02:55:00	94	Labeling Machine	02:52:30	02:53:46	76	19,18	Equipment Failure	
30	02:53:26	02:55:00	94	Crate Packer	02:45:00	02:52:30	450	80,82	Equipment Failure	100,00
31	04:08:26	04:09:40	74	Labeling Machine	04:07:30	04:08:26	56	19,18	Equipment Failure	
31	04:08:26	04:09:40	74	Crate Packer	04:00:00	04:07:30	450	80,82	Equipment Failure	100,00
32	05:08:53	05:10:07	74	Labeling Machine	05:08:15	05:08:53	38	13,01	Equipment Failure	
32	05:08:53	05:10:07	74	Labeling Machine	05:07:00	05:08:00	60	20,55	Equipment Failure	
32	05:08:53	05:10:07	74	Crate Packer	05:00:00	05:06:00	360	66,44	Equipment Failure	100,00
33	06:09:06	06:10:23	77	Labeling Machine	06:09:02	06:09:08	6	1,37	Equipment Failure	
33	06:09:06	06:10:23	77	Labeling Machine	06:08:15	06:08:51	36	12,33	Equipment Failure	
33	06:09:06	06:10:23	77	Labeling Machine	06:07:00	06:08:00	60	20,55	Equipment Failure	

33	06:09:06	06:10:23	77	Crate Packer	06:00:00	06:06:00	360	65,75	Equipment Failure	100,00
34	07:05:23	07:06:38	75	Labeling Machine	07:00:00	07:05:23	323	100,00	Equipment Failure	100,00
35	08:10:26	08:12:35	129	Crate Packer	08:04:50	08:10:26	336	21,58	Equipment Failure	
35	08:10:26	08:12:35	129	Labeling Machine	08:00:00	08:04:50	290	78,42	Equipment Failure	100,00
36	02:17:42	02:22:14	272	Bottle Washer	02:14:00	02:17:42	222	35,24	Equipment Failure	
36	02:17:42	02:22:14	272	Descrewer	02:00:00	02:13:00	780	64,76	Equipment Failure	100,00
37	03:17:54	03:21:51	237	Bottle Washer	03:14:00	03:17:20	200	31,75	Equipment Failure	
37	03:17:54	03:21:51	237	Descrewer	03:00:00	03:13:00	780	68,25	Equipment Failure	100,00
38	05:17:26	06:04:32	2826	Bottle Washer	05:13:00	06:00:00	2820	42,22	Equipment Failure	
38	05:17:26	06:04:32	2826	Descrewer	05:00:00	05:12:00	720	57,78	Equipment Failure	100,00
39	07:17:22	07:21:26	244	Bottle Washer	07:13:00	07:16:54	234	37,14	Equipment Failure	
39	07:17:22	07:21:26	244	Descrewer	07:00:00	07:12:00	720	62,86	Equipment Failure	100,00
40	08:18:01	08:22:33	272	Bottle Washer	08:11:00	08:18:01	421	66,83	Equipment Failure	
40	08:18:01	08:22:33	272	Descrewer	08:00:00	08:11:00	660	33,17	Equipment Failure	100,00
41	09:17:43	09:22:02	259	Bottle Washer	09:11:00	09:17:30	390	61,90	Equipment Failure	
41	09:17:43	09:22:02	259	Descrewer	09:00:00	09:11:00	660	38,10	Equipment Failure	100,00

Lebenslauf

PERSÖNLICHE ANGABEN:

Axel Kather

Geburtsdatum: 26.04.1978
 Geburtsort: Hoya / Weser

AUSBILDUNG

Aug. 1984 – Juni 1997 Schulausbildung mit Abschluss der Allgemeinen Hochschulreife an der Europa-Schule „Schiller-Gymnasium Hameln“

Nov. 1998 – Juni 2003 Studium Brauwesen und Getränketechnologie an der Technischen Universität München (TUM)
 Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)
 Diplomarbeitsthema: „Modellierung und experimentelle Verifizierung von Druckverlust und Wandschubspannung bei der pneumatischen Pfropfenförderung“

Okt. 2003 – Sep. 2006 Studium Praktische Informatik (Zusatzstudiengang) an der FernUniversität Hagen

Okt. 2006 – Sep. 2007 Studium Computer Science an der FernUniversität Hagen
 Abschluss: M. Comp. Sc.
 Masterarbeitsthema: „Darstellung von Betriebsdaten komplexer Produkte in Produktontologien“

Okt. 2003 – Mai 2009 Promotion am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (LVT) der Technische Universität München (Weihenstephan)
 Abschluss: Dr.-Ing.
 Promotionsthema: „Fehlerlokalisierung in verketteten Linien am Beispiel von Lebensmittelverpackungsanlagen“

BERUFLICHER WERDEGANG

Juli 2003 – März 2008 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (LVT) der Technischen Universität München

seit April 2008 Global Industry Technical Consultant bei der Rockwell Automation GmbH, Deutschland