

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik

Stufenlose Regelung von Materialflusssystemen am Beispiel von Behältertransporteuren in Getränkeabfüllanlagen

André Sorgatz

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. U. M. Kulozik

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. H.-Chr. Langowski
2. Univ.-Prof. Dr. B. Vogel-Heuser
3. Univ.-Prof. Dr. Th. Becker

Die Dissertation wurde am 07.12.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 04.06.2013 angenommen.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik des Wissenschaftszentrums Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München im Zeitraum von Dezember 2007 bis Dezember 2011. Daher gilt mein Dank in besonderem Maße meinem Doktorvater und Ordinarius des Lehrstuhls Herrn Prof. Dr. rer. nat. Horst-Christian Langowski. Er hat mir nicht nur die Möglichkeit gegeben diese Arbeit am Lehrstuhl anzufertigen, sondern hat durch die Freiräume, die er mir gewährte und die konstruktive Kritik, die er während der Entstehung der Arbeit übte, zu deren Gelingen wesentlich beigetragen.

Auch den Prüfern dieser Arbeit Frau Prof. Dr. Vogel-Heuser, Herrn Prof. Dr. Becker sowie dem Vorsitzenden Herrn Prof. Dr. Kulozik gilt mein Dank für die Übernahme ihrer Ämter.

Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des Lehrstuhls. Die immer positive Atmosphäre sowie die konstruktive Zusammenarbeit und der Zusammenhalt am Lehrstuhl werden mir in guter Erinnerung bleiben. Auch wenn es schwer fällt hier einzelne Personen hervorzuheben, so möchte ich doch Frau Birgit Piechotta danken, die immer ein offenes Ohr hatte und viele Verwaltungsarbeiten und organisatorische Aufgaben während meiner Zeit am Lehrstuhl und im Zeitraum bis zur Prüfung übernommen hat. Auch den Kollegen aus der IT-Arbeitsgruppe Herrn Dr.-Ing. Tobias Voigt, Sven Franke, Stefan Flad, Christoph Nophut und dem ehemaligen Mitarbeiter Dr.-Ing. Axel Kather möchte ich in besonderem Maße danken. Sie haben durch Denkanstöße, konstruktive Kritik und viele Diskussionen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein Dank gilt auch den Projektpartnern, mit denen ich im Rahmen der am Lehrstuhl durchgeführten Forschungsprojekte zusammenarbeiten durfte. Ihre Mithilfe und Rückmeldungen haben entscheidend zu dieser Arbeit beigetragen. Besonders hervorheben möchte ich hier Herrn Werner Nophut, der mich im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte unterstützte und durch sein großes Engagement diese Arbeit mitprägte.

Ein weiterer Dank gilt den Studenten, mit denen ich während meiner Zeit am Lehrstuhl zusammenarbeiten durfte und die mich bei der Durchführung der Forschungsprojekte unterstützt haben.

Auch meiner Familie möchte ich für die Unterstützung bei dieser Arbeit danken. So gilt mein besonderer Dank meiner Frau und meinen Kindern, die an vielen Wochenenden und Abenden auf mich verzichtet haben, so dass ich diese Arbeit fertig stellen konnte.

Auch meinen Eltern möchte ich Danken. Sie haben mir durch ihre Hilfe eine sorgenlose Ausbildung ermöglicht und so einen wesentlichen Grundstein zum Entstehen dieser Arbeit gelegt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Theoretische Grundlagen und Stand der Technik	4
2.1	Getränkeabfüllanlagen	4
2.1.1	Aufbau von Getränkeabfüllanlagen	4
2.1.2	Verkettung störanfälliger Maschinen	6
2.1.3	Aufbau, Einsatz und Betrieb von Behältertransporteuren	10
2.2	Akustische Situation in Getränkeabfüllanlagen.....	28
2.2.1	Gesetzliche Regelwerke und ihr Einfluss auf die Nutzung von Getränkeabfüllanlagen	28
2.2.2	Schalltechnische Größen.....	29
2.2.3	Maßnahmen zur Lärmreduzierung.....	33
2.3	Beschreibung des betrachteten Systems	35
3	Methodenentwicklung zur Regelung und experimentellen Validierung von Massentransporteur.....	38
3.1	Anforderungen an effiziente und lärmarme Puffer.....	38
3.1.1	Sicherer Betrieb und Erfüllung der grundlegenden Aufgaben einer Transportbandregelung	38
3.1.2	Stabilisierung der Pufferfüllung.....	40
3.1.3	Anwendbarkeit auf die in der Praxis üblichen mehrsträngigen Puffersysteme.....	40
3.1.4	Reduzierung der Lärmemissionen bei der Förderung von Behältern	41
3.1.5	Effizienter Betrieb der Transportstrecken.....	41
3.2	Umsetzung einer stauschalterbasierten Regelung an einer Versuchsanlage	42
3.3	Entwicklung eines Algorithmus zur stufenlosen Pufferregelung	49
3.3.1	Die Betriebszustände der stufenlosen Regelung.....	50
3.3.2	Aufbau des Hauptprogramms zur stufenlosen Regelung.....	51
3.3.3	Aufbau des Unterprogramms für den kontinuierlicher Betrieb AS I und AB I.....	52
3.3.4	Aufbau des Unterprogramms für den Betrieb bei Rückstau AS II und AB II	54

3.3.5	Aufbau des Unterprogramms für den Betrieb beim Auftreten von Lücken AS III und AB III	57
3.4	Entwicklung eines Systems zur Behälterzählung im Pulk	66
3.4.1	Anforderungen an ein Sensorsystem zur Behälterzählung im Pulk.....	67
3.4.2	Verwendete Hardware.....	68
3.4.3	Aufbau des Systems und Verarbeitung der Bilder	70
3.4.4	Anbindung des Sensors an eine SPS	72
3.4.5	Gestaltung eines hygienegerechten Gehäuses.....	73
3.4.6	Einbindung der intelligenten Kamera zur Behälterzählung im Pulk in eine Pilotanlage	74
3.5	Pilotanlage zur Umsetzung verschiedener Pufferkonzepte	75
3.5.1	Die Steuerungsarchitektur der Pilotanlage.....	76
3.5.2	Vergleichbarkeit des Pilotrundläufers mit einer industriell genutzten Anlage	76
3.6	Simulation von mehrsträngigen Behältertransporteuren	77
3.6.1	Anforderungen an die Simulation	78
3.6.2	Aufbau der Simulation	78
3.6.3	Ablaufsteuerung der Simulation	86
3.6.4	Aufbau einer virtuellen Versuchsanlage	88
4	Ergebnisse der experimentellen Validierung und Diskussion.....	91
4.1	Experimentelle Überprüfung der Zählgenauigkeit der intelligenten Kamera	91
4.1.1	Diskussion zu 4.1	92
4.2	Verifizierung und Validierung der Simulation	92
4.2.1	Verifizierung der Simulation	92
4.2.2	Validierung der Simulation	103
4.2.3	Diskussion zu 4.2.2	106
4.3	Das Verhalten der Regelungskonzepte	108
4.3.1	Diskussion zu 4.3	111
4.4	Effizienzbetrachtung der Regelungskonzepte	112
4.4.1	Störzeitverhalten der Maschinen.....	112
4.4.2	Variation der Einstellausbringungen der Maschinen	119

4.4.3	Diskussion zu 4.4.2	121
4.4.4	Variation der Pufferdimensionen	121
4.4.5	Diskussion zu 4.4.4	122
4.5	Auswirkungen des Regelungskonzepts auf die Schallemission der Versuchsanlage im realen Betrieb	124
4.5.1	Diskussion zu 4.5	128
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	131
	Literaturverzeichnis.....	135
	Anhang	145

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktureller Aufbau der Arbeit	3
Abbildung 2: Darstellung einer Getränkeabfüllanlage für Mehrweg-Glasflaschen.....	5
Abbildung 3: Flussdiagramm einer Mehrweg-Getränkeabfüllanlage	10
Abbildung 4: Darstellung eines Scharnierbandkettenförderers.....	11
Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad der Abfüllanlage, Pufferzeit und MTTR.....	13
Abbildung 6: Zustände auf einem Anti-Starve-Puffer (links) und einem Anti-Block- Puffer (rechts) bei einem Ausfall der vorgeschalteten Maschine (links) bzw. der nachgeschalteten Maschine (rechts).....	15
Abbildung 7: Darstellung der Anordnung von Flaschen in der dichtesten Zylinderpackung.....	16
Abbildung 8: Stauschalter zur Erfassung des Belegungszustands eines Behältertransporteurs	18
Abbildung 9: V-Diagramm nach Berg zur Darstellung der Ausbringungsabstufung der einzelnen Maschinen einer Getränkeabfüllanlage.....	20
Abbildung 10: Skizze eines dreiteiligen Transporteurs mit angebrachten Stauschaltern	21
Abbildung 11: Varianten von Behältertransporteuren mit Pufferwirkung.....	24
Abbildung 12: Speichertisch, der mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrieben wird.....	25
Abbildung 13: Speichertisch mit variabler Länge und Umlenkung der Behälter.	26
Abbildung 14: Schematische Darstellung einer drucklosen Zusammenführung von Behältern.	27
Abbildung 15: Wellenformierer zur Überleitung eines einsträngigen in einen mehrsträngigen Behälterstrom	27
Abbildung 16: Frequenzbewertung des A- und C-Filters nach DIN EN 61672-1.....	32
Abbildung 17: Darstellung des betrachteten Maschine-Puffer-Maschine-Systems.....	35
Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Systems mit N+1 Pufferabschnitten und den Anlagenparametern.....	37
Abbildung 19: Schallemissionen von NRW-Flaschen, die bei den aufgeführten Geschwindigkeiten auf ein stehendes Ende eines Flaschenpulks prallen.	41
Abbildung 20: Versuchsstrecke mit den Positionen der Stauschalter Stau_1 bis Stau_6.....	42

Abbildung 21: Skizze des betrachteten Systems mit jeweils einem Transportbandabschnitt für Ein- und Auslauf und einem mittleren Transportbandabschnitt	50
Abbildung 22: Betriebszustände des betrachteten Maschine-Puffer-Maschine-Systems	51
Abbildung 23: Flowchart des Hauptprogramms	51
Abbildung 24: Schematische Abbildung des Systems für einen Anti-Starve-Puffer.....	52
Abbildung 25: Regelkreis für den kontinuierlichen Betrieb des Anti-Starve-Puffers (AS I).....	53
Abbildung 26: Schematische Abbildung des Systems für einen Anti-Block-Puffer.	53
Abbildung 27: Rückstau auf dem Puffer, verursacht durch einen Stillstand der nachgeschalteten Maschine ($q_{out}(t) \leq 0$)	54
Abbildung 28: Flowchart für den Rückstaumodus im Anti-Starve-Betrieb	55
Abbildung 29: Flowchart für den Rückstaumodus im Anti-Block-Betrieb	57
Abbildung 30: Darstellung der Behälterpositionen $x_{1Band}(t)$ und $x_2(t)$ im freien Transport.	58
Abbildung 31: Darstellung der Behälterpositionen $x_{1Pulk}(t)$ und $x_2(t)$. $x_{1Pulk}(t)$ stellt die Position der letzten Flasche des ersten Behälterpulks dar, die sich nun mit Abzugsgeschwindigkeit des Pulks bewegt.....	59
Abbildung 32: Flowchart für den Lückenschlussmodus im Anti-Starve-Betrieb.....	61
Abbildung 33: Hinterer und vorderer Behälterpulk befinden sich auf dem gleichen Transportbandabschnitt, so dass ein Schließen der Lücke nicht möglich ist.	62
Abbildung 34: Der hintere Behälterpulk befindet sich auf einem anderen Transportbandabschnitt wie der vordere, so dass er durch die Regelung gezielt an den vorderen herangeführt werden kann.	63
Abbildung 35: Der hintere Behälterpulk staut sich am Ende des Transporteurs auf, so dass der vordere an diesen herangeführt werden kann.....	64
Abbildung 36: Flowchart für den Lückenschlussmodus im Anti-Block-Betrieb.	65
Abbildung 37: LED-Leiste als Beleuchtungsquelle für den Sensor.....	70
Abbildung 38: Spiegelnde Reflektion des Lichts an der Behältermündung	71
Abbildung 39: Aufnahme einer Flasche auf dem Kettenförderer	71
Abbildung 40: Bildverarbeitung durch die intelligente Kamera zur Behälterzählung im Pulk.....	72
Abbildung 41: Intelligente Kamera zur Behälterzählung im Pulk.....	73
Abbildung 42: Aufbau des von der intelligenten Kamera übertragenen Datenpakets	74

Abbildung 43: CAD-Plan der Pilotanlage.....	75
Abbildung 44: Die Schnittstellen des Transporteurmoduls	79
Abbildung 45: Darstellung des Materialflusses im Transporteurmodul durch Zerlegung in Elemente der Breite x.....	81
Abbildung 46: Die Schnittstellen des Maschinenmoduls	83
Abbildung 47: Die Schnittstellen des Steuerungsmoduls	86
Abbildung 48: Flussdiagramm zur Darstellung des Programmablaufs der Simulation.....	88
Abbildung 49: Aufbau des Simulationsmodells bestehend aus drei Maschinen und zwei Transporteuren mit je drei Transporteurmodulen	89
Abbildung 50: Darstellung der Elemente der Transporteurmodule $T_0.TM_0$ bis $T_0.TM_2$ aus Abbildung 49 90 Sekunden nach Anlauf der vorgeschalteten Maschine M_0	93
Abbildung 51: Darstellung der Elemente der Transporteurmodule $T_0.TM_0$ bis $T_0.TM_2$ aus Abbildung 49 nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine M_1	94
Abbildung 52: Darstellung der Elemente der Transporteurmodule $T_0.TM_0$ bis $T_0.TM_2$ aus Abbildung 49 nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine M_0	94
Abbildung 53: Anfahrverhalten der in Abbildung 49 dargestellten Anlage.	97
Abbildung 54: Verhalten der in Abbildung 49 dargestellten Anlage nach einer 180 s dauernden Störung der vorgeschalteten Maschine M_0	98
Abbildung 55: Verhalten der in Abbildung 49 dargestellten Anlage nach einer 180 s dauernden Störung der nachgeschalteten Maschine M_2	100
Abbildung 56: Time Between Failure einer Flaschenfüllmaschine in Form einer Häufigkeitsverteilung ($\alpha = 0,68$; $\beta = 1334,4$, Koeffizienten aus [159]).....	102
Abbildung 57: Down Time einer Flaschenfüllmaschine in Form einer Häufigkeitsverteilung ($\alpha = 0,80$; $\beta = 57,2$, Koeffizienten aus [159]).....	103
Abbildung 58: Anfahrverhalten der Sollfüllung (550 Fl.) bei zuvor komplett leerem Puffer	104
Abbildung 59: Verhalten bei Überschreitung der Sollfüllung (550 Fl.) durch eine 30- sekündige Störung der nachgeschalteten Maschine	105
Abbildung 60: Verhalten bei Unterschreitung der Sollfüllung (550 Fl.) durch eine 30- sekündige Störung der vorgeschalteten Maschine	106
Abbildung 61: Anfahrverhalten der fünfstufigen und der stufenlosen Regelung bei zuvor leerem Transporteur	108
Abbildung 62: Verhalten der fünfstufigen und der stufenlosen Regelung bei einer Störung der nachgeschalteten Maschine M_1	110

Abbildung 63: Auswirkung der Variation der MTBF der vorgeschalteten Maschine M_0 auf den Wirkungsgrad	113
Abbildung 64: Auswirkung der Variation der MDT der vorgeschalteten Maschine M_0 auf den Wirkungsgrad	113
Abbildung 65: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variation der MTBF der Maschine M_0 , bei konstanter MDT von 150 s. ($n = 10, \alpha = 0,05$)	114
Abbildung 66: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variation der MDT der Maschine M_0 , bei konstanter MTBF von 400 s. ($n = 10, \alpha = 0,05$)	114
Abbildung 67: Auswirkung der Variation der MTBF der nachgeschalteten Maschine M_2 auf den Wirkungsgrad	117
Abbildung 68: Auswirkung der Variation der MDT der nachgeschalteten Maschine M_2 auf den Wirkungsgrad	117
Abbildung 69: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variation der MTBF der Maschine M_2 , bei konstanter MDT von 150 s. ($n = 10, \alpha = 0,05$)	118
Abbildung 70: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variation der MDT der Maschine M_2 , bei konstanter MTBF von 400 s. ($n = 10, \alpha = 0,05$)	118
Abbildung 71: Auswirkung der Variation der Einstellausbringung der dem Zentralaggregat vor- bzw. nachgeschalteten Maschinen.	120
Abbildung 73: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variiert wurde die Einstellausbringung der vor- und nachgeschalteten Maschinen. ($n = 10, \alpha = 0,05$)	120
Abbildung 73: Auswirkung der Variation der Dimensionierung der Versuchsstrecken bei konstanter Kapazität.	122
Abbildung 75: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung bei Variation der Länge der Versuchsstrecken. ($n = 10, \alpha = 0,05$)	122
Abbildung 75: Darstellung der Versuchsstrecke mit verwendeten Sensoren.	124
Abbildung 76: Schalldruckpegel, basierend auf den Messungen während des störungsfreien Betriebs der Versuchsanlage.	125
Abbildung 77: Schalldruckpegel, basierend auf den Messungen nach einer 30 s dauernden Störung der nachgeschalteten Maschine.....	126
Abbildung 78: Diagramme, basierend auf den Messungen nach einer 30 s dauernden Störung der vorgeschalteten Maschine.	127

Abkürzungsverzeichnis

AB	Anti-Block
AS	Anti-Starve
BDE	Betriebsdatenerfassung
CAD	Computer-Aided Design
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	central processing unit
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLZ	Drucklose Zusammenführung (von Behältern)
DSAM	Datenverarbeitendes Sensor-Aktor-Modul
DT	Down Time
EHEDG	European Hygienic Engineering and Design Group
EU	Europäische Union
FILO	first in last out
Fl.	Flaschen
FPGA	Field Programmable Gate Array
fps	frames per second
LED	light-emitting diode
MDT	Mean Down Time
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time to Repair
PET	Poly(ethylenglykoltterephthalat)
ROI	Region of Interest
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

Stau_1, Stau_2, ...	Stauschalter 1, 2, ...
TBF	Time Between Failure
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TPM	Total Productive Maintenance

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

A	Fläche	m^2
b	Breite des Behälterstroms	m
B(t)	Pufferfüllung	
B _{set}	Sollfüllung des Puffers	
c	Schallgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
C	Pufferkapazität	
c _{in}	Faktor zur Anpassung der Transporteurgeschwindigkeit an die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine	
c _{out}	Faktor zur Anpassung der Transporteurgeschwindigkeit an die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine	
d	Durchmesser der eingesetzten Behälter	m
Δt	Zeitschrittweite der Simulation	s
Δv_{slip}	Wert zur Erhöhung der Geschwindigkeit auf dem Auslaufband	$m\ s^{-1}$
$\Delta v_{tailback}$	Faktor zur Erhöhung der Transportbandgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
dB(A)	Schalldruckpegel A-bewertet	
e	Abstand der Mittelpunkte der Behältermündungen in der dichtesten Zylinderpackung	m
η	Wirkungsgrad	
f(t)	Ausfalldichte	
F(t)	Ausfallverteilungsfunktion	
Fl./h	Flaschen pro Stunde	h^{-1}
h(t)	Ausfallrate	
Hz	Hertz	s^{-1}
I	Schallintensität	$W\ m^{-2}$

i	Indexvariable	
K	Kelvin	
L	Gesamtlänge des Transporteurs	m
l_0, \dots, l_{N+1}	Längen der einzelnen Transporteurabschnitte	m
$L_{EX, 8h}$	Tageslärnexpositionspegel während einer achtstündigen Schicht	dB
L_p	Schalldruckpegel	dB
λ	Wellenlänge	m
M	Maschinenmodul	
M_1, M_2, \dots	Maschine 1, 2, ...	
n	Indexvariable	
n_B	kritische Füllung eines Transporteurs, oberhalb der die vorgeschalteten Maschine abgeschaltet werden muss	
n_{crit}	kritische Füllung eines Transporteurs, unterhalb der ein Stillstand der nachgeschalteten Maschine nicht mehr verhindert werden kann	
n_s	Mindestmenge an Behältern, die für einen Betrieb der nachgeschalteten Maschine notwendig ist	
v	Schallschnelle	$m\ s^{-1}$
p	Faktor zur Beeinflussung des Regelverhaltens der Anlage	
p_0	Hörschwelle des Menschen	Pa
P	Schalleistung	W
Pa	Pascal	
q_{in}	Ausbringung der vorgeschalteten Maschine	h^{-1}
$q_{in}(t)$	Ausbringung der vorgeschalteten Maschine	h^{-1}
q_{in_max}	Einstellausbringung der vorgeschalteten Maschine	h^{-1}

$q_{in_set}(t)$	Sollwert für die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine	h^{-1}
q_{out}	Ausbringung der nachgeschalteten Maschine	h^{-1}
$q_{out}(t)$	Ausbringung der nachgeschalteten Maschine	h^{-1}
q_{out_max}	Einstellausbringung der nachgeschalteten Maschine	h^{-1}
$q_{out_set}(t)$	Sollwert für die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine	h^{-1}
$R(t)$	Zuverlässigkeitsfunktion	
ρ	Dichte	$kg\ m^{-3}$
T	Transporteur	
TM	Transporteurmodul	
t_p	Pufferzeit	s
$t_{Stillstand}$	Zeitpunkt des Stillstands der Maschine	s
t_T	Puffertotzeit	s
t_v	Einschaltverzögerung	s
v	Geschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
v_{Band}	Transportbandgeschwindigkeit	$m\ s^{-1}$
$v_{in}(t)$	Geschwindigkeit des ersten Pufferabschnitts	$m\ s^{-1}$
$v_{in_set}(t)$	Sollwert für die Geschwindigkeit des ersten Pufferabschnitts	$m\ s^{-1}$
$v_n(t)$	Geschwindigkeit des Pufferabschnitts n	$m\ s^{-1}$
$v_{n_set}(t)$	Sollwert für die Geschwindigkeit des Pufferabschnitts n	$m\ s^{-1}$
$v_{out}(t)$	Geschwindigkeit des letzten Pufferabschnitts	$m\ s^{-1}$
$v_{out_set}(t)$	Sollwert für die Geschwindigkeit des letzten Pufferabschnitts	$m\ s^{-1}$
x	Breiter der Elemente der Transporteurmodule	
$x_1(t)$	Position der letzten Flasche des vorderen Behälterstroms	m

$x_{1\text{Band}}(t)$	Berechnetes Pulkende, für den Fall, dass sich die Behälter im freien Transport befinden	m
$x_{1\text{Pulk}}(t)$	Berechnetes Pulkende, für den Fall, dass alle Behälter in den Pulk übergegangen sind	m
$x_2(t)$	Position der ersten Flasche des hinteren Behälterstroms	m
Z	Schallkennimpedanz	N s m^{-3}

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Verpacken von Gütern speziell im Bereich der Lebensmittelindustrie ist ein mehrstufiger Prozess. Ein Packgut durchläuft dabei viele Produktionsschritte, bis es als verkehrsfähige Packung in den Handel kommt. Dementsprechend ist eine Getränkeabfüllanlage, die eine Spezialform der Verpackungsanlagen darstellt, aus einer Vielzahl von Einzelaggregaten aufgebaut. Diese führen die einzelnen Produktionsschritte vom Packgut (Getränk) und Packmittel (z. B. Flasche) über die Packung (z. B. abgefüllte Flasche) bis hin zur Ladeinheit (z. B. Palette) durch [36]. Ihr Aufbau kann dabei je nach Anforderung stark variieren. Allen Anlagen gemein ist allerdings der zentrale Prozessschritt, das Abfüllen des Getränks in eine Verpackung. Auf diesen Prozessschritt werden in der Regel alle vor- und nachgeschalteten Schritte abgestimmt (einige Ausnahmen sind in Kapitel 2.1.3.3 erwähnt). Dies hat mehrere Gründe: So sollte der Abfüllprozess nicht unterbrochen werden, um qualitative Einbußen des Packguts zu verhindern. Hierzu kann es durch Gasaustausch mit der umgebenen Atmosphäre kommen. Durch die Umgebungsluft können schädliche Mikroorganismen [7], [13] oder Sauerstoff eingetragen werden. Die Mikroorganismen können zu mikrobiellen Verderb führen, der Sauerstoff zur Oxidation von Inhaltsstoffen, wie z. B. Farb- oder Aromastoffen [4], [127]. Neben diesem aus qualitativer Sicht problematischen Aspekt führen Stillstände an der als Zentralaggregat definierten Flaschenfüllmaschine auch zu direkten wirtschaftlichen Einbußen. Diesen Einfluss verdeutlicht Voigt [159] in einer Beispielrechnung. In dieser zeigt er für eine Getränkeabfüllanlage mittlerer Größe (36.000 Flaschen pro Stunde) ein Einsparpotential von über 50.000 € pro Jahr auf unter der Voraussetzung, dass der Ausnutzungsgrad und damit die Laufzeit der Flaschenfüllmaschine um ein Prozent gesteigert werden kann. Vor dem Hintergrund, dass die Abfüllung und Verpackung von Getränken am Beispiel einer Brauerei fast ein Drittel der Produktionskosten ausmacht [63], ergeben sich gerade in diesem Bereich der Produktion große Einsparpotentiale.

Dem Materialfluss zwischen den Maschinen kommt in Hinblick auf die Effizienz der Anlage eine zentrale Bedeutung zu. Nur durch einen sowohl auf das zu transportierende Gut, als auch auf die verarbeitenden Maschinen abgestimmten Materialtransport ist ein effizienter Betrieb der Anlagen möglich. Den Transporteuren kommt dabei nicht nur die Aufgabe zu, den Materialfluss sicher zu stellen, sondern auch die Funktion als Puffer zur Entkopplung der Maschinen (siehe z. B. [108]). Dies gilt im besonderen Maße für die der Flaschenabfüllmaschine vor- und nachgeschalteten Flaschentransporteure. Sie sind so dimensioniert, dass sie neben dem für den Transport der Flaschen nötigen Platz weitere Fläche zur Verfügung stellen, um Flaschen aufnehmen bzw. abgeben zu können. Durch diese Auslegung können bei richtiger Wahl der Füllung der Transporteure Störungen der vor- und nachgeschalteten Maschinen überbrückt werden und somit die oben beschriebenen negativen qualitativen und wirtschaftlichen Einflüsse minimiert werden.

Neben der nachweislich höheren Effizienz der Anlage durch die Transportstrecken [122] weist ihr Betrieb aber auch Nachteile auf. So fallen Kosten für deren Anschaffung, Betrieb

und Wartung an. Nicht zu unterschätzen ist hierbei auch der zusätzliche Platzbedarf, der für die Transporteinrichtungen mit Pufferfunktion anfällt. Daher sollten die Puffer nur so groß dimensioniert werden wie nötig. Ein weiteres Problem ist die Lärmemission der Transporteure, die speziell bei einem Betrieb der Anlage mit Glasflaschen auftritt. In diesen Anlagen stellen die Transporteure einen der Hauptlärmemittenten dar. Die Lärmemission ist besonders kritisch vor den im Jahr 2007 in Kraft getretenen strengeren gesetzlichen Vorgaben zum Schutz von Arbeitnehmern vor „Gefährdungen durch Lärm“ [156] zu sehen. Diese Verordnung geht auf eine Richtlinie der EU aus dem Jahre 2003 zurück [47], die deutlich niedrigere Lärmexpositionspegel als zuvor am Arbeitsplatz vorschreibt. Mit dieser Richtlinie folgt die EU einem Trend speziell in den Industriestaaten, die die Lärmbelastung am Arbeitsplatz auf ähnliche Werte beschränken [58].

Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Weg zur lärmarmen und gleichzeitig effizienten Regelung der Behältertransporteure in Getränkeabfüllanlagen aufzuzeigen. Dieser soll es ermöglichen, die neuen gesetzlichen Anforderungen in Bezug auf den Schutz der Arbeitnehmer vor Lärmimmissionen einzuhalten und somit den Arbeitnehmer effektiv vor gesundheitlichen Folgen, wie Lärmschwerhörigkeit zu schützen. Außerdem gilt es die Anlageneffizienz mindestens zu erhalten, nach Möglichkeit aber weiter zu verbessern, da diese einen großen Einfluss auf die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit getränkeproduzierender und –abfüllender Betriebe hat [63]. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei auf der Entwicklung einer lärmarmen Regelungsstrategie, die im Hinblick auf die Schallemissionen der Behältertransporteure im Betrieb, als auch auf ihre Auswirkungen auf die Anlageneffizienz untersucht wird. Als Referenzmodell diene dabei eine stauschalterbasierte Regelung von Behältertransporteuren, wie sie heute Stand der Technik in industriell genutzten Anlagen ist.

Die zweigeteilte Zielsetzung der Arbeit, in Lärmreduktion auf der einen und Effizienzsteigerung/-erhalt auf der anderen Seite, spiegelt sich in deren Aufbau wieder (siehe Abbildung 1). Zum einen wurde ein Algorithmus zur stufenlosen Regelung von Behältertransporteuren inklusive der dazu notwendigen Sensorik entwickelt und an einer Versuchsanlage implementiert und getestet. Zum anderen wurde eine modulare Materialflusssimulation entwickelt, mit der es möglich ist, verschiedene Anlagenkonzepte abzubilden. Sowohl an der Versuchsanlage als auch an der simulierten Anlage wurde die in dieser Arbeit neu entwickelte stufenlose Regelung mit einer stauschalterbasierten Regelung verglichen. Auf Grund der Messung der Schallemissionen an der Versuchsanlage und der Untersuchung des Einflusses auf die Anlageneffizienz mit Hilfe der Simulation unter Beachtung verschiedener Rahmenparameter (Dimensionierung der Transporteure und Maschinen, Variation des Störverhaltens der Maschinen, ...) konnte eine Strategie erarbeitet werden, die an industriellen Anlagen umgesetzt werden kann. Diese erlaubt es, die beiden in der Zielstellung formulierten Anforderungen der Lärmreduktion bei gleichzeitiger Steigerung der Anlageneffizienz zu erreichen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Struktur der Arbeit im Überblick.

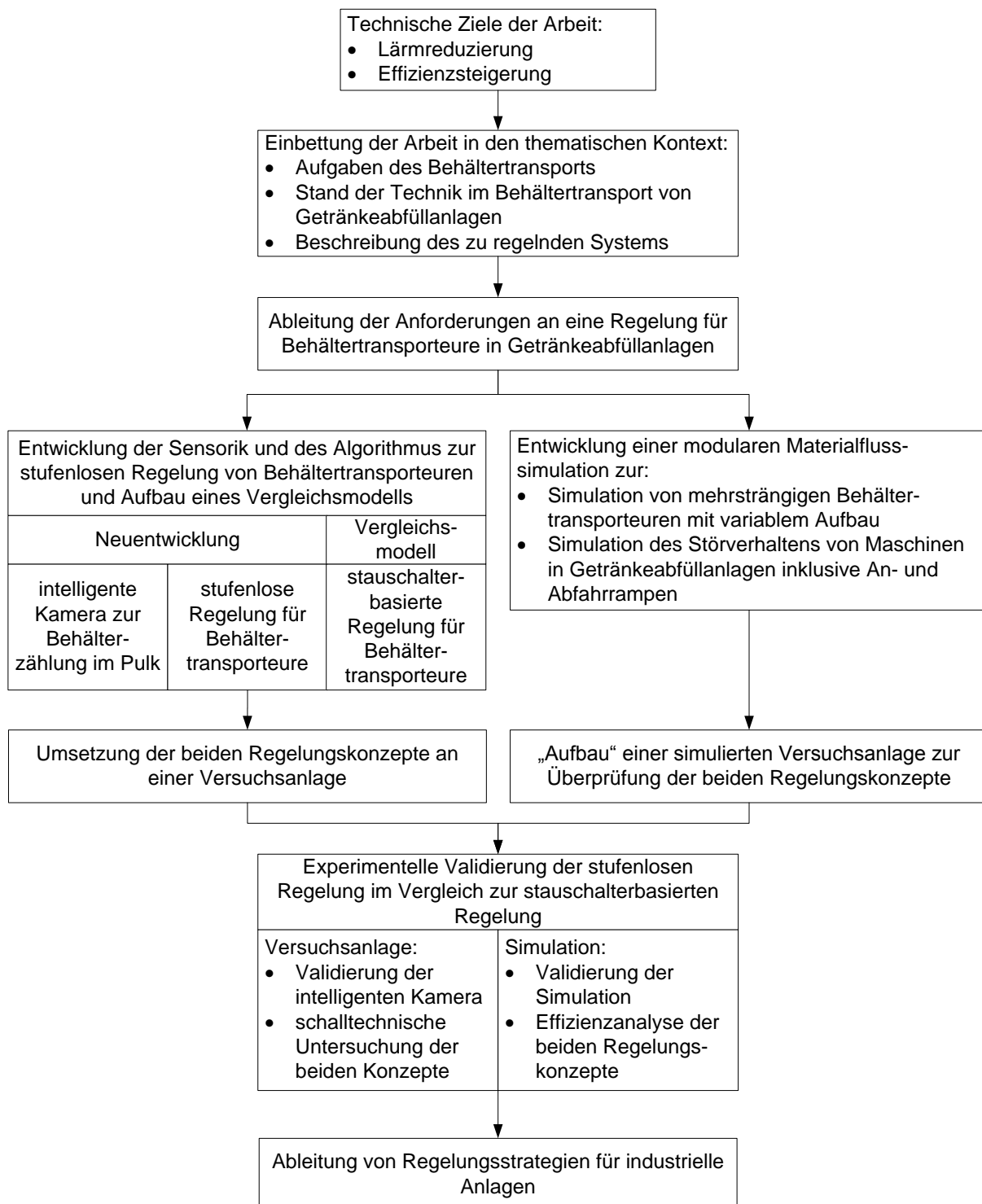


Abbildung 1: Struktureller Aufbau der Arbeit

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Getränkeabfüllanlagen

Getränkeabfüllanlagen bestehen aus einer Vielzahl von Spezialmaschinen, die mit Hilfe von Transporteuren zu einem komplexen Netzwerk zusammengeschaltet werden. In diesem Kapitel soll der Aufbau von Getränkeabfüllanlagen erläutert und auf die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Komponenten eingegangen werden. Im Vordergrund steht dabei das Zusammenwirken der Komponenten.

Die im Folgenden verwendeten Begriffe und Kennzahlen entstammen der DIN 8782 [30] und DIN 40041 [32]. Die Begriffe für die einzelnen Maschinen entsprechen der Nomenklatur nach DIN 8784 [33].

2.1.1 Aufbau von Getränkeabfüllanlagen

Je nach Anforderung an das Endprodukt kann der Aufbau von Getränkeabfüllanlagen sehr stark variieren. Er reicht von linearen Anlagen bei der Verwendung von Einwegverpackungen bis hin zu Anlagen mit drei Materialkreisläufen bei der Abfüllung und Verpackung von Mehrwegbehältern und –gebinden. Die Operationen der einzelnen Maschinen und Anlagen können sich dabei ebenfalls stark unterscheiden. Lediglich der zentrale Prozessschritt, das Abfüllen des Produktes in ein Behältnis, ist allen Anlagen gemein. Exemplarisch ist in Abbildung 2 eine Mehrwegglas-Abfüllanlage dargestellt, die eine der komplexesten vorkommenden Anlagentypen darstellt. Diese soll in ihrem Aufbau und Materialfluss zur Verdeutlichung der Aufgabenstellung dieser Arbeit kurz dargestellt werden.

Zu erkennen sind die drei Materialkreisläufer der Anlage, die farblich gekennzeichnet sind. Sie unterteilen sich in den Kreislauf für Paletten (violett), Gebinde (grün) und Flaschen (ockerfarben).

Der Palettenkreislauf (violett) ist der kürzeste dieser Kreisläufe. Er beginnt bei der Palettenaufgabe, führt über die Palettenentlademaschine, eine optionale Palettenkontrolle, die Palettenbelademaschine, zu einem Binder und schließlich zu einer Schnittstelle zur Intralogistik des Betriebes, der Palettenabgabe. In der Palettenentlademaschine werden die Kästen, in denen sich die Flaschen befinden, von den Paletten gestapelt. Die Palette läuft anschließend durch eine optionale Palettenkontrolle. Diese überprüft, ob die Palette intakt ist und weiter verwendet werden kann. Ist dies der Fall, gelangt die Palette meist in ein Palettenmagazin, in dem sie zwischengelagert wird, bis sie wieder gebraucht wird. Das Palettenmagazin dient als Puffer zwischen der Palettenentlade- und Palettenbelademaschine und entkoppelt diese. Verlässt die leere, intakte Palette das Palettenmagazin, wird sie in der Palettenbelademaschine erneut mit befüllten Kästen beladen. Zur Stabilisierung dieser Transportverpackung wird ein Umreifungsband oder eine Folie um die oberste Lage gewickelt, um die gesamte Einheit vor Verrutschen oder Kippen beim Transport zu sichern.

Die Palettenabgabe erfolgt meist an einen Gabelstapler. Sie kann aber auch direkt an ein Lager oder eine Kommissionieranlage angebunden werden.

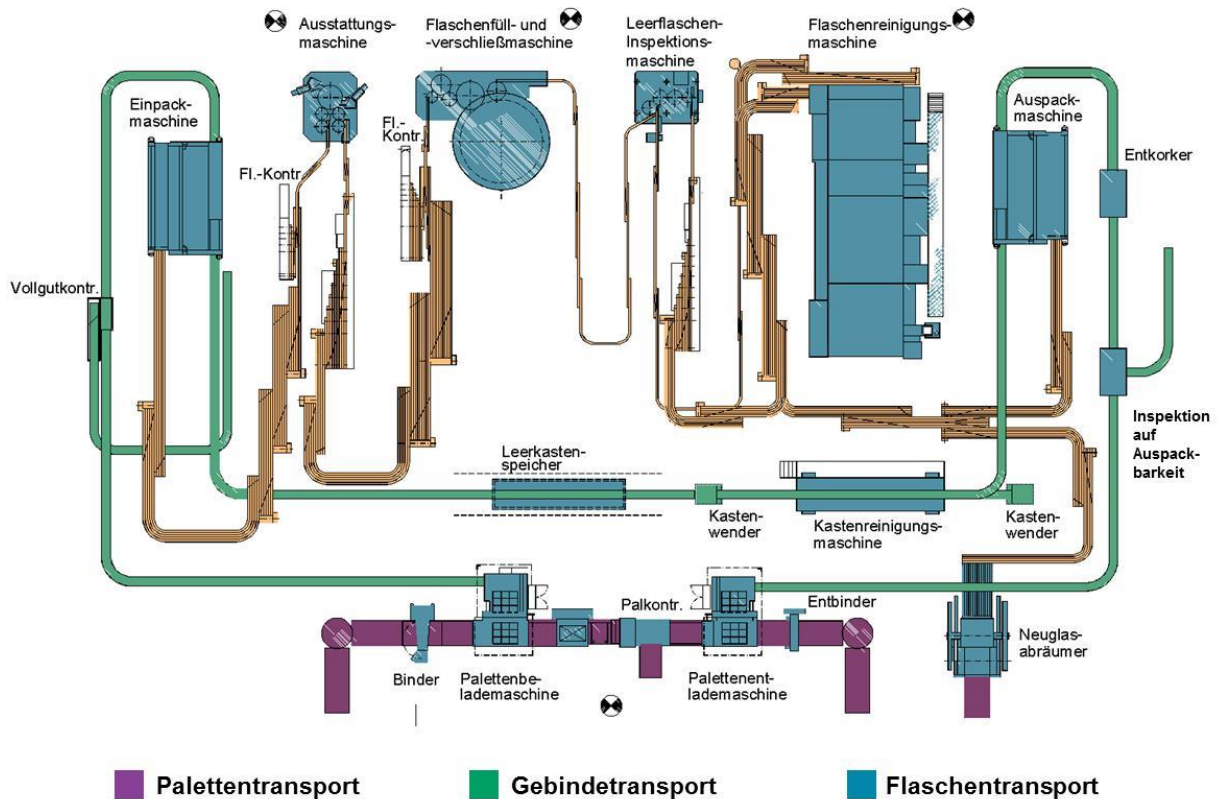


Abbildung 2: Darstellung einer Getränkeabfüllanlage für Mehrweg-Glasflaschen [158]

Der Kasten- oder Gebindekreislauf (grün) beginnt bei der Palettenentlademaschine. Die abgestapelten Kästen verlassen die Maschine einbahnig und werden bei heutigen Anlagen meist durch eine Kastenkontrolle gefahren. Diese überprüft die Kästen mindestens auf Auspackbarkeit, meist aber auch auf Fremdflaschen, defekte oder fremde Kästen, die nicht in die Anlage gelangen sollen. Ist der Kasten nicht auspackbar, weil beispielsweise Fremdkörper auf den Flaschen liegen oder befinden sich Fremdflaschen in den Kästen, wird dieser in eine Sortieranlage oder Handsortierung gefahren. Aus dieser gelangt er nach Beseitigung der Mängel zurück in die Anlage. Nach der Gebindekontrolle fährt der Kasten - je nach Flaschensorte - durch einen Entkorker und gelangt schließlich zur Auspackmaschine. Die Auspackmaschine entnimmt die Flaschen aus den Kästen. Die nun leeren Kästen fahren durch eine Kastenreinigungsmaschine. Anschließend können die Kästen in einem Kastenmagazin zwischengelagert werden. Dieses hat die gleiche Aufgabe, wie das Palettenmagazin, nämlich die vor- und nachgeschalteten Maschinen durch das Zwischenspeichern von Packmitteln zu entkoppeln. Allerdings ist dieses nur in einem Teil der in der Industrie betriebenen Anlagen zu finden. Die nächste Maschine im Kastenkreislauf ist die Einpackmaschine, die die nun gefüllten, verschlossenen und etikettierten Flaschen in die Kästen stellt. Die befüllten Kästen laufen im Anschluss durch eine Vollkastenkontrolle, in der kontrolliert wird, ob alle Gefache

des Kastens gefüllt sind. Nach dieser abschließenden Kontrolle gelangen die Kästen zur Palettenbelademaschine.

Der größte und am schwierigsten zu betreibende Materialkreislauf einer Getränkeabfüllanlage ist der Flaschenkreislauf (ockerfarben) [108]. Er beginnt bei der Auspackmaschine. Durch die Entnahme aus den Kästen gelangen die gebrauchten Flaschen in den Flaschenkreislauf und von hier über Transportbänder zur Flaschenreinigungsmaschine. Nach der Reinigung werden die gereinigten Flaschen durch eine Leerflaschen-Inspektionsmaschine gefahren. Diese kontrolliert die Flaschen auf Verschmutzungen und Beschädigungen. Flaschen, die nicht zur Abfüllung geeignet sind, werden an dieser Stelle ausgeschleust. Alle anderen Flaschen gelangen in die Flaschenfüll- und -verschließmaschine. Dieses aus zwei Maschinen bestehende Aggregat wird meist in geblockter Bauweise gebaut. Bei einigen Flaschentypen (z. B. Bügelverschlussflaschen) finden sich aber auch zwei einzeln aufgestellte, nicht geblockte Maschinen für diese Aufgaben. Nachdem die Flasche befüllt und verschlossen ist, gelangt sie zur Flaschenausstattungsmaschine. In dieser wird die Flasche mit Etiketten ausgestattet. Die nun fertige Primärverpackung wird in der Einpackmaschine in die leeren, gereinigten Kästen gestellt.

Der hier beschriebene Anlagentyp ist ein typisches Beispiel für eine Mehrweg-Glasflaschen-Abfüllanlage, wie sie in vielen Brauereien und Brunnenbetrieben zu finden ist. Der Aufbau kann je nach Anforderung an die Anlage und das abgefüllte Produkt variieren. Allerdings soll dieser Anlagentyp in dieser Arbeit als Referenzmodell dienen. Das bedeutet nicht, dass die erarbeiteten Ergebnisse nicht auch auf andere Anlagentypen anwendbar sind, sondern vielmehr, dass dieser Anlagentyp zur Veranschaulichung der Problemstellung und der Lösungsansätze genutzt werden soll.

Weitere Anlagentypen und die Funktion der einzelnen Maschinen werden in folgenden Standardwerken der Abfüll- und Verpackungstechnik genauer beschrieben [10], [13], [69], [83], [86], [108], [136].

2.1.2 Verkettung störanfälliger Maschinen

Die einzelnen Komponenten oder Maschinen einer Abfüllanlage verfügen über eine gewisse Störanfälligkeit. Das bedeutet, dass die Maschinen in nicht vorhersehbaren Zeitintervallen ausfallen und so durch die Verkettung das Laufverhalten der gesamten Anlage beeinflussen. Dieses Verhalten spielt sowohl bei der Auslegung als auch beim Betrieb der Anlagen eine große Rolle und soll daher hier näher erläutert werden.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Maschinen lässt sich mit Hilfe der in DIN 40041 „Zuverlässigkeit – Begriffe“ [32] definierten Begriffe und Kennzahlen beschreiben. Spezifische Kennzahlen für Abfüllanlagen und einzelne Maschinen sind außerdem in der DIN 8782 [30] definiert. Neben diesen deutschen Industrienormen gibt es international gebräuchlichere Kennzahlensysteme, die an die jeweiligen Bedürfnisse der Branche bzw. des Betriebs, in dem sie eingesetzt werden, angepasst werden können. Zu nennen ist hier vor

allem die „Overall Equipment Effectiveness (OEE)“, die Teil des „Total Productive Maintenance-Konzepts (TPM)“ ist [98]. Hierbei handelt es sich um ein vom Japan Institute of Plant Maintenance erstelltes Konzept zur Erfassung von anlagenbedingten Kennzahlen und zur Verbesserung der Anlagen- und Produktqualität. Dieses Konzept hat sich international im Bereich der Abfülltechnik durchgesetzt und wird von vielen Betreibern von Abfüllanlagen umgesetzt.

Die Bedeutung der für diese Arbeit wichtigen Kennzahlen und Begriffe, die der DIN 40041 entnommen sind, soll in der Folge kurz erläutert werden [32]:

Störungsdauer (englisch: down time):

Als Störungsdauer (Down Time = DT) ist der Zeitraum definiert, in dem die Maschine ihre Aufgabe nicht oder nur fehlerhaft erfüllt. In Bezug auf die hier betrachteten Maschinen einer Getränkeabfüllanlage ist eine Störung mit dem Stillstand einer Maschine gleichzusetzen. Dies liegt daran, dass sich die meisten Maschinen in Getränkeabfüllanlagen selbst überwachen. Bei einer fehlerhaften Erfüllung ihrer Aufgabe stellen diese daher ihren Betrieb ein und verlangen zunächst nach einer manuellen Behebung des Fehlers durch den Bediener.

Mittlere Störungsdauer (englisch: mean down time):

Die mittlere Störungsdauer (Mean Down Time = MDT) gibt an, wie lange eine durchschnittliche Störung der betreffenden Maschine dauert. Die MDT muss im laufenden Betrieb einer Anlage für die einzelnen Maschinen entweder experimentell oder automatisch mit Hilfe einer automatischen Betriebsdatenerfassung (BDE) bestimmt werden. Die MDT ist als das arithmetische Mittel aller DTs definiert.¹

Betriebsdauer

Die Betriebsdauer ist der Zeitraum, in dem eine Maschine ihre Aufgabe erfüllen kann. Dieser Zeitraum umfasst bei Getränkeabfüllanlagen auch die Zeiten, in denen die betreffende Maschine auf Grund einer DT einer anderen Maschine nicht arbeiten kann.

Mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen (englisch: mean time between failures):

Die Mittlere Betriebsdauer (Mean Time Between Failure = MTBF) stellt den Mittelwert der Betriebsdauerverteilung zwischen zwei Ausfällen dar. Auch dieser Wert muss für die einzelnen Maschinen experimentell bestimmt werden. Meist geschieht dies, wie bei der Bestimmung der DTs, mit Hilfe eines BDE-Systems. Die mittlere Betriebsdauer ergibt sich wiederum als das arithmetische Mittel aller Zeiten zwischen zwei Ausfällen einer Maschine.

Wirkungsgrad

Mit Hilfe der MDT und der MTBF lässt sich der Wirkungsgrad einer Maschine berechnen. Er ergibt sich nach Formel 2.1 aus der MTBF dividiert durch die Summe von MTBF und MDT.

¹ Anmerkung: Im Rahmen dieser Arbeit werden die MDT und die Mean Time to Repair (MTTR) synonym verwendet.

$$\eta = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MDT}} \quad 2.1$$

Neben dem Wirkungsgrad einer Maschine oder der Anlage gibt es viele weitere Kennzahlen, die beispielsweise berücksichtigen, ob eine Störung anlagebedingt oder anlagefremd zu werten ist sowie Neben- und Stillstandszeiten der Anlage mit erfassen. Auf diese soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, jedoch sei auf die Literatur verwiesen, in der die entsprechenden Definitionen zu finden sind [30], [98].

2.1.2.1 Verteilungen zur Beschreibung des Ausfallverhaltens

Mit Hilfe der erläuterten Zeitbegriffe lässt sich die für die Berechnung der Anlageneffizienz wichtige Gesamtdauer der Ausfallzeiten bestimmen, jedoch lässt sich so noch keine Aussage über die exakte zeitliche Verteilung der Ausfälle angeben. Hierzu ist es notwendig, das Ausfallverhalten in Form von Störzeitverteilungen anzugeben.

Ausfallverteilungsfunktion

Die Ausfallverteilungsfunktion gibt Auskunft darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit P eine Maschine im betrachteten Zeitraum T zum Zeitpunkt t ausfällt. Der betrachtete Zeitraum ist bei der Maschine einer Abfüllanlage im Allgemeinen die Betriebszeit oder der betrachtete Versuchszeitraum.

$$F(t) = P(T \leq t) \quad 2.2$$

Ausfalldichte

Die Ausfalldichte f ist die Ableitung der Ausfallverteilungsfunktion nach der Zeit. Sie gibt an, wie oft eine Maschine im betrachteten Zeitraum ausfällt.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad 2.3$$

Zuverlässigkeitsfunktion

Die zur Ausfallverteilungsfunktion komplementäre Funktion ist die Zuverlässigkeitsfunktion R , die Aussage darüber gibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit die betrachtete Maschine zum Zeitpunkt t arbeitet.

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad 2.4$$

Ausfallrate

Die Ausfallrate h gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Maschine im Zeitraum $[t; t+dt]$ ausfällt, wobei sie zum Zeitpunkt t noch nicht ausgefallen ist.

$$h(t) = \frac{P(t < T \leq t + dt | T > t)}{dt} \quad 2.5$$

Sie ist somit ein Maß für die Neigung der Maschine auszufallen. Je kleiner die Ausfallrate, desto zuverlässiger arbeitet die Maschine.

Sämtliche oben beschriebenen Funktionen können in der Regel nur experimentell für den Einzelfall ermittelt werden. Dies haben Tsarouhas in den Artikeln [152] und [153] sowie Voigt in der Arbeit [159] für Getränkeabfüllanlagen getan. Sie untersuchten dabei, ob sich die oben beschriebenen Verteilungen für das Ausfallverhalten von Maschinen in Getränkeabfüllanlagen mit Hilfe von mathematischen Funktionen darstellen lassen.

Voigt kam hierbei zu dem Ergebnis, dass sich hierzu insbesondere die Exponentialverteilung und die Weibullverteilung eignen, wobei die Weibullverteilung, bis auf einige wenige Ausnahmen, die etwas besseren Übereinstimmungen lieferte. Die beiden Funktionen sollen hier kurz dargestellt werden und der Zusammenhang mit den oben erwähnten Zeitbegriffen MTBF und MDT hergestellt werden:

Exponentialverteilung:

Die oben definierten Parameter lassen sich in Form einer Exponentialverteilung wie folgt darstellen:

$$\text{Ausfallrate:} \quad h(t) = \frac{1}{\beta} \quad 2.6$$

$$\text{Ausfallverteilungsfunktion:} \quad F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\beta}} \quad 2.7$$

$$\text{Ausfalldichte:} \quad f(t) = \frac{1}{\beta} \cdot e^{-\frac{t}{\beta}} \quad 2.8$$

$$\text{Zuverlässigkeitsfunktion:} \quad R(t) = e^{-\frac{t}{\beta}} \quad 2.9$$

Der Parameter β entspricht dabei der MTBF bzw. der MDT, je nachdem, welches Zeitverhalten der Anlage betrachtet wird.

Weibullverteilung:

Die Weibullverteilung stellt eine Erweiterung der Exponentialverteilung für zeitlich veränderte Ausfallraten dar. Sie kann zur Beschreibung von steigenden ($\alpha > 1$) und fallenden ($\alpha < 1$) Ausfallraten verwendet werden. Die Exponentialverteilung stellt dabei einen Spezialfall der Weibullverteilung dar ($\alpha = 1$). Die Weibullverteilung ist nach Voigt [159] besser für die Beschreibung des Ausfallverhaltens von Maschinen in Getränkeabfüllanlagen geeignet, da sie sich durch den Parameter α besser an das experimentell bestimmte Verhalten der Maschinen anpassen lässt.

Ausfallverteilungsfunktion:
$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad 2.10$$

Ausfalldichte:
$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad 2.11$$

Zuverlässigkeitsfunktion:
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad 2.12$$

Mit Hilfe der beiden Funktionen lässt sich das Ausfallverhalten mathematisch darstellen. Dies ist speziell bei der Simulation von Maschinen bzw. Gesamtanlagen wichtig, um ein möglichst realistisches Betriebsverhalten darzustellen.

2.1.3 Aufbau, Einsatz und Betrieb von Behältertransporteuren

Transporteure sind nahezu zwischen alle Maschinen einer Abfüllanlage geschaltet (siehe Abbildung 3). Ihre Aufgabe ist es, den Materialtransport zwischen den einzelnen Maschinen sicherzustellen und so ein Zusammenwirken dieser zu ermöglichen. Neben dieser Aufgabe kommt speziell den Behältertransporteuren eine weitere wichtige Aufgabe zu. Sie dienen der Entkopplung der einzelnen Maschinen und verhindern so den Stillstand der gesamten Anlage bei Störungen an einzelnen Maschinen. Dieser Punkt ist besonders vor dem im Kapitel 2.1.2 erläuterten Hintergrund der Störanfälligkeit der einzelnen Maschinen von Bedeutung.

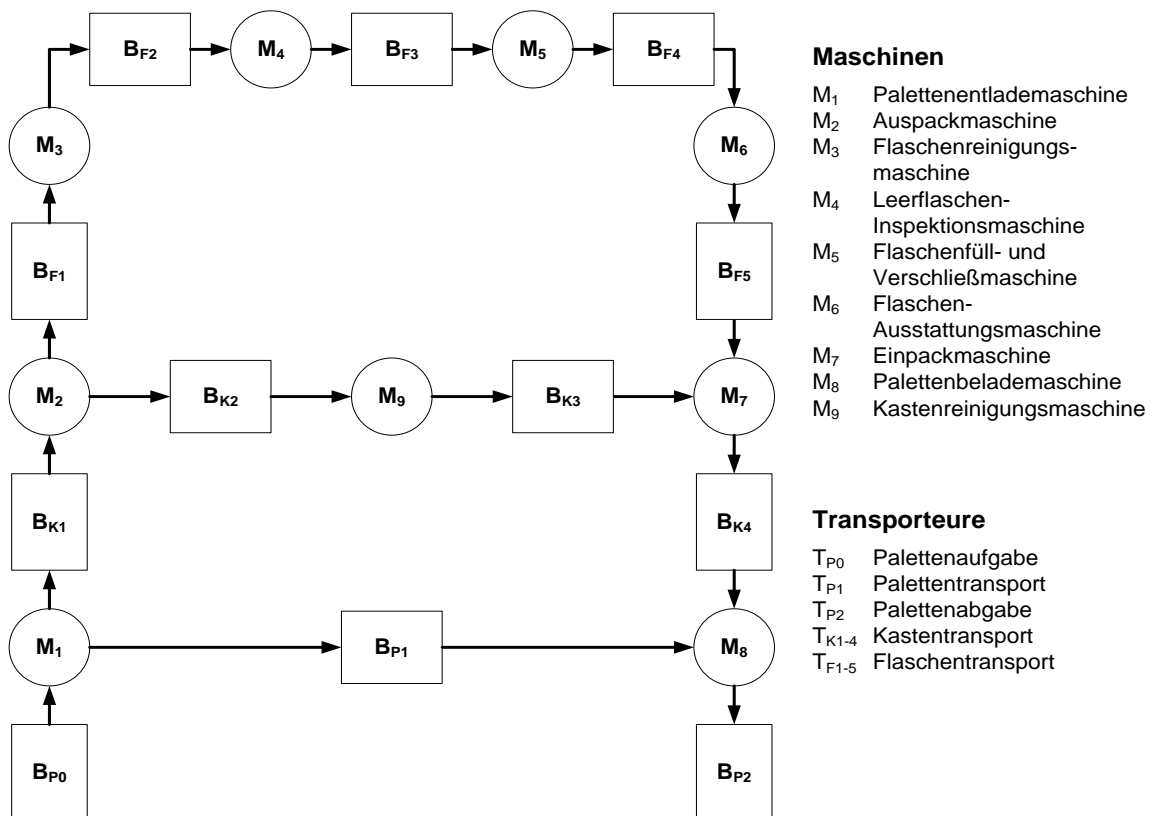


Abbildung 3: Flussdiagramm einer Mehrweg-Getränkeabfüllanlage ([159] modifiziert)

Die Transportbänder sind dabei meist als Bandförderer ausgeführt. Sie bestehen aus meist metallischen Flachketten, die die Behälter transportieren. Die Ketten werden auf Gestellen geführt und von Elektromotoren angetrieben. Die Flaschen selbst werden durch Geländer auf den Transporteuren geführt (siehe Abbildung 4). Die Pufferwirkung wird durch die Speicherfähigkeit der Transporteure erzielt. Das bedeutet, sie können je nach Füllung Flaschen aufnehmen oder abgeben und so Störungen der vor- bzw. nachgeschalteten Maschinen überbrücken.

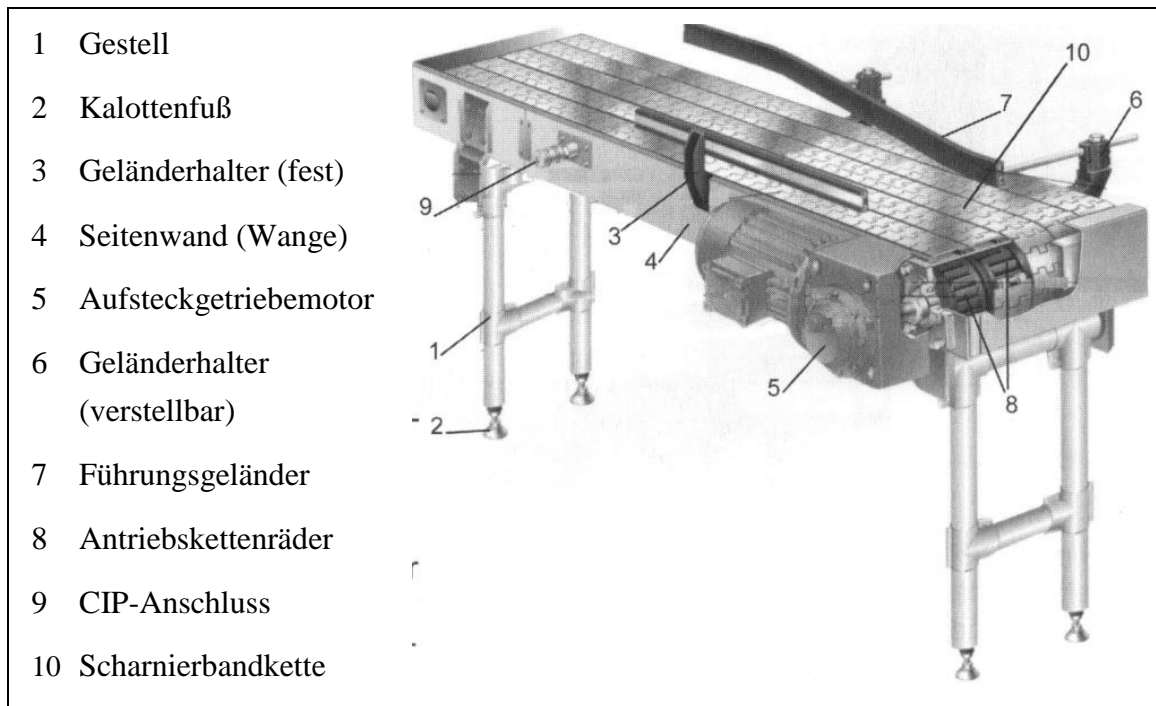


Abbildung 4: Darstellung eines Scharnierbandkettenförderers [86]

Dabei kommen im Bereich der Flaschenpuffer in erster Linie Parallelspeicher zum Einsatz. Das bedeutet, dass nur ein Teil des Transporteurs mit Behältern belegt ist. Der leere Bereich steht im Fall von Störungen als Speicher zu Verfügung. Die Flaschen schieben sich durch den Rückstau parallel zur Transportrichtung auf den unbelegten Bereich des Transporteurs, wodurch die Pufferwirkung entsteht. Neben den Parallelspeichern gibt es noch einige andere Puffersysteme, die in der Praxis im Einsatz sind. Diese werden in Kapitel 2.1.3.4 kurz vorgestellt.

2.1.3.1 Einsatz von Puffern zur Effizienzsteigerung von Anlagen

Jafari und Shanthikum formulieren die Notwendigkeit für den Einsatz von Pufferstrecken in verketteten Produktionslinien folgendermaßen [72]: In geblockten Materialflusssystemen führt jeder Stillstand/Störung einer Komponente zum Stillstand des kompletten Systems. Die der gestörten Komponente vorgeschalteten Anlagenteile haben keinen Platz, die verarbeiteten Teile abzugeben und die nachgeschalteten Komponenten werden nicht mehr mit Teilen versorgt. Dies führt zwangsläufig zu Effizienzverlusten des gesamten Systems. Daher werden Puffer nicht nur in Getränkeabfüllanlagen, sondern in vielen industriell genutzten Anlagen,

die aus mehreren Verarbeitungsstationen bestehen, zur Entkopplung der Maschinen genutzt. Auf Grund dieser in industriellen Prozessen allgegenwärtigen Problematik finden sich zahlreiche Arbeiten zu diesem Thema, auf die an dieser Stelle näher eingegangen werden soll. Dabei stellen sich immer die gleichen Fragen:

- Wann macht der Einsatz von Puffern Sinn?
- Wie muss der Puffer dimensioniert werden?
- Wo sollten die Puffer installiert werden?

Die Fragen lassen sich nicht pauschal beantworten. Die Lösung für jede Anlage bzw. Anlagenkonstellation muss individuell gefunden werden und hängt von einer Vielzahl von Randbedingungen ab. Dies macht es schwierig oder gar unmöglich, die Problemstellung mathematisch exakt zu lösen. Daher finden sich eine Vielzahl an Artikeln, in denen Ansätze zur simulationsgestützten Lösung des Problems vorgestellt werden. So wird in [64] ein genetischer Algorithmus vorgestellt, der auf Basis einer ereignisdiskreten Simulation versucht, die oben gestellten Fragen zu beantworten. [6] bezieht in seinen Betrachtungen auch wirtschaftliche Faktoren mit ein. Duffie [46] beschreibt einen mathematischen Ansatz zur Auslegung und zum Betrieb von verketteten Produktionslinien, der auch die Regelung der Anlage miteinbezieht. Rädler entwickelt in seinen Veröffentlichungen [122], [123] und [124] genau wie Glebe [54] spezielle Ansätze für Getränkeabfüllanlagen. [23], [49], [61], [62], [65], [87] gehen dem Problem mit Hilfe von Simulationsmodellen von Getränkeabfüllanlagen nach. Darüber hinaus finden sich in [22], [25], [51], [75], [79], [84], [90], [91], [104], [106] und [139] allgemeine mathematische Ansätze für die Lösung dieses Optimierungsproblems.

Hierbei stellt sich meist das Problem, dass das Störzeitverhalten der Maschinen nicht oder nur unzureichend bekannt ist. Die Störzeitenverteilung der einzelnen Maschinen ist allerdings nach [21] der Haupteinflussfaktor für die Auslegung von Puffern. Buzacott geht dabei davon aus, dass sich der Einsatz eines Puffers bei einem Wirkungsgrad der einzelnen Maschinen von unter 95 % lohnt [21]. Die garantierten Wirkungsgrade der meisten im Bereich der Getränkeabfülltechnik eingesetzten Maschinen weisen Werte von 92 bis 98 % [148] auf. Dabei hängt allerdings der Wirkungsgrad von vielen Faktoren ab, wie beispielsweise von den eingesetzten Packmitteln, dem abzufüllenden Packgut und sogar dem eingesetzten Bedienpersonal. Dies zeigte sich bei zahlreichen durch den Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik durchgeführten Abnahmeversuchen, bei denen Abfüllanlagen nach der DIN 8783 überprüft wurden [31].

Bei der Dimensionierung des Puffers ist die MDT bzw. die MTTR (Mean Time to Repair) der entscheidende Wert. Dies macht Rädler in seinem Artikel [123] deutlich. Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, hängt die Effizienz der Anlage entscheidend von der Pufferzeit (MTTR, die der Puffer überbrücken kann, siehe Kapitel 2.1.3.2) ab. Puffer, die zu klein dimensioniert sind, also kürzere Pufferzeiten als die MTTR aufweisen, verursachen Effizienzverluste der Anlage. Sehr groß dimensionierte Puffer hingegen, die Pufferzeiten deutlich größer als die MTTR aufweisen, bringen nur noch geringe Steigerungen der Anlageneffizienz. Damit wird

es unwirtschaftlich, Puffer zu groß zu dimensionieren. Rädler schlägt daher vor, dass die Pufferzeit mindestens der MTTR entsprechen, aber aus wirtschaftlichen Gründen das Doppelte dieser nicht überschreiten sollte [123]. Das Problem bei dieser Art der Dimensionierung ist allerdings, dass die Störzeitenverteilung bei der Auslegung einer neuen Anlage noch nicht bekannt ist und somit eine Planung der Pufferstrecken auf Basis der MTTR nicht möglich ist. Daher legt man die Pufferstrecken in der Praxis meist mit einer Pufferzeit von 60 bis 120 s aus oder orientiert sich an empirisch ermittelten Werten, wie sie in [76] und [108] zu finden sind.

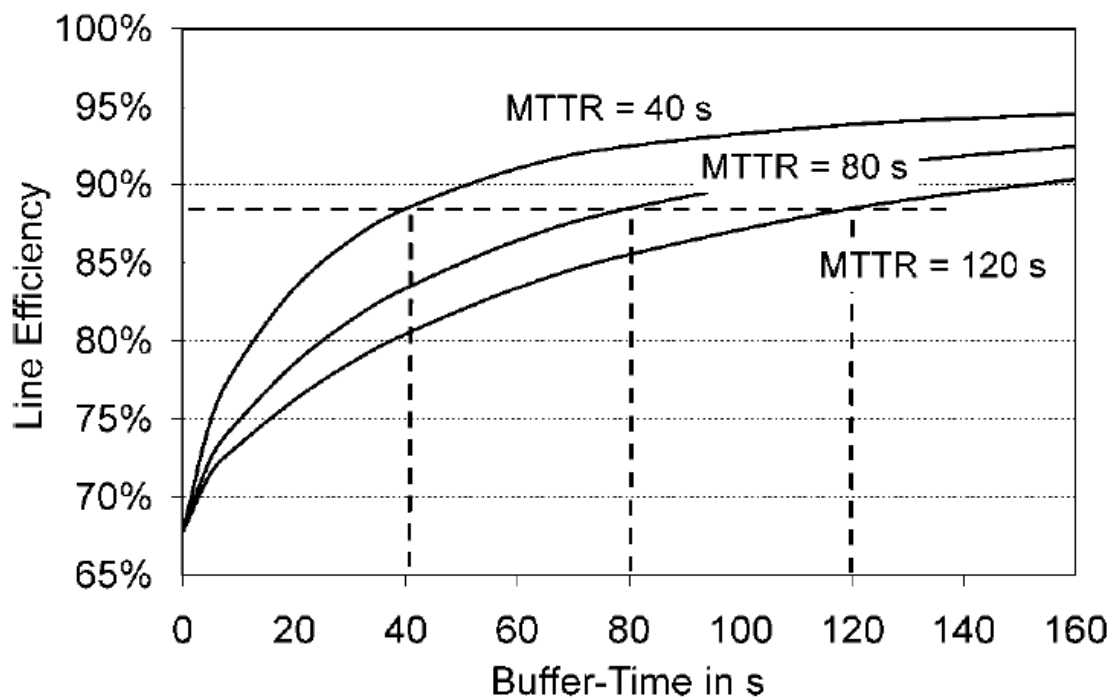


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad der Abfüllanlage, Pufferzeit und MTTR [123]

Da sich die Störzeiten einzelner Maschinen innerhalb einer Abfüllanlage nicht oder nur sehr ungenau vorhersagen lassen und daher davon ausgegangen werden muss, dass jede Maschine eine gewisse Störanfälligkeit aufweist, werden bei heutigen Anlagen im Normalfall Puffer vor und nach jeder Maschine verbaut. Eine Ausnahme bilden hier lediglich die Flaschenfüllmaschine und Flaschenverschließmaschine, die geblockt werden. Auch die vorgeschaltete Leerflaschen-Inspektionsmaschine wird meist mit einer einsträngigen Transportstrecke mit der Flaschenfüllmaschine verbunden, so dass auch hier von einer Blockung auszugehen ist. Alle übrigen Maschinen des Flaschenkreislaufs werden durch Puffer entkoppelt. Meist wird auch der Palettenkreislauf durch ein Palettenmagazin entkoppelt. Auch im Kastenkreislauf sind bei einigen Anlagen Magazine zu finden, die zur Entkopplung der Ein- und Auspackmaschine dienen. Allerdings sind diese in der Praxis eher selten anzutreffen.

Neben der MTTR bzw. MDT hat auch die MTBF einen Einfluss auf die Wirkung der Puffer. Die MTBF sollte größer als die Erholungszeit der Puffer nach einer Störung sein, da nur ein

Puffer, der sich im Sollzustand befindet, optimal auf das Abpuffern einer Störung vorbereitet ist. Befindet sich der Puffer noch in der Erholungsphase nach einer Störung, steht nicht die volle Pufferzeit zur Verfügung. Dies ist ein Problem, das im Kapitel 2.1.3.3 noch genauer erläutert wird.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass mit Ausnahme der geblockten Maschinen Leerflaschen-Inspektionsmaschine, Flaschenfüllmaschine und Flaschenverschließmaschine zwischen allen Maschinen des Behältertransports Puffer installiert werden. Die Dimensionierung der Puffer sollte auf Basis der MDT bzw. MTTR erfolgen. In der Praxis ist dies, aus Ermangelung der beiden Werte, aber meist nicht möglich. Daher werden die Puffer meist auf Basis von Erfahrungswerten ausgelegt

2.1.3.2 Charakterisierung von Flaschenpuffern in Getränkeabfüllanlagen

Die Hauptaufgabe der Puffer in Abfüllanlagen ist es, das Zentralaggregat vor Stillständen durch benachbarte Aggregate zu schützen [149]. Hierzu müssen die Flaschentransporteur vor und nach dem Zentralaggregat unterschiedlich betrieben werden. Die Transporteur vor dem Zentralaggregat (siehe Abbildung 3: B_{F1} bis B_{F3}) sollten mit einer möglichst hohen Füllung betrieben werden, damit sie im Falle einer Störung der vorgeschalteten Maschine das Zentralaggregat möglichst lange mit Flaschen versorgen können. Sie werden daher als Anti-Starve-Puffer bezeichnet. Hinter dem Zentralaggregat verhält es sich genau umgekehrt (siehe Abbildung 3: B_{F4} und B_{F5}). Diese Transporteur sollten mit einer möglichst niedrigen Füllung betrieben werden, damit sie im Falle einer Störung an einer nachgeschalteten Maschine möglichst viele Flaschen aufnehmen können und so das Zentralaggregat möglichst lange weiterarbeiten kann [122]. Rädler [122] beschreibt in seiner Arbeit die Arbeitsweise der beiden Puffermodi, die in Abbildung 6 dargestellt sind:

Anti-Starve-Puffer (siehe linke Seite Abbildung 6):

Der Puffer ist im Zustand 1 komplett gefüllt. Fällt die vorgeschaltete Maschine ($M_1 = 0$) aus, beginnt sich der Puffer zu leeren. Das Ende des Flaschenpulses wandert Richtung nachgeschalteter Maschine. Die vorgeschaltete Maschine muss nun wieder anlaufen, bevor eine kritische Anzahl von Behältern auf dem Transporteur (n_{crit}) unterschritten ist, um einen Stopp der nachgeschalteten Maschine (M_2) (bei einer Anzahl kleiner n_s Behältern) zu verhindern.

Anti-Block-Puffer (siehe rechte Seite Abbildung 6):

Auf der rechten Seite der Abbildung 6 ist ein Anti-Block-Puffer dargestellt. Er ist im Sollzustand bis auf den Primärstrom von Behältern leer. Der Primärstrom dient lediglich dem Transport und damit der Versorgung der nachgeschalteten Maschine (M_2) mit Flaschen. Fällt nun die nachgeschaltete Maschine aus ($M_2 = 0$), kann die vorgeschaltete Maschine so lange weiterarbeiten, bis die kritische Anzahl n_B von Behältern erreicht ist. Wird die Anzahl überschritten, muss die vorgeschaltete Maschine gestoppt werden. Der verbleibende Platz auf dem Puffer dient dem Leerfahren der vorgeschalteten Maschine (M_1).

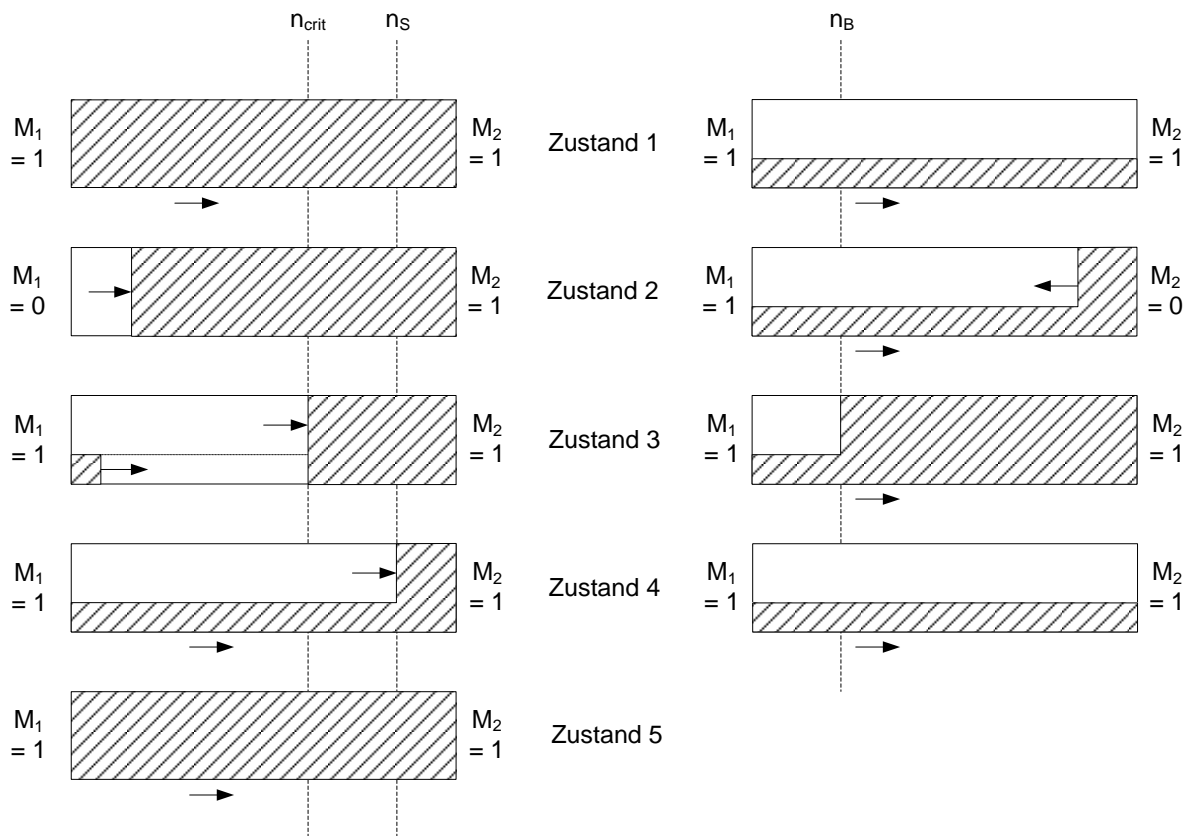


Abbildung 6: Zustände auf einem Anti-Starve-Puffer (links) und einem Anti-Block-Puffer (rechts) bei einem Ausfall der vorgeschalteten Maschine (links) bzw. der nachgeschalteten Maschine (rechts) ([122] modifiziert).

	Anti-Starve-Puffer	Anti-Block-Puffer
Zustand 1	M_1 und M_2 arbeiten störungsfrei	M_1 und M_2 arbeiten störungsfrei
Zustand 2	M_1 steht, der Puffer leert sich	M_2 steht, der Puffer füllt sich
Zustand 3	M_1 läuft wieder an die kritische Füllung, unterhalb derer ein Stillstand von M_2 nicht mehr zu verhindern ist (n_{crit}), ist erreicht	M_2 läuft wieder an die kritische Füllung, oberhalb derer M_1 abgeschaltete werden muss (n_B), ist erreicht
Zustand 4	der hintere Behälterpulk wurde an den vorderen Pulk herangeführt, bevor die Behältermenge (n_s), die zu einem Stillstand von M_2 führt, unterschritten wird	die Sollfüllung des Puffers ist wieder erreicht
Zustand 5	die Sollfüllung des Puffers ist wieder erreicht	

Neben den beiden grundsätzlichen Betriebszuständen von Puffern gibt es eine Reihe von Kennzahlen, mit denen sich Flaschenpuffer charakterisieren lassen.

Pufferkapazität (C)

Die Pufferkapazität (C) ist das Maß dafür, wie viele Behälter im normalen Betrieb (nicht beim Voll- oder Leerfahren) der Anlage Platz auf dem Transporteur finden. Sie lässt sich sehr einfach experimentell bestimmen, indem man den Puffer durch einen Stopp der vorgeschalteten Maschine leer fährt, bis die nachgeschaltete Maschine auf Grund von Mangel stehen bleiben muss. Bei den meisten modernen Abfüllanlagen befinden sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht geleerte Abschnitte auf dem Transporteur, die im normalen Betrieb nicht geleert werden (auf diese wird in Kapitel 2.1.3.4 noch näher eingegangen). Diese Bereiche stehen somit auch zur Pufferung nicht zur Verfügung und werden daher auch bei der Bestimmung der Kapazität nicht berücksichtigt. Ist der Puffer komplett leer gefahren, wird dieser im Anschluss wieder voll gefahren und die Anzahl an Behältern bestimmt, die Platz auf dem Transporteur findet.

Die Pufferkapazität (C) lässt sich bei Kenntnis der zur Verfügung stehenden Transporteurfläche in guter Näherung berechnen. Hierzu muss man die zur Verfügung stehende Fläche (A) durch den Platzbedarf der Flaschen dividieren (siehe Formel 2.14). Die Flaschen ordnen sich dabei im Idealfall in der dichtesten Zylinderpackung an (siehe Abbildung 7) [9]. Ihr Platzbedarf ergibt sich aus dem Abstand der Mittelpunkte der Flaschen (e) multipliziert mit dem Durchmesser der eingesetzten Flaschensorte. Der Faktor 0,9 ist ein empirischer Korrekturfaktor, der berücksichtigt, dass sich die Flaschen im Normalfall nicht in der dichtesten Zylinderpackung anordnen, sondern dass es statistisch auftretende Störungen in dieser Anordnung gibt.

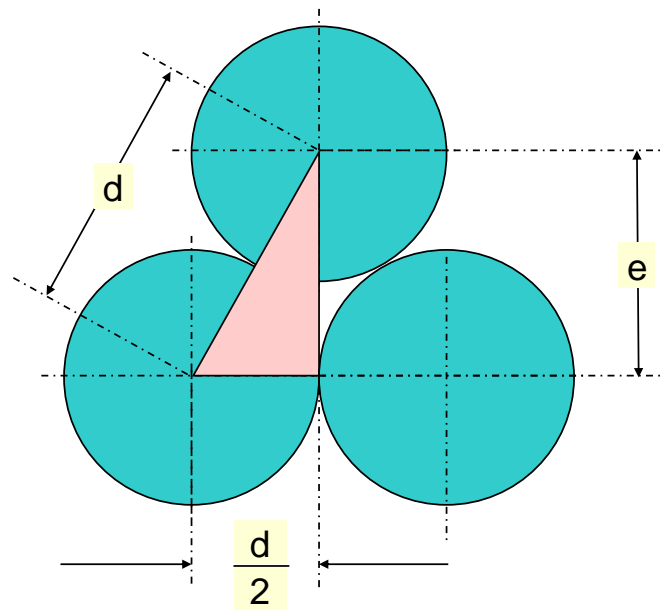


Abbildung 7: Darstellung der Anordnung von Flaschen in der dichtesten Zylinderpackung (nach [9])

Abstand der Flaschen in der Zylinderpackung:
$$e = \frac{d}{2} \sqrt{3} \quad 2.13$$

Pufferkapazität:
$$C \approx \frac{A}{e \cdot d} \cdot 0,9 \quad 2.14$$

Puffertotzeit (t_T)

Bei der Puffertotzeit (t_T) handelt es sich um die Zeit, die die Flaschen im freien Transport von der vor- zur nachgeschalteten Maschine benötigen, zuzüglich einer Einschaltverzögerung der Maschine. Die experimentelle Bestimmung kann für beide Puffermodi (Anti-Block und Anti-Starve-Puffer) gleich erfolgen. Man stoppt die dem Puffer vorgeschaltete Maschine, bis die nachgeschaltete Maschine auf Grund eines Mangels stehen bleiben muss. Anschließend lässt man die vorgeschaltete Maschine wieder anlaufen und stoppt die Zeit, bis auch die nachgeschaltete Maschine wieder anläuft. Man ermittelt somit die Transportzeit zuzüglich der Verzögerung, bis die nachgeschaltete Maschine wieder anläuft.

Die Puffertotzeit lässt sich, genau wie die Pufferkapazität, in guter Näherung berechnen. Hierzu benötigt man die Geschwindigkeit der Transportbänder (v) und die Länge (L) des Transporteurs:

$$t_T = \frac{L}{v} + t_V \quad 2.15$$

Der Quotient der Pufferlänge und der Geschwindigkeit zuzüglich der Einschaltverzögerung (t_V) der Maschine ergibt die Puffertotzeit.

Mit Hilfe der Puffertotzeit lässt sich somit eine Aussage darüber treffen, wie günstig der Puffer dimensioniert ist. Lange Puffertotzeiten weisen auf einen ungünstig dimensionierten Puffer hin, der entweder ein ungünstiges Längen-Breiten-Verhältnis (sehr lang) aufweist oder mit sehr niedriger Geschwindigkeit betrieben wird. Beides beeinflusst die Puffereffizienz negativ [157].

Pufferzeit (t_P)

Die Pufferzeit gibt die Zeit an, die der Puffer in der Lage ist zu überbrücken. Das bedeutet: Befindet sich der Puffer zu Beginn der Störung der vor- (Anti-Starve-Puffer) oder nachgeschalteten (Anti-Block-Puffer) Maschine im Sollzustand, kann die vor- oder nachgeschaltete Maschine für die Zeit t_P stehen bleiben, ohne dass dies Auswirkungen auf die nach- bzw. vorgeschaltete Maschine hat. Die Pufferzeit ergibt sich dabei aus der Formel 2.16.

$$t_P = \frac{C}{q} - t_T \quad 2.16$$

Zur Berechnung wird die Pufferkapazität durch die Einstellausbringung (q) der vor- (bei Anti-Starve-Puffern) bzw. nachgeschalteten (bei Anti-Block-Puffern) Maschine dividiert. Anschließend muss die Totzeit subtrahiert werden. In realen Anlagen muss allerdings beachtet werden, dass die Puffer meist nicht im idealen Zustand betrieben werden. Sie sind also nicht komplett gefüllt oder komplett geleert. Daher verkürzt sich die Pufferzeit um den Wert der nicht genutzten Pufferfläche. Diese Zeiten werden nur bei der experimentellen Bestimmung der Zeiten berücksichtigt. Die Zeiten werden somit in der Regel voneinander abweichen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Zusammenhänge für Behältertransporteure aufstellen:

- Je länger die Pufferzeit ist, desto effektiver lassen sich die vor- und nachgeschaltete Maschine entkoppeln bzw. desto länger können Störungen vom Zentralaggregat fern gehalten werden.
- Die Pufferzeit kann durch eine Erhöhung der Pufferkapazität oder durch eine Verkürzung der Puffertotzeit verlängert werden.
- Die Puffertotzeit lässt sich durch die Dimensionierung des Transporteurs und die Geschwindigkeit der Transportbandketten beeinflussen. Je höher die Transportbandgeschwindigkeit bzw. je kürzer der Transporteur, desto kürzer die Totzeit. Kurze und breite Transporteure, die mit höheren Transportbandgeschwindigkeiten betrieben werden, steigern somit die Anlageneffizienz, verglichen mit langen, schmalen und mit niedriger Transportbandgeschwindigkeit betriebenen Transporteuren.

Weitere Erläuterungen zur Auslegung und zum Betrieb von Behältertransporteuren in Getränkeabfüllanlagen finden sich bei Manger [86] und Petersen [108].

2.1.3.3 Stand der Technik bei der Transporteur- und Anlagenregelung

Um die Flaschentransporteure betreiben zu können ist es notwendig, diese und auch die Maschinen des Behälterkreislaufs regeln oder zumindest steuern zu können. Dies ist speziell vor dem Hintergrund des Betriebs der Transporteure im Anti-Starve- bzw. Anti-Block-Modus notwendig. Die beiden Betriebsmodi unterscheiden sich in zwei Punkten. Diese sind die Füllung, mit dem sie im Sollzustand (ohne Störung) betrieben werden und die Art und Weise, wie dieser Sollzustand eingestellt wird.

Um einen bestimmten Sollzustand einstellen zu können, muss zunächst eine Größe festgelegt werden, die mit Hilfe der Regelung eingestellt werden soll. Bei dieser Größe handelt es sich um die Füllung des Transporteurs. Die Füllung kann bei heutigen Anlagen mit Hilfe von Stauschaltern mit begrenzter Genauigkeit und unter gewissen Einschränkungen erfasst werden. Ein Stauschalter besteht aus einem meist induktiven Sensor und einem

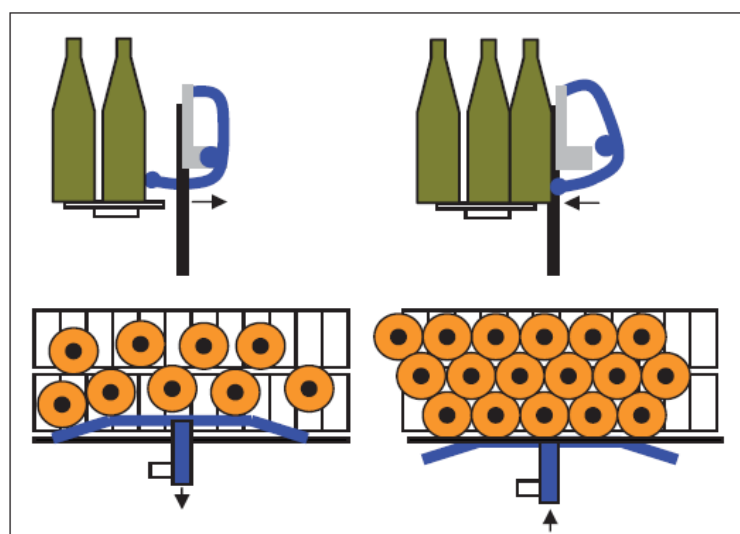


Abbildung 8: Stauschalter zur Erfassung des Belegungszustands eines Behältertransporteurs [55]

beweglich gelagerten Metallbügel. Der Stauschalter wird an den Geländerführungen der Transporteure angebracht. Stauen sich Behälter im Bereich des Geländers, an dem der Stauschalter angebracht ist, wird dieser betätigt. Dabei wird der Metallbügel von den sich aufstauenden Flaschen aus dem Transporteurbereich geschoben. Dadurch schiebt sich eine Bestätigungsfahne in das Magnetfeld des Sensors oder aus dem Magnetfeld heraus (siehe Abbildung 8), so dass der Schalter seinen Zustand ändert. Der Zustand wird dann an die Steuerung gemeldet, die so eine Belegung des entsprechenden Transportbandabschnitts erkennt. Mit Hilfe dieser Information lässt sich der Belegungszustand eines mehrsträngigen

Transporteurs in Stufen erfassen. Dabei unterliegt die Erfassungsgenauigkeit allerdings

einigen Einschränkungen. Der Stauschalter kann nur den Bereich des Transporteurs direkt überwachen, in den der Metallbügel hineinragt. Es muss somit durch eine im Steuerungsprogramm umgesetzte Logik darauf geschlossen werden, wie sich der Belegungszustand des Transporteurs auf Grund des Signals der einzelnen Stauschalter darstellt. Neben dieser Problematik, die vor allem eine sorgfältige Planung der Positionen der Stauschalter am Transporteur und eine entsprechende Umsetzung des Steuerungsprogramms verlangt, hängt die Genauigkeit der Erfassung auch stark von der Anzahl der Stauschalter ab. Je höher die Anzahl der Stauschalter, desto feiner aufgelöst kann die Füllung des Transporteurs erfasst werden. Allerdings führt eine höhere Anzahl an Stauschaltern auch zu höheren Kosten. Dies ist zum einen durch die Schalter selbst, zum anderen aber auch durch den Verkabelungsaufwand, die höhere Anzahl an digitalen Eingängen der Steuerung und den komplexeren Regelungsalgorithmus bedingt. Es muss bei jedem Transporteur somit ein Kompromiss zwischen technisch notwendiger Erfassungsgenauigkeit und der Wirtschaftlichkeit der umgesetzten Hardware gefunden werden.

Für eine Einstellung des Sollzustands ist neben der stufenweisen Erfassung der Füllung des Transporteurs eine weitere Voraussetzung notwendig. So müssen die Maschinen die Möglichkeit haben, ihre Ausbringung im Verhältnis zu den benachbarten Maschinen zu erhöhen bzw. zu senken, um so die Sollfüllung des Transporteurs beim Anfahren der Anlage oder nach einer Störung wieder herstellen zu können. Die Maschinen müssen also über eine Überausbringung im Verhältnis zur Ausbringung im störungsfreien Betrieb verfügen. Die Überausbringungen der Maschinen einer Mehrweg-Getränkeabfüllanlage sind in Abbildung 9 dargestellt. Bei diesem Diagramm handelt es sich um das Berg'sche Diagramm oder V-Diagramm, nach dem die meisten Abfüllanlagen ausgelegt werden [8]. Dabei werden die Ausbringungen aller Maschinen in Bezug auf das Zentralaggregat der Anlage, in diesem Fall die Flaschenfüllmaschine, überdimensioniert. Die Überausbringungen erlauben es auch nach Störungen die Sollfüllung des Transporteurs wieder herzustellen.

Die dargestellte Ausbringungsabstufung wurde empirisch ermittelt und dient dem Ziel, das Zentralaggregat möglichst von Störungen zu entkoppeln. Bei dem Zentralaggregat handelt es sich meist um die Flaschenfüllmaschine. Dies hat zwei Gründe. Zum einen ist die Flaschenfüllmaschine meist die teuerste Maschine der Anlage und man möchte diese daher nicht größer dimensionieren als notwendig. Zum anderen hat dies Qualitätsgründe. So möchte

man verhindern, dass die Flaschenfüllmaschine stehen bleibt, da sich in diesem Fall offene unverschlossene Flaschen in der Maschine und zwischen Flaschenfüllmaschine und Flaschenverschließmaschine befinden. Bei diesen kann der Kopfraum der Flasche seine Atmosphäre mit der Umgebung austauschen. Dies hat den Nachteil, dass Sauerstoff aufgenommen werden kann, der vielen Füllgütern, wie z. B. Bier, schadet oder dass Mikroorganismen in die Flasche und das Produkt gelangen können [7], [13], [101]. Beides ist aus Qualitätssicht nicht wünschenswert.

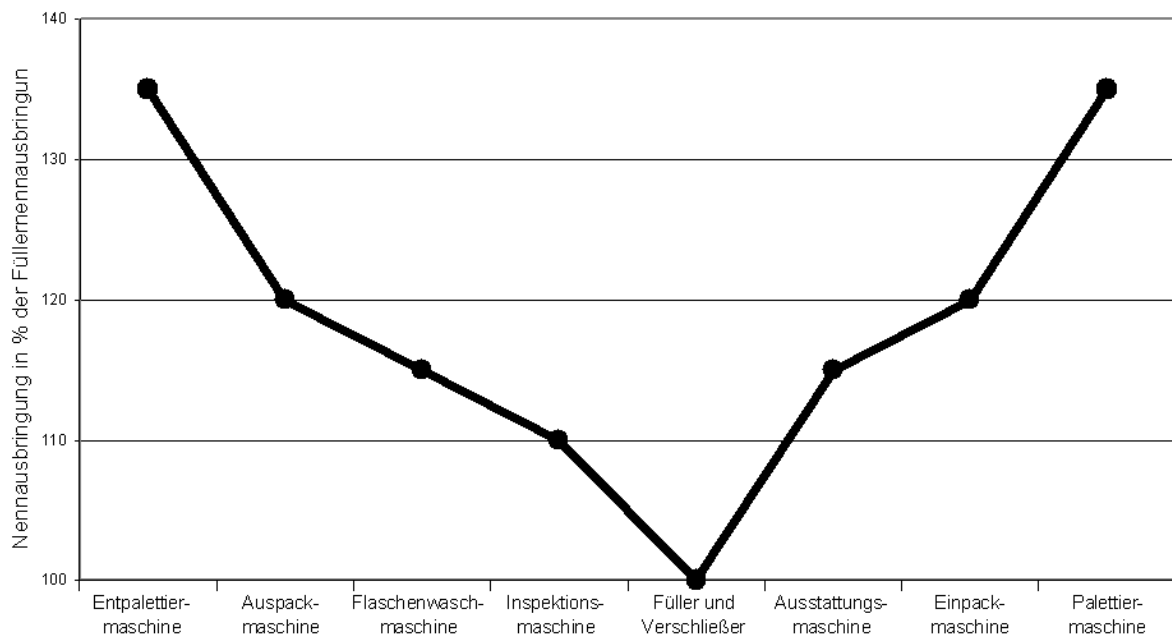


Abbildung 9: V-Diagramm nach Berg zur Darstellung der Ausbringungsabstufung der einzelnen Maschinen einer Getränkeabfüllanlage [8].

Bei einigen Anlagen werden dennoch andere Maschinen als Zentralaggregat betrieben und die Ausbringungsabstufung der übrigen Maschinen somit auf diese ausgelegt. So wird beim Betrieb einer Streckblasmaschine diese als Zentralaggregat definiert, da sie sich nicht regeln lässt und mit einer fest eingestellten Ausbringung durchlaufen muss. Auch beim Einsatz von Tunnelpasteurisierungsmaschinen wird meist vom klassischen V-Diagramm abgewichen und diese als Zentralaggregat definiert, um die hohen Energiekosten, die beim Betrieb dieser Maschinen anfallen, nicht unnötig weiter zu erhöhen [144], [146].

Aufbau einer stauschalterbasierten Regelung

Auf Grund der weiten Verbreitung in der Praxis und der Bedeutung als Referenzmodell (bzw. Stand der Technik) für diese Arbeit soll hier die grundlegende Funktionsweise einer stauschalterbasierten Regelung erläutert werden.

Bei der stauschalterbasierten Regelung wird das dem Transporteur vor- und nachgeschaltete Aggregat mit in die Regelung einbezogen. Das rudimentärste Konzept sieht dabei den Einsatz

von zwei (Stau_2 und Stau_5 der Abbildung 10) bzw. vier (Stau_1, Stau_2 sowie Stau_5, Stau_6 der Abbildung 10) Stauschaltern [113] vor.

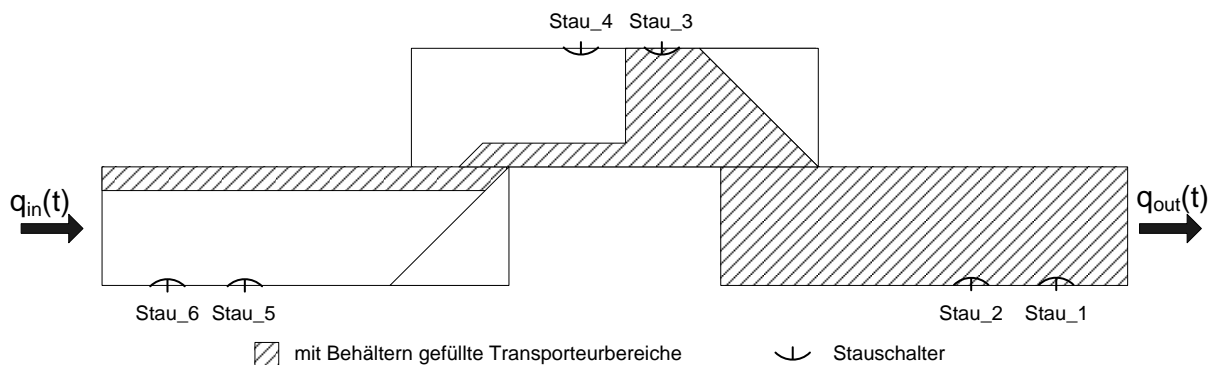


Abbildung 10: Skizze eines dreiteiligen Transporteurs mit angebrachten Stauschaltern

Die Stauschalter Stau_5 und Stau_6 dienen dabei zur Freigabe bzw. Abschaltung der vorgeschalteten Maschine (siehe Abbildung 10). Ist der Schalter Stau_6 belegt, wird der vorgeschalteten Maschine das Freigabesignal entzogen und sie muss abgeschaltet werden. Erst wenn der Schalter Stau_5 nicht mehr belegt ist, wird die Freigabe wieder erteilt und die Maschine kann wieder anlaufen. Mit der nachgeschalteten Maschine wird umgekehrt verfahren. Ist der Schalter Stau_1 nicht mehr belegt, wird die nachgeschaltete Maschine abgeschaltet. Ist der Schalter Stau_2 belegt, wird die nachgeschaltete Maschine wieder freigegeben. Die Konstellation mit zwei Stauschaltern wird gewählt, um eine schnelle Folge von Ein- und Abschaltzyklen an den Maschinen zu verhindern. Würde nur ein Stauschalter, beispielsweise am Ende des Transporteurs eingesetzt, kann es zu folgender Konstellation kommen: Die nachgeschaltete Maschine läuft wieder an, sobald die ersten Flaschen nach dem Stillstand der vorgeschalteten Maschine am Ende des Transporteurs ankommen. Daraufhin wandert der Behälterpulk wieder stromabwärts. Da durch das Anlaufverhalten der vorgeschalteten Maschine wahrscheinlich weniger Behälter ankommen, als durch die nachgeschaltete Maschine aus dem Puffer entnommen werden, ist der Stauschalter nach kurzer Zeit nicht mehr belegt, was wiederum zu einer Abschaltung der nachgeschalteten Maschine führt. Dieser Vorgang kann sich mehrere Male wiederholen. Auf diese Weise kann es zum Schwingen des Systems kommen, darüber hinaus wird die nachgeschaltete Maschine durch unnötige Ein- und Abschaltzyklen belastet [159]. Eine alternative Konstellation ist der Einsatz von jeweils einem Endschalter, der im Steuerungsprogramm mit einer Ein- bzw. Ausschaltverzögerung versehen wird. Auf diese Weise wird die Maschinenfreigabe nicht sofort bei einem Zustandswechsel des Schalters erteilt, sondern erst nach Ablauf der Schaltverzögerung. Dies ist eine in der Praxis häufig anzutreffende Variante, da sie mechanisch weniger aufwändig ist. Bei der Positionierung der als Endschalter für die Maschinen verwendeten Stauschalter ist zusätzlich darauf zu achten, dass die Maschinen meist auch beim Auslaufen noch Flaschen verarbeiten. Die hierfür benötigte Anzahl an Flaschen muss daher je nachdem, ob es sich um eine vor- oder nachgeschaltete Maschine

handelt, noch im Puffer Platz haben bzw. dem Puffer noch entnommen werden können, um Störungen oder Schäden an den Maschinen zu vermeiden.

Mit den oben beschriebenen Konstellationen ist noch keine Regelung der Ausbringungen der Maschinen oder eine sinnvolle Wahl der Transportbandgeschwindigkeiten möglich. Hierzu sind mindestens zwei weitere Stauschalter notwendig, die um den gewünschten Staupunkt des Behälterpulses angebracht werden müssen. In Abbildung 10 sind dies die Schalter Stau_3 und Stau_4. Stauschalter Stau_3 muss dabei hinter dem gewünschten Pulkende angebracht werden, so dass er bei störungsfreiem Betrieb beider Maschinen und Einhaltung der gewünschten Füllung des Transporteurs belegt ist. Der Schalter Stau_4 muss so angebracht sein, dass er bei störungsfreiem Betrieb nicht belegt ist. Ist dieser Sollzustand erreicht, werden vor- und nachgeschaltete Maschine mit der gleichen Ausbringung betrieben und die Transportbandgeschwindigkeiten werden nach voreingestellten Werten angepasst. Weicht das System nun vom gewünschten Sollzustand ab, kann durch eine Anpassung der Ausbringung und der Transportbandgeschwindigkeiten reagiert werden. Dabei muss zwischen Anti-Starve- und Anti-Block-Puffer unterschieden werden.

Anti-Starve-Puffer:

Bei einem Anti-Starve-Puffer reagiert das System auf eine erhöhte Füllung – Stau_4 ist belegt – mit einer Reduzierung der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine. Die Bandgeschwindigkeiten werden nach voreingestellten empirisch ermittelten Werten ebenfalls reduziert. Das System verbleibt so lange in diesem Zustand, bis sich das Pulkende wieder zwischen den Schaltern Stau_3 und Stau_4 befindet. Im umgekehrten Fall, wenn die Pufferfüllung zu niedrig ist – Stau_3 ist nicht belegt - wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine erhöht. Auch die Transportbandgeschwindigkeiten werden erhöht, um die Behälter möglichst schnell zur nachfolgenden Maschine zu fördern und so einen Stillstand zu vermeiden.

Anti-Block-Puffer:

Bei einem Anti-Block-Puffer muss die dem Transporteur nachgeschaltete Maschine bei einer Abweichung der Sollfüllung in ihrer Ausbringung nachgeführt werden. Im konkreten Beispiel (Abbildung 10) bedeutet dies, dass die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine erhöht wird, wenn der Schalter Stau_4 auf Grund eines Rückstaus belegt ist. Die Geschwindigkeiten der Transportbänder werden an die erhöhte Ausbringung angepasst. Je nach Lage des Schalters können aber auch Geschwindigkeiten von gefüllten Transportbandbereichen reduziert werden. Ist die Sollfüllung unterschritten und Stau_3 nicht mehr belegt, wird die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine reduziert. Die Transportbandgeschwindigkeiten können wiederum angepasst werden, indem sie der reduzierten Ausbringung angepasst und ebenfalls reduziert werden. Jedoch kann es bei laufender vorgeschalteter Maschine auch sinnvoll sein die Geschwindigkeit auf den vorderen Bandabschnitten zu erhöhen, um Lücken schnell zuzufahren, um einen Stopp der nachgeschalteten Maschine zu verhindern.

Im hier gewählten rudimentären Beispiel wird eine dreistufige Regelung beschrieben. Das bedeutet, die Ausbringung der zu steuernden Maschine und die Geschwindigkeit der Transportbänder kann in drei Stufen angepasst werden (zu niedrige, zu hohe Füllung und Sollfüllung). Diese Art der Regelung kann mit beliebig vielen Stauschaltern umgesetzt werden. Mit jedem weiteren Schalter kann eine weitere Geschwindigkeitsabstufung realisiert werden. Sinnvoll ist es vor allem, die Belegungszustände von einzelnen Transportbandabschnitten abzufragen. Dazu sollten die zusätzlichen Stauschalter an den Enden der jeweiligen Abschnitte positioniert werden, um so die Geschwindigkeit für diesen Abschnitt genauer anpassen zu können. In Kapitel 3.2 ist die Umsetzung einer fünfstufigen stauschalterbasierten Regelung an einer Versuchsanlage erläutert, darüber hinaus finden sich in [57], [80], [81], [113], [150] und [151] Praxisbeispiele für den Einsatz stauschalterbasierter Regelungen für Behältertransporteure.

Innovative Regelungskonzepte für Behältertransporteure

Neben den klassischen stauschalterbasierten Regelungen gibt es auch einige Weiterentwicklungen im Bereich der Transporteurregelung. So stellt Voigt in seiner Arbeit ein Konzept vor, bei dem er mit Hilfe von Stauschaltern Lücken in Behälterströmen erkennt und diese gezielt schließt [159]. Allerdings funktioniert dieses Konzept nur, wenn die Behälter an der Geländerführung geführt werden und so die Lücken durch die Stauschalter erkannt werden können. Mernøe stellt in seinem Artikel [92] ein Konzept vor, bei dem der Belegungszustand der Transporteure durch Differenzzählung am Ein- und Auslauf des Transporteure geregelt wird. Allerdings funktioniert sein Konzept nur bei Transporteuren, die über einen Ein- und einen Auslauf verfügen, an dem die Flaschen einsträngig geführt werden, da er Lichtschranken zur Zählung einsetzt. Auf den übrigen Transporteuren der Anlage setzt er die klassische stauschalterbasierte Regelung ein.

Braglia nutzt in seinem in den Artikeln [15] und [16] vorgestellten Ansatz einen Fuzzy-Regler, um Lücken im einsträngigen Bereich vor dem Einlauf einer Maschine zu schließen. Er fährt diese Lücken im Hinblick auf eine möglichst niedrige Differenzgeschwindigkeit beim Auftreffen der Behälterpuls und gleichzeitiger kontinuierlicher Versorgung der Maschine mit der entsprechenden Geschwindigkeit zu. In den von ihm vorgestellten Simulationsergebnissen konnte er so die Füllmaschine besser mit Behältern versorgen und gleichzeitig die Differenzgeschwindigkeiten der Behälter beim Zusammenstoßen reduzieren. Ebenfalls einen Fuzzy-Regler setzte Meinhardi [89] ein, um Lufttransporteure für PET-Flaschen zu regeln. Allerdings hat sich bisher keines dieser Konzepte in der Praxis durchsetzen können.

Im Bereich der einsträngigen Behältertransporteure haben sich im Gegensatz zu den oben beschriebenen stauschalterbasierten Regelungen bereits vor Jahren exakter arbeitende Regelungskonzepte durchgesetzt. Diese werden insbesondere zwischen Leerflaschen-Inspektionsmaschine und Flaschenfüllmaschine eingesetzt und sind in der Lage, kurze Lücken, wie sie etwa beim Ausschleusen einzelner Flaschen durch die Leerflaschen-

Inspektionsmaschine entstehen, zu schließen. Hierzu wird gezielt die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine angehoben und die Lücke durch eine Erhöhung der Bändergeschwindigkeit geschlossen. Dieser Lückenschluss erfolgt sehr exakt. Die Ausbringung und die Geschwindigkeit werden nur genau so lange und so stark angehoben, dass die Lücke die Flaschenfüllmaschine nicht erreicht. Systeme dieser Art sind beispielsweise in [5], [102], [103], [129], [130] und [162] beschrieben. Das Problem dieser Transporteure ist allerdings die geringe Pufferkapazität und die im Verhältnis dazu hohe Puffertotzeit, durch die nur sehr kurze Störungen im Sekundenbereich überbrückt werden können.

2.1.3.4 Im Einsatz befindliche Puffersysteme für Getränkeabfüllanlagen

Wie bereits in der Einführung dieses Kapitels erwähnt, sind die Parallelspeicher die in der Praxis am häufigsten anzutreffenden Speichersysteme, die im Bereich des Flaschentransports bei Getränkeabfüllanlagen im Einsatz sind. Ihre am weitesten verbreitete Funktionsweise ist in Abbildung 11 in den beiden linken Skizzen dargestellt. Dabei wird der blau dargestellte Bereich für den Transport der Behälter genutzt, der rote Bereich steht zur Pufferung zur Verfügung. Allerdings gibt es diese Systeme in vielen Variationen sowohl in Bezug auf die mechanische Ausführung, als auch auf die Betriebsweise. Diese sollen in der Folge kurz vorgestellt werden.

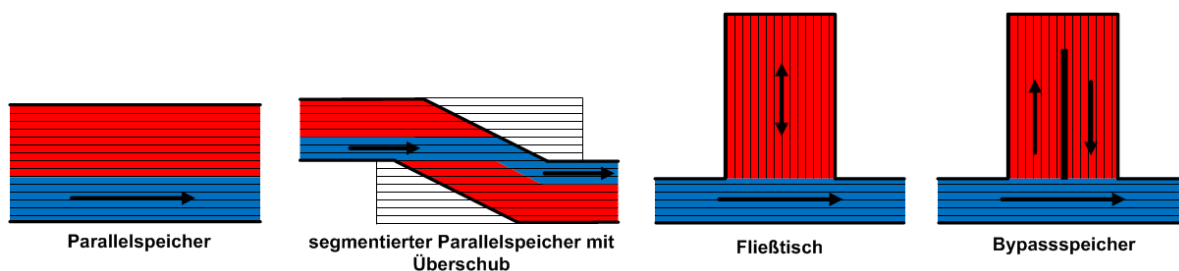


Abbildung 11: Varianten von Behältertransporteuren mit Pufferwirkung ([86] und Ergänzung)

Neben den Parallelspeichern kommen auch noch vereinzelt Fließtische zum Einsatz (siehe Abbildung 11). Das Problem dieser Speichersysteme ist allerdings die Arbeitsweise nach dem first in last out (FILO) Prinzip, durch das die Behälter teilweise sehr lange auf dem Transporteur verbleiben können, was Qualitätsprobleme bei offenen gereinigten Flaschen zur Folge haben oder zusätzlichen Aufwand (beispielsweise beim Chargenwechsel oder der Rückverfolgbarkeit der Produkte) verursachen kann. Der Bypassspeicher war in der Praxis nicht mehr zu finden, bis ihn ein Hersteller vor wenigen Jahren in einer abgewandelten Form wieder in sein Produktportfolio aufnahm. Er soll hier nicht näher erläutert werden, bei Interesse an diesem System sei auf die Quellen [68] und [86] verwiesen.

Die häufigste Konstruktionsweise des Parallelspeichers ist die in Abbildung 10 und Abbildung 11 (zweite von links) dargestellte Form des segmentierten Parallelspeichers mit Überschub. Dieser besteht aus beliebig vielen Abschnitten, wobei die Bänder jedes Abschnitts

mit einer eigenen Geschwindigkeit betrieben werden können. Der geometrischen Gestaltung sind dabei kaum Grenzen gesetzt. So werden häufig auch kurvengängige Transporteure eingesetzt. Lediglich die Länge der einzelnen Abschnitte ist begrenzt.

Neben dieser Form der Transporteure kommen in den letzten Jahren häufig Transporteure zum Einsatz, auf denen die Bänder mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrieben werden können. Der Primärstrom der Behälter durchläuft dabei den Puffer auf schneller laufenden Transportbändern, die Randzonen, die zur Pufferung verwendet werden, laufen mit einer niedrigeren Geschwindigkeit. Diese Arbeitsweise ist in Abbildung 12 dargestellt. Der in der Mitte blau dargestellte Bereich wird mit einer höheren Geschwindigkeit betrieben, als die rot dargestellten Randzonen ($v_1 > v_2$). Auf diese Weise wird der Primärstrom der Behälter mit relativ hoher Geschwindigkeit durch den Transporteur geführt, was zu einer kurzen Puffertotzeit und zu einem geringeren Platzbedarf für die Transportfunktion des Puffers führt. Die Randzonen (hier rot dargestellt) werden deutlich langsamer betrieben oder können, wenn der Primärstrom nicht über sie geführt werden muss, sogar komplett abgeschaltet werden. Sie werden nur benötigt, wenn die nachgeschaltete Maschine auf Grund eines Rückstaus oder einer Störung steht. In diesem Fall nehmen sie Flaschen auf und speisen sie, nachdem die nachgeschaltete Maschine wieder angelaufen ist, wieder in den Primärstrom ein. Diese Art von Puffern wird bei modernen Anlagen häufig nach dem Zentralaggregat als Anti-Block-Puffer eingesetzt. Sie bietet den Vorteil einer verringerten Puffertotzeit durch den schnell transportierten Primärstrom und eines schonenden und lärmarmen Behältertransports in den langsamer laufenden Randzonen. Diese Art von Puffern wird klassisch mit Hilfe von Stauschaltern betrieben, die an den Geländerführungen montiert werden. Der hier dargestellte Aufbau stellt nur ein Beispiel dar. Es gibt auch Puffer dieser Art, in denen der Primärstrom aufgesplittet und in zwei Strömen geführt wird. Darüber hinaus werden die Transportbandketten oft auch mit mehr als zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrieben. Weitere Informationen über diese Konstruktionsform sind in [14], [85], [97], [109] und [110] zu finden.

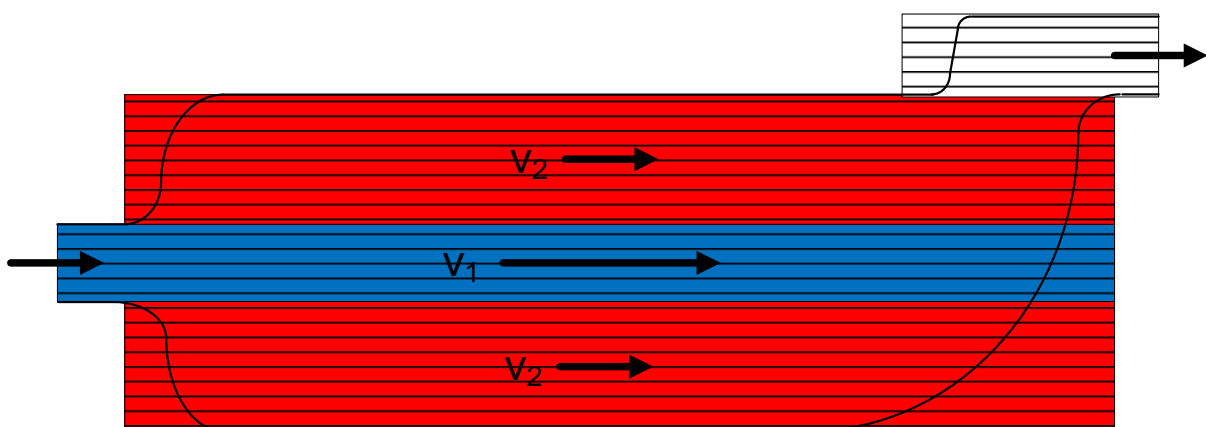


Abbildung 12: Speichertisch, der mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrieben wird. Der Primärstrom der Behälter wird im blauen Bereich gefördert und über das weiße Abzugsband ausgefördert. Der rote Bereich dient der Speicherung von Behältern bei einem Rückstau.

Eine zweite, neuere Variante stellt der Speichertisch mit variabler Länge dar. Eine schematische Darstellung dieser Art von Puffer ist in Abbildung 13 zu sehen. Die Behälter laufen hier auf der gleichen Seite in den Speichertisch ein und aus. Dazu werden die Transportbänder der beiden Seiten in gegensätzlicher Richtung betrieben. Die Richtungsumkehr der Behälter am Ende des Transporteurs erfolgt mit Hilfe eines Überschubs. Dieser verfügt über ein weiteres angetriebenes Band, das die Flaschen auf das gegenläufig betriebene Band überführt. Der Überschub kann dabei seine Position verändern (siehe roter Doppelpfeil in Abbildung 13), so dass die Länge der genutzten Transportfläche dem Belegungsgrad des Transporteurs angepasst werden kann. Der Vorteil dieser Bauweise ist die variable Länge des Transporteurs, der die Puffertotzeit reduziert. Der Nachteil ist die aufwändige Mechanik. Gesteuert wird die Position des Überschubs über einen Sensor, der über den durch den Flaschenpulk erzeugten Druck erkennt, ob Flaschen eingelagert werden müssen oder abgegeben werden können. Diese Art von Puffer ist in den Quellen [2], [56] und [71] genauer beschrieben.

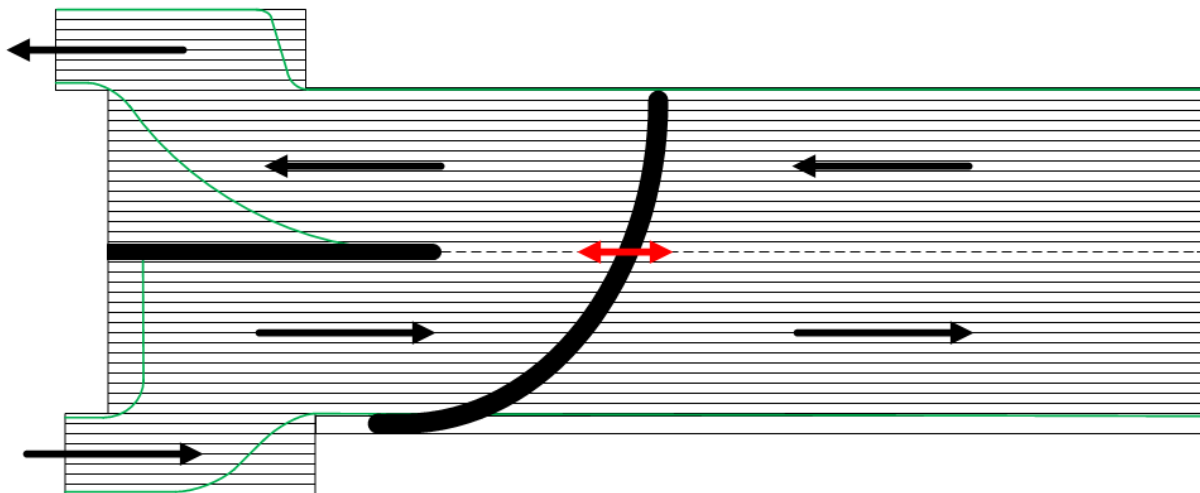


Abbildung 13: Speichertisch mit variabler Länge und Umlenkung der Behälter. Die Umlenkung der Behälter am Ende des Speichertisches ist beweglich (siehe rote Pfeile), so dass die Länge und damit die Pufferfläche dem Belegungsgrad angepasst werden kann.

Eine weitere Variante dieser Puffer ist in den Quellen [3], [52], [53] und [73] zu finden. Hier ist die Transportstrecke spiralförmig zu einem Turmspeicher angeordnet. Diese Ausführung ist zwar noch deutlich aufwändiger, ist aber platzsparender und somit für Abfüllanlagen geeignet, die auf einer geringen Grundfläche aufgestellt werden müssen.

Neben der Pufferung ist auch die Überführung der Behälter aus der Maschine in den Puffer und aus dem Puffer in die nächste Maschine von großer Bedeutung. Diese Anforderung ist durch die hohen Ausbringungen der Maschinen nicht immer einfach zu lösen. Das Problem liegt dabei in der Tatsache begründet, dass die meisten Maschinen einer Flaschenabfüllanlage die Flaschen einzeln verarbeiten und diese daher auch einsträngig zu- und abgeführt werden müssen. In den meisten Puffern werden die Flaschen aber, wie oben beschrieben, im Pulk geführt. Daher müssen die Flaschen am Anfang und am Ende fast jeden Puffers vom

einsträngigen in den mehrsträngigen bzw. vom mehrsträngigen in den einsträngigen Transport überführt werden. Dieses Problem stellte sich erstmals in den 70er und 80er Jahren, in denen die Ausbringung der Maschinen stark anstieg. So beschreiben Kronseder [80], [81] und Pugh [121] dieses Problem in ihren Veröffentlichungen aus dieser Zeit.

Bei heutigen Anlagen wird diese Aufgabe meist durch drucklose Zusammenführungen (siehe Abbildung 14) bzw. drucklose Auseinanderführungen der Behälter gelöst. Diese Systeme führen die Behälter von langsameren Bändern auf schneller laufende Bänder oder umgekehrt und führen dadurch den Behälterstrom zusammen oder auseinander [70], [77], [82], [88], [128], [132], [133], [134], [137]. Unterstützt wird dieser Effekt bei manchen Herstellern durch das Schrägstellen der Transporteure, wodurch der Druck - beim Aufweiten des Behälterstroms - zwischen den Behältern reduziert werden kann [131].

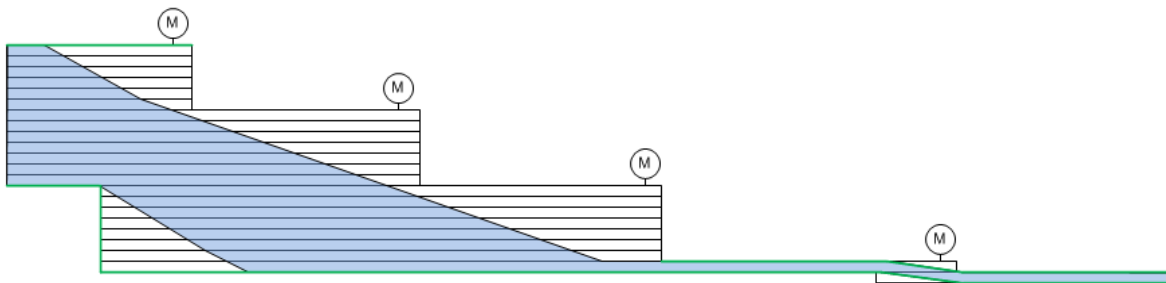


Abbildung 14: Schematische Darstellung einer drucklosen Zusammenführung von Behältern. Die durch die Behälter belegte Fläche ist blau dargestellt. An den Transporteurabschnitten sind die Motoren (M) angebracht, die die Transportbänder mit abgestufter Geschwindigkeit antreiben.

Ein Problem bei der Anwendung dieser Art der Behälterauseinander bzw. -zusammenführung ist der große Platzbedarf dieser Systeme, der zur Pufferung nicht zur Verfügung steht, da diese Bereiche im normalen Anlagenbetrieb nicht leergefahren werden. Aus diesem Grund sind in letzter Zeit einige mechanische Systeme auf den Markt gekommen, die speziell für das Aufbrechen eines einsträngigen Behälterstroms in einen mehrsträngigen genutzt werden.

Hierzu haben mehrere Hersteller riemengetriebene Aggregate im Angebot, die die Flaschen zwischen zwei Führungsriemen einklemmen und diese am Auslauf auf verschiedene Transportbänder schieben (siehe Abbildung 15) [96], [107], [135]. Hauptvorteil dieser Lösung ist die im Vergleich zur drucklosen Auseinanderführung (siehe Abbildung 14) kompakte Bauweise.

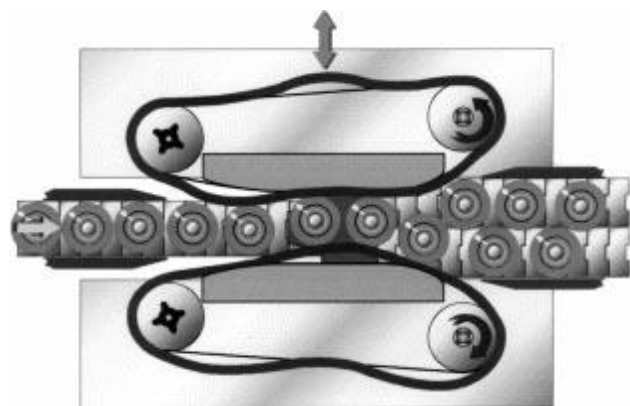


Abbildung 15: Wellenformierer zur Überleitung eines einsträngigen in einen mehrsträngigen Behälterstrom [96].

Neben der fehlerfreien Zu- und Abführung dienen diese Systeme auch der Reduzierung des durch den Flaschenstoß

entstehenden Lärms, indem die Behälter langsam beschleunigt oder abgebremst werden, ohne dass sie mit hohen Differenzgeschwindigkeiten aufeinanderprallen. Die Lärmproblematik soll im nächsten Kapitel genauer erläutert werden.

2.2 Akustische Situation in Getränkeabfüllanlagen

Die Lärmbelastung von Beschäftigten und der Arbeitsschutz haben in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, daher soll in diesem Kapitel auf die aktuelle akustische Situation in Getränkeabfüllanlagen eingegangen werden. Dabei sollen die rechtlichen Regelwerke, die Lärmquellen in Abfüllanlagen und bisher zur Anwendung kommende Verfahren zur Lärmreduzierung oder Lärmvermeidung erläutert werden. Des Weiteren soll kurz auf die für diese Arbeit wichtigen physikalischen Begriffe und Zusammenhänge der Akustik eingegangen werden.

2.2.1 Gesetzliche Regelwerke und ihr Einfluss auf die Nutzung von Getränkeabfüllanlagen

In den letzten Jahren wurden die Arbeitsschutzbedingungen in Bezug auf den Schutz der Arbeitnehmer vor schädlichen Einflüssen wie Lärm verschärft. Diese Verschärfung schlug sich in der 2003 erlassenen Verordnung der EU “Directive 2003/10/EC of the European Parliament and of the Council of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise)” [47] nieder, die 2007 mit der Umsetzung in eine deutsche Verordnung in der Bundesrepublik rechtsgültig wurde [156]. Die Verordnung schreibt einen oberen Auslösewert für den Tages-Lärmexpositionspegel von 85 dB(A) vor und einen unteren Auslösewert von 80 dB(A). Mit dem Tages-Lärmexpositionspegel ist die Lärmimmission auf den Arbeitnehmer während einer achtstündigen Arbeitsschicht gemeint [17]. Diese Werte wurden im Vergleich zur zuvor gültigen Verordnung um jeweils 5 dB(A) abgesenkt (vergleiche [11] und [156]). Die neuen Grenzwerte werden als unschädlich für das menschliche Gehör eingestuft [93] und gelten in ähnlicher Form auch in anderen Industrieländern [58].

Wird der obere Auslösewert überschritten, muss der Arbeitgeber ein Programm zur Lärminderung aufstellen. In diesem muss er in erster Linie Maßnahmen zur primären und sekundären Lärminderung definieren. Mit primärer Lärminderung sind Maßnahmen gemeint, die die Lärmemission am Entstehungsort verhindern oder reduzieren. Hier sind beispielsweise alternative Fertigungstechniken oder die Auswahl anderer Arbeitsmittel zu nennen, die eine geringere Lärmemission aufweisen. Alternativ können sekundäre Schallschutzmaßnahmen durchgeführt werden. Hierbei wird die Lärmemission der Quelle nicht beeinflusst, aber die Ausbreitung des Lärms und damit die Immission auf den Arbeitnehmer. Hier sind z. B. Kapselungen von Maschinen oder schalldämmende Verkleidungen der Arbeitsräume zu nennen. Nur wenn diese Mittel nicht zu einer Absenkung des Tages-Lärmexpositionspegels unter den oberen Auslösewert führen, muss der Arbeitgeber organisatorische Maßnahmen, wie beispielsweise Ruheräume, einrichten, in denen die

Arbeitnehmer regelmäßige Pausen einlegen müssen. Erst als letztes Mittel ist die Anwendung eines Gehörschutzes vorgeschrieben. Dieser muss bereits bei einer Überschreitung des unteren Auslösewertes zur Verfügung gestellt werden. Bei einer Überschreitung des oberen Auslösewertes muss der Arbeitgeber für dessen Anwendung sorgen. Des Weiteren muss er durch Kennzeichnung der Lärmbereiche, eine geeignete ärztliche Versorgung und eine Reihe weiterer Maßnahmen für das gesundheitliche Wohl seines Arbeitnehmers sorgen.

Diese Regelung betrifft auch die Betreiber von Abfüllanlagen und die Zulieferindustrie. Insbesondere Abfüllanlagen, die Glasbehälter verarbeiten, überschreiten die oben angegebenen Auslösewerte teilweise deutlich [26], [111], [120].

2.2.2 Schalltechnische Größen

Bei Schall handelt es sich um die Schwingung eines Mediums, das eine Masse aufweist. Daher unterscheidet man bei Schallereignissen nach den Medien, in denen sich der Schall ausbreitet bzw. von denen er ausgeht. Hierbei kann es sich um Körperschall in Festkörpern, Wasserschall in Flüssigkeiten oder Luftschall in gasförmigen Medien handeln. Da in dieser Arbeit in erster Linie Schallereignisse, die im Zusammenhang mit dem Betrieb von Getränkeabfüllanlagen eine Rolle spielen, behandelt werden, beziehen sich die im Folgenden erläuterten physikalischen Größen und Zusammenhänge alle auf den Luftschall.

Schalldruck und Schalldruckpegel

Luftschall kann durch verschiedene Ereignisse ausgelöst werden, beispielsweise durch einen Festkörper, der schwingt und die benachbarten Luftmoleküle in Schwingung versetzt oder durch Verwirbelungen der Luft selbst, wie sie beispielsweise an einer Düse oder einem schnell bewegten Objekt auftreten. Der Schall äußert sich dabei immer gleich. Er ist eine lokale Änderung des Ruheluftdrucks. Diese Luftdruckänderung breitet sich dabei als Longitudinalwellen aus. Man spricht vom Schalldruck (p), der den Ruhedruck der Umgebung überlagert. Beim Ruhedruck handelt es sich meist um den Atmosphärendruck, also ca. 10^5 Pa. Der um diesen Ruhedruck schwankende Schalldruck kann, in einem gewissen Frequenzbereich, vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden. Der Schalldruck ist dabei der Faktor, der das Empfinden der Lautstärke am stärksten beeinflusst. So reicht der Hörbereich des Menschen von der per Definition festgelegten Hörschwelle von $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (bei 1000 Hz) bis zur Schmerzschwelle von 100 Pa. Zwei Punkte fallen hierbei auf. Zum einen ist der Schalldruck im Vergleich zum Ruheluftdruck sehr klein, zum anderen ist aber der Bereich, in dem wir die Druckänderungen als Schall wahrnehmen, mit sechs Zehnerpotenzen sehr groß. Dies führt zu der typischen Darstellung des Schalldrucks als Schalldruckpegel (L_p), der sich deutlich leichter handhaben lässt. Dabei wird der aktuell herrschende Schalldruck auf die Hörschwelle des Menschen (p_0) bezogen und der Logarithmus dieses Verhältnisses gebildet. Angegeben wird dieser Wert in der Einheit Bel (B) oder gebräuchlicher in der Einheit Dezibel (dB) (siehe Formel 2.17).

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} \text{ dB} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad 2.17$$

Neben dem Schalldruck, der als Wechseldruck den Ruheluftdruck überlagert, benötigt man zur vollständigen Beschreibung eines Schallfeldes zusätzlich die Wellenlänge und die Schallgeschwindigkeit.

Schallschnelle

Die Schallschnelle v ist nicht mit der Schallgeschwindigkeit zu verwechseln. Sie beschreibt vielmehr, mit welcher Geschwindigkeit sich ein Luftmolekül bei einem Schallereignis um seine Ruhelage bewegt. Sie spielt eine Rolle für die Beschreibung des für Messungen außerordentlich wichtigen Nah- und Fernfeldes des Schalls. Im Nahfeldbereich des Schalls weisen Schalldruck und Schallschnelle oft eine Phasenverschiebung auf. Erst im Fernfeld besteht Phasengleichheit zwischen diesen beiden Größen. Das Fernfeld beginnt typischerweise mit einer Entfernung von einer Wellenlänge von der Schallquelle. Die meisten Schallmessungen werden daher im Fernfeld durchgeführt.

Schallkennimpedanz

Die Schallenergie, die von einer Schallquelle abgestrahlt wird, nimmt mit der Entfernung zu dieser ab. Das liegt daran, dass ein Teil der Energie durch Reibungsvorgänge in der Luft in Wärmeenergie überführt wird. Dieser Widerstand wird als Schallkennimpedanz bezeichnet und lässt sich für das Fernfeld durch die Formel 2.18 beschreiben.

$$Z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c^1 \quad 2.18$$

Z: Schallkennimpedanz [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$]

p: Schalldruck [Pa]

v: Schallschnelle [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

ρ : Dichte der Luft [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

c: Schallgeschwindigkeit [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Die Schallkennimpedanz beträgt bei 10^5 Pa Luftdruck und 293 K $408 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$.

Schalleistung und Schallintensität

Bei der Schalleistung P handelt es sich um die von einer Schallquelle in einem bestimmten Zeitraum abgestrahlte Energie. Es handelt sich somit um eine Emission. Die Schallintensität I hingegen beschreibt die Leistung, die durch eine bestimmte Fläche gestrahlt wird. Es handelt sich somit um eine Immission. Dieser Unterschied spielt bei der Auslegung von Maschinen eine große Rolle. So müssen bei heutigen Maschinen die nach den DIN-Normen [28], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44] oder [45] abgestrahlten Schalleistungen angegeben werden.

¹ Die Formel gilt in dieser Form nur für das Fernfeld, in dem der Abstand zur Schallquelle größer als die Wellenlänge λ ist.

Im Bereich des Arbeitnehmerschutzes hingegen interessiert beim Betrieb der Anlagen nur die beim Bediener ankommende Schallintensität [34], [37]. Den Zusammenhang der beiden Größen beschreibt dabei die Formel 2.19. Die Schalleistung P ergibt sich dabei aus der durch eine die Schallquelle einschließende geschlossene Fläche A gestrahlte Schallintensität I :

$$P = \oint I \, dA \quad 2.19$$

Ein sehr wirksames Mittel, die Schallintensität, die auf einen Bediener einwirkt, zu reduzieren, ist die Vergrößerung des Abstandes zur Schallquelle. Dadurch vergrößert sich die durchstrahlte Fläche und die Schallimmission auf den Bediener reduziert sich. Geht man beispielsweise von einer punktförmigen Schallquelle aus, die ihre Schalleistung in einen leeren Raum abstrahlt, ergibt sich daraus der Zusammenhang zwischen I und P zu $I = \frac{P}{4\pi r^2}$. Vergrößert man nun den Abstand, wächst die durchstrahlte Kugeloberfläche mit dem Quadrat des Radius an. Dadurch verringert sich die Schallintensität erheblich. Hinzu kommen natürlich noch durch die Schallkennimpedanz verursachte Reduktionen der Intensität des Schallfeldes. In der Praxis kann man so davon ausgehen, dass mit jeder Verdopplung des Abstandes der Schalldruckpegel um 6 dB abnimmt [66].

Zur Vertiefung des Themas sei an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur, wie [66], [94], [95], [100] und [154] verwiesen.

2.2.2.1 Wahrnehmung durch das menschliche Gehör und Einfluss auf die Messmethodik

Das menschliche Gehör ist nicht für alle Schallereignisse gleich empfindlich. So ist unser Gehör in manchen Frequenzbereichen empfindlicher als in anderen. Diese Tatsache versuchen Filter zu berücksichtigen, die bei der Messung von Schall zum Einsatz kommen. So wird die Bestimmung des Schalldruckpegels, der zur Bewertung von Schallimmissionen auf das Bedienpersonal und Emissionen von Maschinen zum Einsatz kommt, mit Hilfe des A-Filters durchgeführt. Mit Hilfe dieses Filters wird das Hörempfinden des Menschen nachgebildet. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, wird hierbei der Frequenzbereich zwischen 1000 und 4000 Hz bei der Messung stärker berücksichtigt als die übrigen Frequenzbereiche. Neben dem A-Filter kommen auch andere Filter wie der C-Filter zum Einsatz, der in weiten Bereichen das aufgenommene Geräusch unverändert lässt. Er wird z. B. zur Ermittlung von Spitzenschalldruckpegeln eingesetzt. Darüber hinaus existieren noch einige andere Filter, die aber wenig zum Einsatz kommen. Die Anwendung eines Filters wird durch die Kennzeichnung z. B. des Schallpegels mit einem in Klammern gesetzten A nach der Angabe der Einheit kenntlich gemacht, also beispielsweise dB(A).

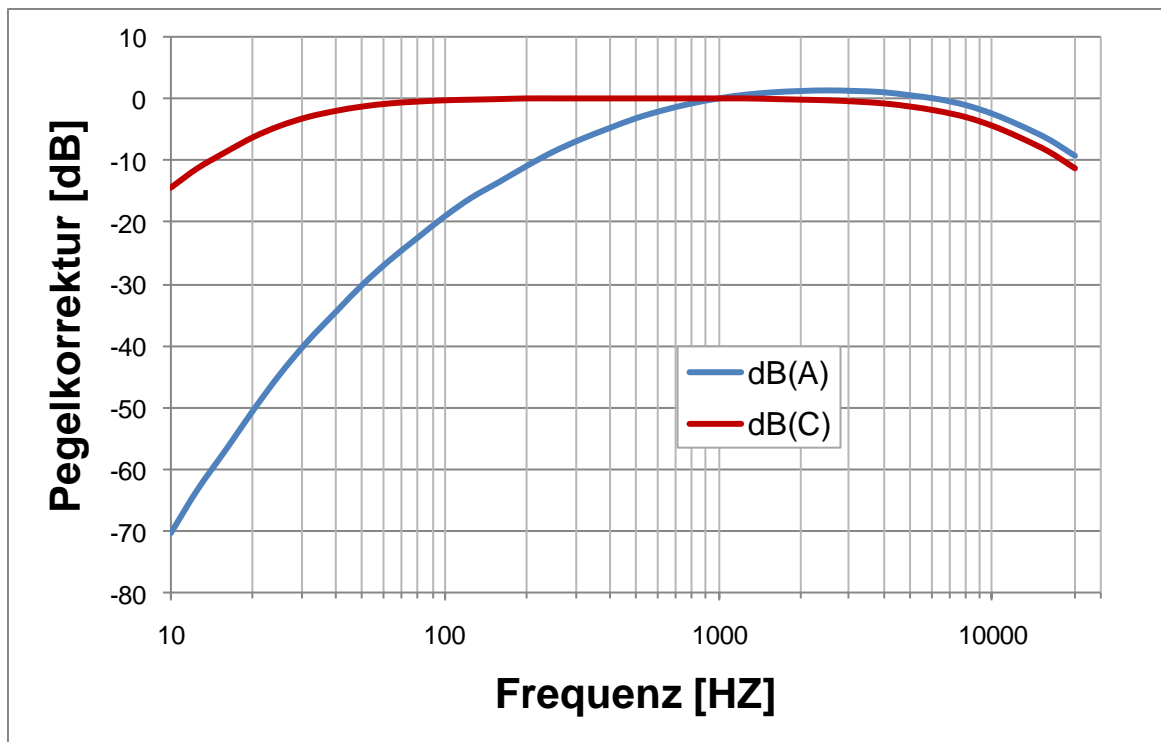


Abbildung 16: Frequenzbewertung des A- und C-Filters nach DIN EN 61672-1 [35]

Neben der Frequenz hat auch die Art des Geräusches einen Einfluss auf unser Hörempfinden. So werden stark impulshaltige Geräusche als störender empfunden, als ein gleichbleibendes Geräusch. Diese Art von Geräuschen spielt gerade im Bereich der Getränkeabfüllanlagen, die Glasflaschen abfüllen, eine große Rolle. Der Zusammenstoß von Glasflaschen erzeugt ein stark impulshaltiges Geräusch (siehe [126] und Tabelle 1). Dies gilt es bei der Messung zu berücksichtigen. Dazu verfügen die meisten Messgeräte über verschiedene Einstellungen der Zeitbewertung von Schall. Die beiden gebräuchlichsten sind die Einstellung Fast („F“) und Impuls („I“). Sie unterscheiden sich in ihrer Reaktionszeit auf ein Schallereignis. Dabei reagiert die Einstellung „I“ (35 ms) ca. viermal schneller auf ein Schallereignis als die Einstellung „F“ (125 ms) und bewertet so impulshaltige Schallereignisse deutlich stärker [35]. Ist der Unterschied zwischen den Messwerten in „F“ und „I“ Bewertung größer als 3 dB, muss nach den gängigen Normen zur Ermittlung der Geräuschimmission am Arbeitsplatz ein Impulzuslag zur Messung vorgenommen werden. Dabei werden Zuschläge von bis zu 6 dB zum in der Einstellung „F“ ermittelten Schalldruckpegel addiert (bei Differenzen größer 6 dB) [34]. Diese Maßnahmen zur Anpassung der Bewertungen treffen damit besonders auf die Schallimmissionen zu, die auf einen Bediener in einer Flaschenabfüllanlage wirken. So liegt der Hauptfrequenzanteil im beim A-Frequenzfilter besonders relevanten Bereich von 1000 bis 4000 Hz [111]. Darüber hinaus sind die Geräuschquellen, insbesondere die Flaschentransporteur, stark impulshaltig (siehe Tabelle 1). Beide Punkte steigern die zur Bewertung der Geräuschimmission am Arbeitsplatz herangezogenen Schalldruckpegel.

Tabelle 1: Aufnahme eines Flaschenpulses, auf den mit den angegebenen Differenzgeschwindigkeiten Flaschen aufprallen. Die Messungen wurden in einem Meter Entfernung zum Aufprallpunkt in den Einstellungen „Fast“ und „Impuls“ durchgeführt. (n = 5, $\alpha = 0,05$)

Geschwindigkeit [m/s]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Schalldruckpegel Einstellung "Fast" [dB(A)]	64,7 ± 0,3	74,4 ± 1,0	80,0 ± 0,6	85,3 ± 0,5	87,6 ± 0,5	90,1 ± 0,8	92,5 ± 1,1
Schalldruckpegel Einstellung "Impuls" [dB(A)]	74,6 ± 1,0	85,4 ± 1,4	89,1 ± 1,0	94,1 ± 0,8	96,9 ± 0,5	97,7 ± 0,9	99,8 ± 0,8

Neben der reinen Wahrnehmung durch das menschliche Gehör und der eingeschränkten Kommunikationsfähigkeit durch Lärm [160] können einzelne Schallereignisse oder ein lauter Dauerschallpegel das Gehör des Menschen auch schädigen. Hierzu findet sich eine große Anzahl von Studien in der Fachliteratur, die gerade auch den schädlichen Einfluss von Industrielärm auf das menschliche Gehör belegen [1], [27], [48], [67], [99]. So gelten Dauerschallpegel von über 85 dB(A) als schädlich. Dies wurde durch Studien [20] bestätigt und in die Gesetzgebung [47] sowie die arbeitsrechtlichen Vorschriften [17], [18], [19] aufgenommen. Diese fordern einen Tageslärmmexpositionspegel $L_{EX, 8h}$ von unter 80 dB(A) und schreiben einen $L_{EX, 8h}$ mit Gehörschutz von maximal 85 dB(A) vor.

2.2.3 Maßnahmen zur Lärmreduzierung

Zur wirksamen Reduzierung des Lärms müssen insbesondere die Hauptemittenten identifiziert werden. Anschließend muss gezielt gegen diese vorgegangen werden. Viele Lärmquellen mit geringeren Schalldruckpegeln fallen bei der Betrachtung des Gesamtschalldruckpegels nicht ins Gewicht. So kann man sagen, dass bei einem Unterschied von 10 dB und mehr zwischen zwei Schallquellen die Emissionen der leiseren Quelle in der Praxis keine Rolle mehr spielen. Der Gesamtschalldruckpegel ergibt sich damit aus dem Schalldruckpegel der dominierenden Quelle. Liegen dagegen zwei Schallquellen mit gleichem Schalldruckpegel vor, erhöht sich der Gesamtpegel um ca. 3 dB. Das bedeutet in der Praxis, dass sich Schallschutzmaßnahmen auf die Hauptlärmmittenten konzentrieren müssen [58]. Hierzu kommen in Getränkeabfüllanlagen beispielsweise Kapselungen von Anlagenteilen zum Einsatz. Diese finden sich an besonders lärmintensiven Teilen der Anlage, wie z. B. am Ein- bzw. Auslauf der Flaschenreinigungsmaschine, aber auch an vielen anderen Maschinen [120]. Neben den Maschinen können auch Transporteure oder zumindest Teile von Transporteuren mit Schallschutztunneln umbaut werden. Allerdings sind diese in der Praxis nur selten zu finden, da sie zum einen den Zugriff auf die Transporteure erschweren und zum anderen hygienische Probleme verursachen können [24], [60] und [161].

Gerade die Behältertransporteure stellen allerdings eine Hauptlärmquelle in Getränkeabfüllanlagen dar [59], [138] und [161]. So spielen hierbei insbesondere die von den zusammenstoßenden Glasflaschen ausgehenden Lärmpegel eine wichtige Rolle. Untersuchungen dieses Phänomens sind in [111] und [126] zu finden. Zum Zusammenstoß

kommt es an verschiedenen Stellen des Transporteurs. Hierbei führen höhere Differenzgeschwindigkeiten beim Zusammenstoß zu einem höheren emittierten Schalldruckpegel [111] (siehe auch Abbildung 19). Zu großen Differenzgeschwindigkeiten kommt es zum einen am Staupunkt des Transporteurs, an dem die Flaschen aus dem freien Transport in den aufgestauten Flaschenpulk übergehen. Zum anderen kann es aber auch im aufgestauten Flaschenpulk zu Aufprallereignissen mit hohen Differenzgeschwindigkeiten kommen. So neigen unter hohem Staudruck geführte Flaschen zum Verspringen. Hierbei springen Flaschen aus dem Pulk in sich ergebende Lücken. Dabei können sie sehr stark beschleunigt werden. Sie prallen dann mit hoher Geschwindigkeit auf ein festes Hindernis. Bei diesem handelt es sich meist um benachbarte Flaschen. Eine Möglichkeit, dies zu verhindern, ist die staudruckarme Behälterführung im Pulk.

Die Lärmemissionen, die von Transporteuren ausgehen, sind insbesondere vor dem Hintergrund problematisch, dass diese Anlagenteile über die gesamte Anlage verteilt sind und nahezu alle Bediener von ihnen betroffen sind. Da sich im Bereich der Transporteure aus den oben genannten Gründen sekundäre Schallschutzmaßnahmen verbieten, kommen meist primäre Schallschutzmaßnahmen zum Einsatz, die direkt gegen die Ursache der Schallentstehung vorgehen. Hier sind vor allem die in Kapitel 2.1.3.4 beschriebenen Systeme zur staudruckarmen Zusammen- bzw. Auseinanderführung von Flaschen zu nennen, die am Ein- und Auslauf der Transporteure zu erheblichen Schallreduktionen führen. Ein weiterer Ansatz ist die Einführung der Regelung von Transporteuren mit Hilfe von Stauschaltern (siehe Kapitel 2.1.3.3), die eine Reduktion des Schalldruckpegels durch eine Reduktion der Differenzgeschwindigkeiten der Behälter bewirkt [111], [112], [113]. Außerdem gibt es mechanische Verbesserungen, wie die Einführung von kurvengängigen Transportbandketten, die den rechtwinkligen Überschub ersetzen und so das Auflaufen der Flaschen gegen ein festes Hindernis verhindern [161]. Auch die Führung der Behälter durch Geländer konnte verbessert werden [138]. Neben diesen Verbesserungen konnte in letzter Zeit auch das Leerlaufgeräusch der Transporteure reduziert werden, indem spezielle Gleitschuhe zur Rückführung der Scharnierbandketten genutzt werden oder Synchronmotoren eingesetzt werden, die die Asynchronmotoren ersetzen und somit die an den Motoren angebrachten Lüfter überflüssig machen [50], [105].

Ein neuer Ansatz zur lärmarmen Regelung der mehrsträngigen Behältertransporteure soll in dieser Arbeit vorgestellt werden.

Ein zweiter Ansatz, der neben dem direkten Vorgehen gegen die Schallemissionen sehr häufig zum Einsatz kommt, ist die Verbesserung der Raumakustik. Hierzu werden schalldämpfende oder schallabsorbierende Materialien auf oder vor schallharten Oberflächen angebracht, um die Reflexion des Schalls zu verhindern. Die mehrfache Beaufschlagung des Bedienpersonals durch die gleiche Schallquelle kann dadurch verhindert oder zumindest reduziert werden. Zur Verbesserung der Raumakustik stehen im Bereich der Getränkeabfüllanlagen insbesondere schallabsorbierende Wandverkleidungen und sogenannte Baffeldecken zur Verfügung. Baffeldecken bestehen aus schallabsorbierenden Paneelen, die unter der Hallendecke

installiert werden. Beiden Systemen gemein ist die Tatsache, dass eine schallharte Oberfläche (Hallendecke, Hallenwand) mit einem schallabsorbierenden Bauteil verkleidet wird. Näheres zu diesen sekundären Schallschutzmaßnahmen findet sich bei [114], [115], [116], [117], [118] und [119], soll aber hier nicht näher erläutert werden, da sich die in dieser Arbeit erläuterten Maßnahmen auf die primären Schallschutzmaßnahmen konzentrieren.

2.3 Beschreibung des betrachteten Systems

Das in dieser Arbeit betrachtete Basissystem besteht aus zwei Maschinen und einem dazwischen befindlichen Transporteur, der sich innerhalb des Materialflusskreises der Behälter befindet (siehe Kapitel 2.1.3 Abbildung 3). Die beiden Maschinen sind über den mehrsträngigen Transportpuffer verbunden, der sowohl zum Transport der Behälter als auch zur Entkopplung der beiden Maschinen dient. Der Transportpuffer kann aus $n = 1$ bis N Abschnitten bestehen.

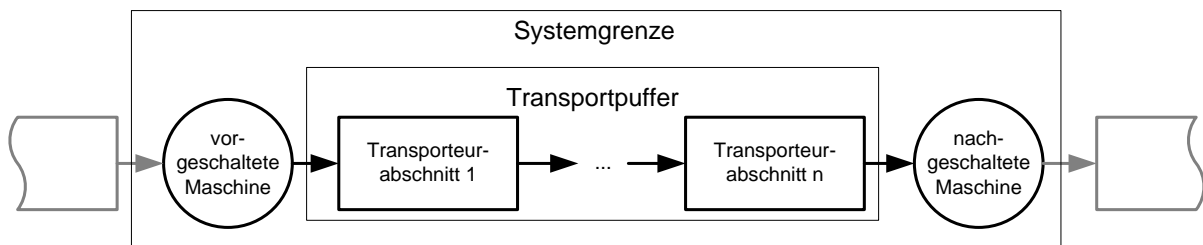


Abbildung 17: Darstellung des betrachteten Maschine-Puffer-Maschine-Systems.

Zur Erfassung der Zustände im System stehen sowohl Stauschalter, wie sie im Kapitel 2.1.3.3 beschrieben wurden, zur Verfügung, als auch ein im Rahmen der Arbeit entwickelter Sensor zur Zählung von im Pulk geförderten Behältern. Dieser wird in Kapitel 3.4 genauer beschrieben und ermöglicht neben der Zählung der in das System geförderten und aus dem System entfernten Behälter auch die Erfassung der rudimentären Maschinenzustände (Maschine produziert / Maschine steht).

Die durch die in der Arbeit entwickelte Regelung zu beeinflussenden Größen des Systems sind der Zufluss an Behältern, der Abfluss von Behältern und die Transportbandgeschwindigkeiten der einzelnen Transporteurabschnitte. Die Geschwindigkeiten der Abschnitte können meist nur als Ganzes verändert werden. Ausnahmen hiervon sind die in Kapitel 2.1.3.4 erwähnten Geschwindigkeitsprofile, die über die Breite des Transporteurs umgesetzt werden können. Neben diesen Regelgrößen des Systems sind außerdem die Störgrößen von Interesse. Speziell der Zu- und Abfluss von Behältern kann durch Stillstände der Maschinen in Erscheinung treten.

Aus diesen Gründen wird zwischen an der Anlage erfassten und damit bis auf den Messfehler exakten Größen und durch die Regelung zu beeinflussenden Größen unterschieden. Die Regelgrößen werden in der Folge mit dem Zusatz „set“ gekennzeichnet, da sie zwar von der Regelung vorgegeben werden, aber auf Grund von Störungen oder anderen Einflussfaktoren

im physikalischen System nicht immer oder aber nur mit Zeitversatz umgesetzt werden können (z. B. kann die Erhöhung der Ausbringung einer Maschine nicht so schnell umgesetzt werden, wie es die Regelung vorgibt). In Tabelle 2 sind alle in der Folge verwendeten Regel- und Messgrößen aufgeführt.

Tabelle 2: Mess- und Regelgrößen des Systems

	Messgröße	Regelgröße
Ausbringung der vorgeschalteten Maschine	$q_{in}(t)$	$q_{in_set}(t)$
Ausbringung der nachgeschalteten Maschine	$q_{out}(t)$	$q_{out_set}(t)$
Geschwindigkeit des ersten Pufferabschnitts	$v_{in}(t)$	$v_{in_set}(t)$
Geschwindigkeit des letzten Pufferabschnitts	$v_{out}(t)$	$v_{out_set}(t)$
Geschwindigkeit des Pufferabschnitts n	$v_n(t)$	$v_{n_set}(t)$

Ordnet man diese Größen den einzelnen Komponenten zu, ergibt sich das in Abbildung 18 dargestellte Bild für ein System bestehend aus vor- und nachgeschalteter Maschine sowie einem Transporteur mit N+1 Transporteurabschnitten.

Neben diesen zu beeinflussenden Größen müssen auch die physikalischen bzw. technischen Größen des Systems beachtet werden. Hierzu zählen neben den geometrischen Abmessungen auch die Einstellausbringungen der Maschinen (maximale Ausbringung, mit der die Maschine betrieben wird) und die maximal möglichen Geschwindigkeiten, mit denen die Transporteure betrieben werden können. Diese Größen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Physikalische und technische Größen des Systems

Größe	Bezeichner
Kapazität des Transporteurs [Fl.]	C
Einstellausbringung der vorgeschalteten Maschine [Fl./h]	q_{in_max}
Einstellausbringung der nachgeschalteten Maschine [Fl./h]	q_{out_max}
Längen der einzelnen Transporteurabschnitte [m]	l_0, \dots, l_N
maximale Geschwindigkeit der Transportbänder [m/s]	$v_{in_max}, \dots, v_{out_max}$

Die im weiteren Verlauf der Arbeit benutzte Symbolik bezieht sich auf die hier beschriebenen Größen. Die entwickelte Regelung sowie die stauschalterbasierten Regelungen beziehen sich auf das erläuterte und in Abbildung 18 dargestellte Maschine-Puffer-Maschine-System.

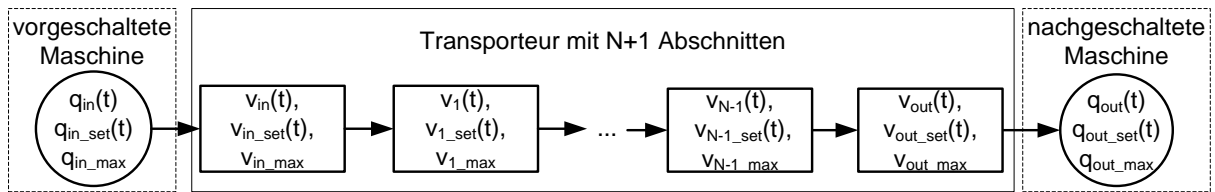


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Systems mit $N+1$ Pufferabschnitten und den Anlagenparametern

3 Methodenentwicklung zur Regelung und experimentellen Validierung von Massentransporturen

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit entwickelten Anforderungen und Methoden zur lärmarmen und effizienten Regelung von Massentransporturen formuliert sowie Wege zur Bewertung der Regelung aufgezeigt. Im Mittelpunkt stehen dabei die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte stufenlose Regelung für Massentransporture und die dazu notwendige Sensorik zur Erfassung von im Pulk geförderten Behältern. Des Weiteren wurde eine stauschalterbasierte Regelung entwickelt, die den Stand der Technik darstellt und somit als Referenzmodell für die stufenlose Regelung dient. Beide Regelungskonzepte wurden an einer ebenfalls vorgestellten Pilotanlage umgesetzt.

Neben der Entwicklung und Umsetzung der Regelung wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das zum Testen der Regelungsalgorithmen über längere Zeiträume und unter unterschiedlichen Randbedingungen dient.

3.1 Anforderungen an effiziente und lärmarme Puffer

Um einen Algorithmus zu erstellen, der sowohl einen lärmarmen Transport von Behältern als auch eine effiziente Nutzung der Transporture erlaubt, wurden zunächst Anforderungen an das Konzept formuliert. In dem nachfolgend dargestellten Anforderungskatalog wurden aber neben diesen beiden Punkten auch die grundlegenden Anforderungen an eine Transportbandregelung berücksichtigt.

3.1.1 Sicherer Betrieb und Erfüllung der grundlegenden Aufgaben einer Transportbandregelung

Eine Regelung für Massentransporture an Getränkeabfüllanlagen muss in erster Linie in der Lage sein, die grundlegenden Aufgaben zu erfüllen. Diese beinhalten die sichere Aufnahme der von der vorgeschalteten Maschine zur Verfügung gestellten Behälter, deren möglichst störungsfreien Transport zur nachfolgenden Maschine und die lückenlose Versorgung der nachgeschalteten Maschine mit Behältern. Diese Anforderungen lassen sich durch eine entsprechende Einstellung der Transportbandgeschwindigkeiten erreichen und müssen dementsprechend bei der Umsetzung der Regelung berücksichtigt werden.

Zur sicheren Aufnahme der Behälter ist es notwendig, eine gewisse Geschwindigkeit der Transportbänder nicht zu unterschreiten, da sonst ein Rückstau droht. Dieser kann sich bei geschlossener Geländerführung in die vorgeschaltete Maschine zurückstauen und dort Schäden oder zumindest einen ungewollten Stopp (bei Sicherung gegen Rückstau) verursachen. Bei offenen Geländerführungen, wie sie beispielsweise bei drucklosen Zusammen- oder Auseinanderführungen zu finden sind, kommt es zu umfallenden Flaschen oder Behälterbruch. Daher müssen bei der Wahl der Geschwindigkeit des Einlaufbandes (v_{in}) die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine (q_{in}), der Durchmesser der verarbeiteten

Behälter (d) und die gewünschte Anzahl an Behältern pro Reihe (n), also die Breite des Behälterstroms, berücksichtigt werden. Die Breite des Behälterstroms auf dem ersten Transportbandabschnitt sollte dabei nicht kleiner sein als die Breite des Behälterstroms, der die Maschine oder die Behälterauseinanderführung verlässt, da sonst Lücken in den kompakten Behälterstrom gefahren werden. Deshalb muss folgender Zusammenhang erfüllt sein:

$$v_{in} = \frac{q_{in} * d}{n} = c_{in} * q_{in} \quad 3.1$$

Zur einfacheren Handhabung wurden der Durchmesser der verarbeiteten Behälter (d) und die gewünschte Anzahl an Behältern pro Reihe (n), die sich bei gleichbleibendem System nicht ändern, in dem Faktor c_{in} zusammengefasst.

Die Einstellung der Geschwindigkeit auf dem Auslaufband (v_{out}) kann analog erfolgen. Hier muss lediglich eine gewisse Erhöhung der Geschwindigkeit berücksichtigt werden (Δv_{slip}), um den für den Betrieb vieler Maschinen oder drucklosen Zusammenführungen nötigen Staudruck aufzubauen.

$$v_{out} = \frac{q_{out} * d}{n} + \Delta v_{slip} = c_{out} * q_{out} + \Delta v_{slip} \quad 3.2$$

Auch hier wurden die Systemparameter Behälterdurchmesser und Behälterstrombreite zu einem Faktor (c_{out}) zusammengefasst.

Beim Transport der Behälter muss darauf geachtet werden, dass eine bestimmte Geschwindigkeit nicht unterschritten wird, um die Versorgung der nachgeschalteten Maschine mit Behältern zu sichern. Dazu muss der Zustrom an Behältern in den sich aufstauenden Pulk am Ende des Transporteurs gleich groß oder größer als die Entnahme an Behältern durch die nachfolgende Maschine sein. Hierzu muss die Geschwindigkeit des Transportbandes der Breite des Behälterstroms angepasst werden.

$$v_{Band} \geq \frac{q_{out} * d}{n} \quad 3.3$$

Diese Bedingung kann natürlich nur gelten, so lange das System störungsfrei arbeitet. Treten Störungen oder Mangel an der vorgeschalteten Maschine auf, wird Formel 3.3 zwangsläufig nach einer gewissen Zeit verletzt und es kommt zum Mangel an der nachgeschalteten Maschine.

In Bezug auf den sicheren Transport der Behälter ist außerdem besonders zu berücksichtigen, dass die Geschwindigkeitsabstufung der Transportbandabschnitte so gewählt wird, dass der Kippwinkel der Flaschen nicht überschritten wird [86]. Dies ist insbesondere bei der Förderung von PET-Flaschen wichtig [125], die einen hohen Schwerpunkt oder eine ungünstig geformte Standfläche aufweisen.

3.1.2 Stabilisierung der Pufferfüllung

Die essentielle Anforderung an die Regelung muss es sein, die Pufferfüllung im störungsfreien Betrieb konstant im Bereich der Sollfüllung zu halten und nach Störungen die Sollfüllung möglichst schnell wieder anzufahren, um auf eine erneute Störung vorbereitet zu sein. Dies muss durch eine Anpassung der Ausbringung der vor- oder nachgeschalteten Maschine erfolgen.

3.1.3 Anwendbarkeit auf die in der Praxis üblichen mehrsträngigen Puffersysteme

Die in der Arbeit vorgestellten Regelungskonzepte sollen auf die in Abbildung 10 dargestellten und in Kapitel 2.1.3 erwähnten Parallelspeicher und segmentierten Parallelspeicher anwendbar sein. Spezialformen dieser Puffer, wie die in Abbildung 13 dargestellten Puffertische mit variabler Länge, bleiben dabei unberücksichtigt.

Bei der Erarbeitung der Pufferregelung muss eine große Variationsvielfalt berücksichtigt werden. Die Systeme unterscheiden sich insbesondere in den folgenden Punkten:

- Durchsatz: Die Ausbringung des Zentralaggregats kann je nach Anlagenauslegung bis zu 60.000 Fl./h betragen (bezogen auf eine Glasmehrwegfüllmaschine). Dementsprechend sind bei den am weitesten vom Zentralaggregat entfernten Flaschenpuffern nach dem V-Diagramm (siehe Abbildung 9) Durchsatzspitzen von bis zu 72.000 Fl./h zu erwarten. Viele in der Praxis im Einsatz befindliche Maschinen übertreffen diese Ausbringungen allerdings deutlich, so dass in dieser Arbeit mit einem großzügig bemessenen Ausbringungswert von bis zu 100.000 Fl./h gearbeitet wird.
- Behälteraufnahme und -abgabe können, wie in Kapitel 2.1.3.4 beschrieben, unterschiedlich konstruiert sein. Die Steuerung für diese Anlagenteile wird nicht direkt mit in das Regelungskonzept aufgenommen, da diese Anlagenteile in den letzten Jahren sehr große Fortschritte gemacht haben und die Steuerungen damit als ausgereift anzusehen sind. Es wird davon ausgegangen, dass diesen Anlagenteilen, genau wie der vor- und nachgeschalteten Maschine, Sollwertvorgaben gemacht werden. Diese werden dann von den Steuerungen der Behälterauseinanderführung bzw. Behälterzusammenführung umgesetzt.
- Die Dimensionen der Puffer können je nach Auslegung, Platzverhältnissen und Anlagenausbringung stark variieren. Daher müssen diese Faktoren bei der Auslegung der Regelung berücksichtigt werden. Insbesondere die Anzahl der Segmente, die über einen eigenen Antrieb verfügen, müssen berücksichtigt werden, damit sie einzeln angesteuert werden können.

3.1.4 Reduzierung der Lärmemissionen bei der Förderung von Behältern

Wie bereits im Kapitel 2.2.3 genauer erläutert, spielen die Behältertransporteure eine große Rolle bei der Lärmemission im Flaschenkeller. Sie tragen sowohl durch ihre durch den Betrieb verursachten Lärmabstrahlungen (Leerlaufgeräusche) als auch durch die transportierten Behälter im erheblichen Maße zum Lärmpegel der Abfüllanlage bei [60]. Insbesondere der durch Behälterstöße verursachte Lärm soll bei der Auslegung der Regelung berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, hängt diese Schallabstrahlung im besonderen Maße von der Aufprallgeschwindigkeit der Behälter ab.

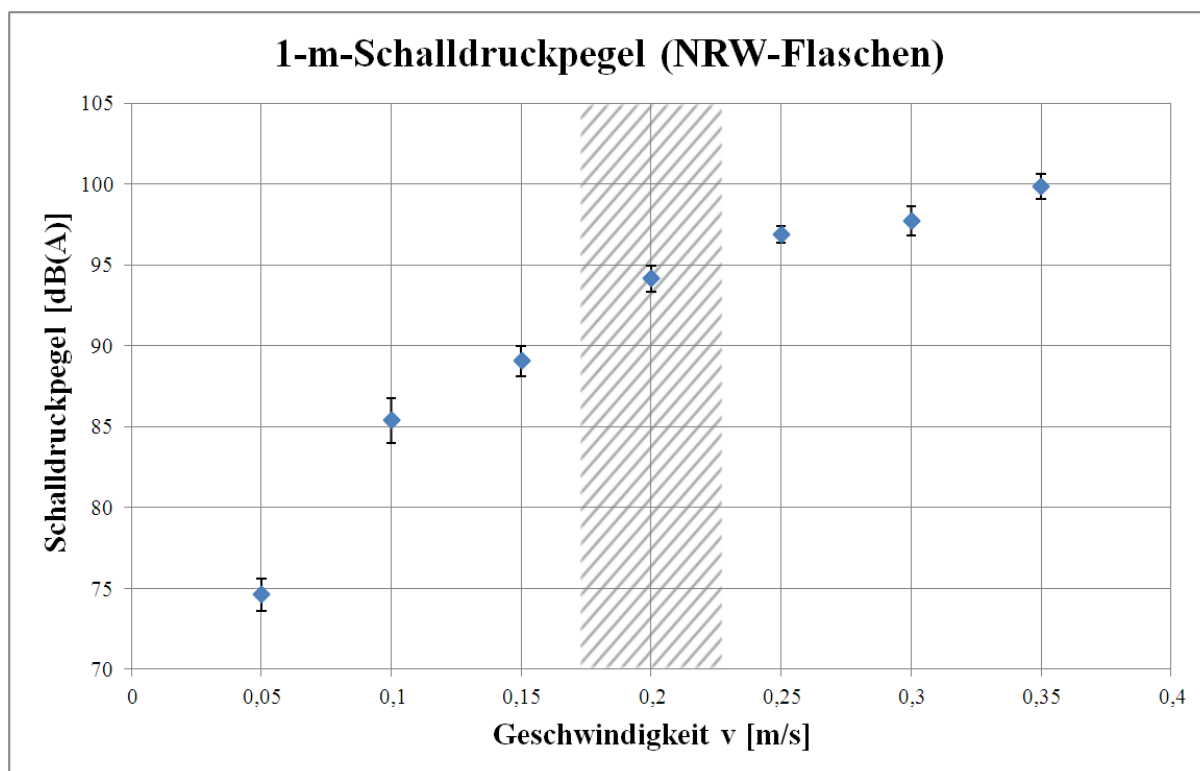


Abbildung 19: Schallemissionen von NRW-Flaschen, die bei den aufgeführten Geschwindigkeiten auf ein stehendes Ende eines Flaschenpulkts prallen. Die Schalldruckpegel wurden in einem Meter Entfernung vom Aufprallpunkt aufgenommen ($n = 5$, $\alpha = 0,05$). Die typische Transporteurbandgeschwindigkeit von Behältertransporteuren ist schraffiert dargestellt.

Daher soll die Regelung die Transporteure nur mit den in Kapitel 3.1.1 beschriebenen, für die Erfüllung der grundlegenden Aufgaben notwendigen Geschwindigkeiten betreiben. Zu hohe Differenzgeschwindigkeiten, wie sie bei heutigen Stauschalterregelungen insbesondere nach Störungen vorkommen, müssen im Sinne einer Lärmreduzierung vermieden werden.

3.1.5 Effizienter Betrieb der Transportstrecken

Wie im Kapitel 2.1.3.1 erläutert, haben Transportstrecken einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz von Getränkeabfüllanlagen. Ziel der Regelung muss es daher sein die Anlageneffizienz, die durch den Betrieb mit stauschalterbasierten Regelungen erreicht werden kann, mindestens zu erhalten, nach Möglichkeit aber zu verbessern. Hierbei spielen

insbesondere die durch die Regelung der Transporteure zu beeinflussenden Größen eine Rolle. Zu nennen sind hier die Totzeit des Puffers (siehe Kapitel 2.1.3.2), die Nutzung der gesamten Pufferkapazität und die Ausbringung der zur Einstellung der Pufferfüllung nachzuregelnden Maschine:

- Die Totzeit lässt sich durch die bedarfsgerechte Erhöhung der Transportbandgeschwindigkeit reduzieren und somit die Versorgung der nachgeschalteten Maschine speziell bei Anti-Starve-Puffern verbessern.
- Die Nutzung der Pufferkapazität hängt bei heutigen Anlagen stark von der Positionierung der als Endschalter genutzten Stauschalter ab. Sind sie falsch positioniert, wird nicht die gesamte Pufferfläche genutzt.
- Die Einstellung der Ausbringung der Maschinen kann zu einer schnelleren Erholung des Puffers nach einer Störung führen und somit den Puffer schneller in den Sollzustand versetzen, in dem er optimal auf die Abpufferung der nächsten Störung vorbereitet ist.

Vergleicht man die unter 3.1.4 geforderte möglichst geringe Transportbandgeschwindigkeit zur Reduzierung der Schallemissionen mit der hier geforderten hohen Ausbringung der nachzuregelnden Maschine und speziell mit der für die Verkürzung der Puffertotzeit notwendigen Erhöhung der Transportbandgeschwindigkeit, erkennt man den Zielkonflikt, der in den Anforderungen an die neu zu entwickelnde Regelung begründet liegt. Diesen Zielkonflikt zwischen effizienter Regelung auf der einen Seite und lärmärmerer Regelung auf der anderen Seite gilt es zu lösen.

3.2 Umsetzung einer stauschalterbasierten Regelung an einer Versuchsanlage

Als Referenzmodell für die in dieser Arbeit neu entwickelte stufenlose Pufferregelung (siehe Kapitel 3.3) wurde eine stauschalterbasierte Regelung an einer Versuchsanlage (siehe Kapitel 3.5) implementiert. Diese entspricht in Aufbau und Funktion stauschalterbasierten Transporteuregelungen, wie sie so auch an industriell genutzten Anlagen zu finden sind.

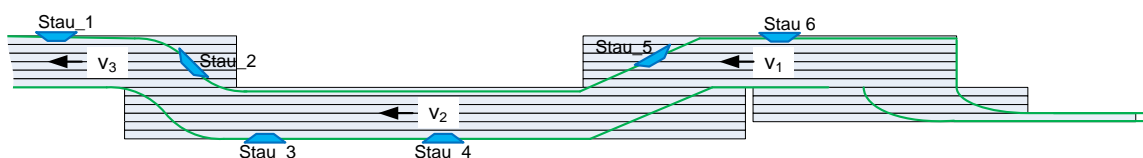


Abbildung 20: Versuchsstrecke mit den Positionen der Stauschalter Stau_1 bis Stau_6.

Die Erfassung der Füllung der Versuchsstrecke erfolgt mit Hilfe von sechs Stauschaltern (siehe Abbildung 20). Die Stauschalter Stau_1 und Stau_6 fungieren jeweils als Endschalter für die vorgeschaltete (Stau_6) und nachgeschaltete Maschine (Stau_1). Die Stauschalter Stau_2 bis Stau_5 dienen der Anpassung der Bändergeschwindigkeiten und der Maschinenausbringungen. Die Anpassung der Geschwindigkeiten und Ausbringungen erfolgt

mit Hilfe einer Entscheidungstabelle. Diese wird in der Folge für den Anti-Starve- und den Anti-Block-Betrieb erläutert. Ein Stauschalter gilt als belegt, wenn er den Zustand „true“ annimmt und als nicht belegt, wenn er den Zustand „false“ annimmt.

Die folgenden Werte müssen der Regelung vorgegeben werden und dem zu regelnden System angepasst werden:

- v_{max} Dies ist die maximale Geschwindigkeit, die gefahren werden darf, ohne dass Lücken im Behälterstrom entstehen. Die Ermittlung der Geschwindigkeit erfolgt nach Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1).
- v_{min} Dies ist die minimale Geschwindigkeit, die gefahren werden muss, damit die nachfolgende Maschine mit Behältern versorgt werden kann. Die Ermittlung der Geschwindigkeit erfolgt nach Formel 3.2 (siehe Kapitel 3.1.1).
- q_{in_max} Die Einstellausbringung der vorgeschalteten Maschine wird nur im Anti-Block-Betrieb abgefragt. Im Anti-Starve-Betrieb wird sie in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der nachfolgenden Maschine und der Stauschalterbelegung angepasst.
- q_{out_max} Die Einstellausbringung der nachgeschalteten Maschine wird nur im Anti-Starve-Betrieb abgefragt. Im Anti-Block-Betrieb wird sie in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der vorgeschalteten Maschine und der Stauschalterbelegung angepasst.

Die Regelung ist für die Versuche so ausgelegt, dass sie sowohl für den Anti-Starve- als auch für den Anti-Block-Betrieb das aufgestaute Pulkende zwischen den Stauschaltern Stau_3 und Stau_4 einstellt. Bewegt sich das Pulkende aus diesem Bereich, werden die Ausbringung der vor- bzw. nachgeschalteten Maschine und die Bändergeschwindigkeiten nach den folgenden Schemata angepasst.

Anti-Starve-Puffer: Schaltzustände und Regelgrößen einer stauschalterbasierten Pufferregelung

Schaltzustände	Anpassung der Regelgrößen
Stau_1 = false Stau_2 = false Stau_3 = false Stau_4 = false Stau_5 = false Stau_6 = false	<p>q_{in}: Sobald die vorgeschaltete Maschine anläuft, wird diese mit maximaler Ausbringung betrieben. Bei der Pilotanlage bedeutet dies: $q_{in_set} = 1,3 * q_{out_max}$</p> <p>$q_{out}$: Da Stau_1 nicht belegt ist, erhält die nachfolgenden Maschine keine Freigabe: $q_{out_set} = 0$</p> <p>$v_{1...3}$: Alle Geschwindigkeiten werden auf das Maximum gesetzt, das bedeutet, dass alle Geschwindigkeiten nach der Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst werden</p>

<p>Stau_1 = true Stau_2 = false Stau_3 = false Stau_4 = false Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: Da die Sollfüllung deutlich unterschritten ist, läuft die vorgeschaltete Maschine mit maximaler Ausbringung q_{in_set} = 1,3 * q_{out_max}</p> <p>q_{out}: Wechselt der Zustand von Stau_1 von false auf true (positive Flanke), erhält die nachgeschaltete Maschine nach der Verzögerungszeit t_{delay} die Freigabe und läuft an. Wechselt der Zustand von Stau_1 von „true“ auf „false“ (negative Flanke) wird der nachgeschalteten Maschine die Freigabe entzogen und diese läuft ohne Verzögerungszeit aus. Die Einstellung der Ausbringung erfolgt nach dem Sollwert aus der Visualisierung q_{out_set} = q_{out_max}</p> <p>v₁: Der erste Transportbandabschnitt wird mit maximaler Geschwindigkeit nach Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1) betrieben.</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: v₃ = v_{min}</p>
<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = false Stau_4 = false Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: Die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine wird nach der Formel q_{in_set} = 1,15 * q_{out_max} eingestellt. Bei einem negativen Flankenwechsel von Stau_2 erfolgt die Einstellung ohne Verzögerungszeit. Die Regelung wechselt in den oben dargestellten Zustand. Bei einem positiven Flankenwechsel von Stau_2 erfolgt die Anpassung der Ausbringung erst nach der Verzögerungszeit t_{delay}.</p> <p>q_{out}: Die Einstellung der Ausbringung erfolgt nach dem Sollwert aus der Visualisierung q_{out_set} = q_{out_max}</p> <p>v₁: Auf dem ersten Transportbandabschnitt kann eine niedrigere Geschwindigkeit gewählt werden, da auch die vorgeschaltete Maschine heruntergeregt wurde. Die Anpassung erfolgt nach Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1).</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: v₃ = v_{min}</p>

<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = true Stau_4 = false Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: Die Sollfüllung des Transporteurs ist eingestellt. Die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine wird bei einem positiven Flankenwechsel nach der Verzögerungszeit t_{delay} der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine angepasst $q_{\text{in_set}} = q_{\text{out_max}}$. Bei einem negativen Flankenwechsel von Stau_3 wechselt die Regelung sofort in den oben dargestellten Zustand.</p> <p>q_{out}: Die Einstellung der Ausbringung erfolgt nach dem Sollwert aus der Visualisierung $q_{\text{out_set}} = q_{\text{out_max}}$</p> <p>v₁: Die Geschwindigkeitsanpassung erfolgt nach Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1).</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: $v_3 = v_{\text{min}}$</p>
<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = true Stau_4 = true Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: Die Sollfüllung des Transporteurs ist überschritten. Bei einem positiven Flankenwechsel des Stauschalters Stau_4 wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine ohne Schaltverzögerung reduziert $q_{\text{in_set}} = 0,85 * q_{\text{out_max}}$. Bei einem negativen Flankenwechsel von Stau_4 wechselt die Regelung nach der Verzögerungszeit t_{delay} in den oben dargestellten Zustand.</p> <p>q_{out}: Die Einstellung der Ausbringung erfolgt nach dem Sollwert aus der Visualisierung $q_{\text{out_set}} = q_{\text{out_max}}$</p> <p>v₁: Die Geschwindigkeitsanpassung erfolgt nach Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1).</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: $v_3 = v_{\text{min}}$</p>

<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = true Stau_4 = true Stau_5 = true Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: Die Sollfüllung des Transporteurs ist überschritten. Bei einem positiven Flankenwechsel des Stauschalters Stau_5 wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine ohne Schaltverzögerung reduziert q_{in_set} = 0,7 * q_{out_max}. Bei einem negativen Flankenwechsel von Stau_5 wechselt die Regelung nach der Verzögerungszeit t_{delay} in den oben dargestellten Zustand.</p> <p>q_{out}: Die Einstellung der Ausbringung erfolgt nach dem Sollwert aus der Visualisierung q_{out_set} = q_{out_max}</p> <p>v₁: Die Geschwindigkeitsanpassung erfolgt nach Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1).</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: $v_3 = v_{\text{min}}$</p>
<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = true Stau_4 = true Stau_5 = true Stau_6 = true</p>	<p>q_{in}: Die maximale Füllung des Transporteurs ist erreicht. Bei einem positiven Flankenwechsel des Stauschalters Stau_6 wird der vorgeschalteten Maschine die Freigabe ohne Ausschaltverzögerung entzogen. Die Maschine regelt bis zum Stillstand herunter. Bei einem negativen Flankenwechsel schaltet die Regelung nach der Zeit t_{delay} in den oben dargestellten Zustand um.</p> <p>q_{out}: Die Einstellung der Ausbringung erfolgt nach dem Sollwert aus der Visualisierung q_{out_set} = q_{out_max}</p> <p>v_{1..3}: Da der gesamte Puffer gefüllt ist, und die vorgeschaltete Maschine nicht laufen kann, werden alle Geschwindigkeiten auf v_{min} reduziert: $v_1 = v_2 = v_3 = v_{\text{min}}$</p>

Anti-Block-Puffer: Schaltzustände und Regelgrößen einer stauschalterbasierten Pufferregelung

Schaltzustände	Anpassung der Regelgrößen
<p>Stau_1 = false Stau_2 = false Stau_3 = false Stau_4 = false Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: Da der Stauschalter Stau_6 nicht belegt ist (false) erhält die vorgeschaltete Maschine eine Freigabe. Die Maschine fährt die in der Visualisierung eingestellte Ausbringung an: q_{in_set} = q_{in_max}</p> <p>q_{out}: Da Stau_1 nicht belegt ist, erhält die nachfolgenden Maschine keine Freigabe: q_{out_set} = 0</p> <p>v_{1..3}: Alle Geschwindigkeiten werden nach der Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1) der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine angepasst.</p>

<p>Stau_1 = true Stau_2 = false Stau_3 = false Stau_4 = false Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: $q_{in_set} = q_{in_max}$</p> <p>q_{out}: Wechselt der Zustand von Stau_1 von „false“ auf „true“ (positive Flanke), erhält die nachgeschaltete Maschine nach der Verzögerungszeit t_{delay} die Freigabe und läuft an. Wechselt der Zustand von Stau_1 von „true“ auf „false“ (negative Flanke) wird der nachgeschalteten Maschine die Freigabe entzogen und diese läuft ohne Verzögerungszeit aus. Die Einstellung der Ausbringung erfolgt nach folgender Formel $q_{out_set} = 0,7 * q_{in_max}$</p> <p>v₁: Der erste Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine nach der Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: Der letzte Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine nach der Formel 3.2 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p>
<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = false Stau_4 = false Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: $q_{in_set} = q_{in_max}$</p> <p>q_{out}: Die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine wird nach der Formel $q_{out_set} = 0,85 * q_{in_max}$ angepasst. Bei einem negativen Flankenwechsel von Stau_2 wechselt die Regelung ohne Verzögerungszeit in den oben dargestellten Zustand. Bei einem positiven Flankenwechsel erfolgt die Anpassung der Ausbringung erst nach der Verzögerungszeit t_{delay}.</p> <p>v₁: Der erste Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine nach der Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: Der letzte Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine nach der Formel 3.2 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p>

<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = true Stau_4 = false Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: $q_{in_set} = q_{out_max}$</p> <p>q_{out}: Die Sollfüllung des Transporteurs ist eingestellt. Die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine wird bei einem positiven Flankenwechsel am Stauschalter Stau_3 oder einem negativen Flankenwechsel an Stau_4 nach der Verzögerungszeit t_{delay} der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine angepasst. $q_{out_set} = q_{in_max}$</p> <p>v₁: Der erste Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine nach der Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: Der letzte Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine nach der Formel 3.2 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p>
<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = true Stau_4 = true Stau_5 = false Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: $q_{in_set} = q_{in_max}$</p> <p>q_{out}: Die Sollfüllung des Transporteurs ist überschritten. Bei einem positiven Flankenwechsel des Stauschalters Stau_4 wird die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine ohne Schaltverzögerung erhöht. Bei einem negativen Flankenwechsel an Stauschalter Stau_5 wird die Ausbringung nach dem Ablauf der Schaltverzögerung t_{delay} reduziert. Die Anpassung der Ausbringung erfolgt nach der Formel $q_{out_set} = 1,15 * q_{in_max}$.</p> <p>v₁: Der erste Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine nach der Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: Der letzte Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine nach der Formel 3.2 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p>

<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = true Stau_4 = true Stau_5 = true Stau_6 = false</p>	<p>q_{in}: $q_{in_set} = q_{in_max}$</p> <p>q_{out}: Die Sollfüllung des Transporteurs ist überschritten. Bei einem positiven Flankenwechsel des Stauschalters Stau_5 wird die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine ohne Schaltverzögerung erhöht. Die Anpassung der Ausbringung erfolgt nach der Formel $q_{out_set} = 1,3 * q_{in_max}$.</p> <p>v₁: Der erste Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine nach der Formel 3.1 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p> <p>v₂: $v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$</p> <p>v₃: Der letzte Transportbandabschnitt wird der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine nach der Formel 3.2 (siehe Kapitel 3.1.1) angepasst.</p>
<p>Stau_1 = true Stau_2 = true Stau_3 = true Stau_4 = true Stau_5 = true Stau_6 = true</p>	<p>q_{in}: Die maximale Füllung des Transporteurs ist erreicht. Bei einem positiven Flankenwechsel wird der vorgeschalteten Maschine die Freigabe ohne Schaltverzögerung entzogen. Die Maschine regelt bis zum Stillstand runter. $q_{in_set} = 0$</p> <p>q_{out}: Die nachgeschaltete Maschine wird mit maximaler Geschwindigkeit betrieben: $q_{out_set} = 1,3 * q_{in_max}$</p> <p>v_{1,3}: Da der gesamte Puffer gefüllt ist, und die vorgeschaltete Maschine nicht laufen kann, werden alle Geschwindigkeiten auf v_{min} reduziert: $v_1 = v_2 = v_3$ nach den Gesetzmäßigkeiten der Formel 3.2 (siehe Kapitel 3.1.1)</p>

3.3 Entwicklung eines Algorithmus zur stufenlosen Pufferregelung

Das Bezugssystem für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und umgesetzten Algorithmus zur stufenlosen Pufferregelung stellt der in Abbildung 21 dargestellte Transporteur dar. Er entspricht im Aufbau dem in Kapitel 3.2 in Abbildung 20 vorgestellten segmentierten Parallelspeicher, der Versuchsstrecke. Allerdings wurde er für die Entwicklung des Algorithmus zur stufenlosen Pufferregelung um $n = 1, \dots, \infty$ mittlere Transportbandabschnitte erweitert. Diese stufenlose Regelung ist nur auf segmentierte Parallelspeicher, allerdings mit einer beliebigen Anzahl von mittleren Transportbandabschnitten anwendbar.

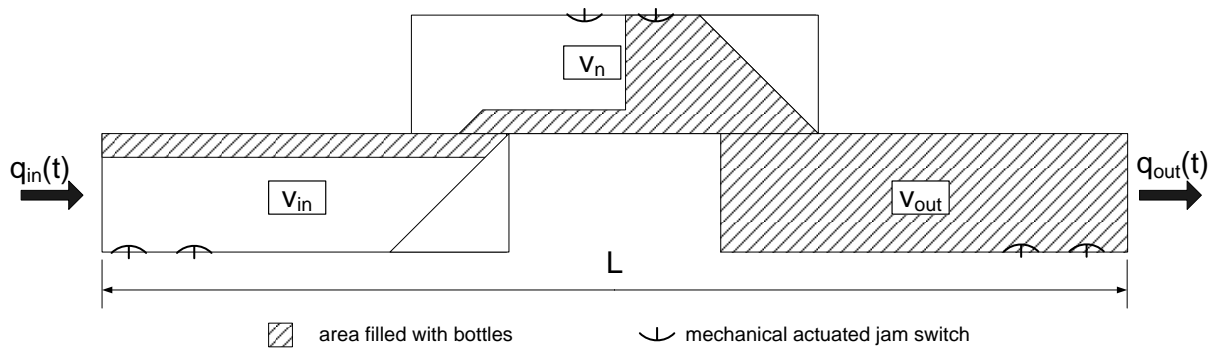


Abbildung 21: Skizze des betrachteten Systems mit jeweils einem Transportbandabschnitt für Ein- und Auslauf und einem mittleren Transportbandabschnitt

3.3.1 Die Betriebszustände der stufenlosen Regelung

Um die in Kapitel 3.1 formulierten Anforderungen an eine lärmarme und effiziente Pufferregelung umsetzen zu können, wurden die folgenden unterschiedlichen Betriebszustände des Maschine-Puffer-Maschine-System unterschieden:

- I **Kontinuierlicher Betrieb:** Der kontinuierliche Betrieb des Transporteurs ist dadurch gekennzeichnet, dass die vor- und nachgeschaltete Maschine störungsfrei arbeiten.
- II **Stillstand der nachgeschalteten Maschine:** Durch den Stillstand der nachgeschalteten Maschine kommt es zu einem Rückstau der Behälter. Als Ursache für den Stillstand kommen zwei Gründe in Frage. Der Stillstand kann durch eine Störung oder einen Rückstau an der nachgeschalteten Maschine verursacht werden. Die Folge ist, dass sich bei arbeitender vorgeschalteter Maschine die Pufferfüllung erhöht, bis die nachgeschaltete Maschine wieder anläuft oder die vorgeschaltete Maschine wegen einer kompletten Füllung des Puffers stehen bleiben muss.
- III **Stillstand der vorgeschalteten Maschine:** Dieser Fall tritt auf, wenn die vorgeschaltete Maschine durch eine Störung oder einen Mangel stehen bleiben muss. Dies führt zu einer Unterschreitung der Sollfüllung, zum anderen entstehen Lücken im Behälterstrom. Die Lücken sollten im Sinne eines kontinuierlichen Laufs der Anlage und aller Aggregate geschlossen werden, bevor sie die nachgeschaltete Maschine erreichen und an dieser Stillstände verursachen.

Jeder Zustand kann dabei prinzipiell in einen der beiden anderen Zustände übergehen (siehe Abbildung 22). Der Übergang von „Stillstand vorgeschaltete Maschine“ in „Stillstand nachgeschaltete Maschine“ und umgekehrt erfolgt allerdings üblicherweise nur durch eine komplette Füllung oder Leerung des Puffers. Eine gleichzeitige Störung der vor- und nachgeschalteten Maschine ist sehr unwahrscheinlich, muss aber dennoch berücksichtigt werden.

Neben diesen drei Betriebszuständen wurde auch zwischen den beiden grundsätzlichen Betriebsarten von Puffern unterschieden. Anti-Block- und Anti-Starve-Puffer unterscheiden sich auf den ersten Blick zwar nur in ihrer Sollfüllung, müssen aber auch in Bezug auf ihre Regelung unterschiedlich betrieben werden (siehe Kapitel 2.1.3.3).

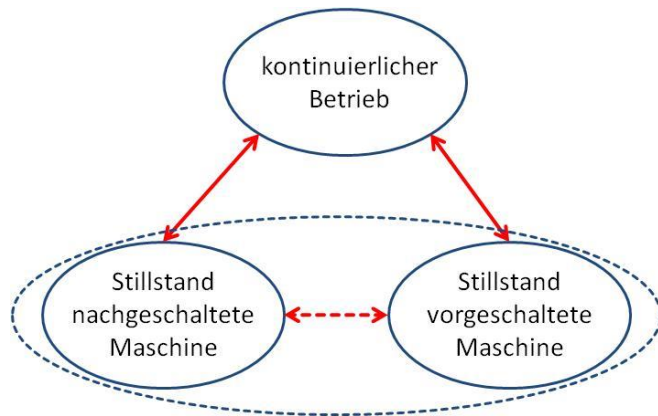


Abbildung 22: Betriebszustände des betrachteten Maschine-Puffer-Maschine-Systems

Daher wird im Folgenden immer zwischen diesen beiden grundsätzlichen Betriebsarten unterschieden (AS Anti-Starve-Puffer / AB Anti-Block-Puffer) und für beide ein zwar ähnlicher, in entscheidenden Punkten aber unterschiedlicher Regelungsalgorithmus entwickelt. Dieser untergliedert sich wiederum nach den drei oben beschriebenen Betriebszuständen (I, II und III).

3.3.2 Aufbau des Hauptprogramms zur stufenlosen Regelung

Das Programm gliedert sich analog der drei beschriebenen Betriebszustände in drei Unterprogramme. Die Entscheidung, welcher dieser drei Fälle vorliegt und damit welches Unterprogramm aufgerufen werden muss, wird durch die Überwachung des Puffereinflaßes ($q_{in}(t)$) und Pufferauslaßes ($q_{out}(t)$) getroffen. Dazu werden diese beiden Werte in jedem Programmzyklus aktualisiert. Für $q_{in}(t) \leq 0$ wird das Unterprogramm für den Lückenschluss ausgeführt (je nach Pufferart für den Anti-Block-Puffer oder für den Anti-Starve-Puffer, siehe Kapitel 3.3.5). Dies geschieht auch beim Vollfahren des Puffers, da in diesem Fall der erste gemessene Wert für $q_{in}(t)$ gleich Null ist. Ist dies nicht der Fall, wird $q_{out}(t)$ abgefragt. Ist dieser Wert gleich Null, wird das Unterprogramm für den Rückstaubetrieb aufgerufen (je nach Pufferart für den Anti-Block-Puffer oder für den Anti-Starve-Puffer, siehe Kapitel 3.3.4). Sind beide Werte größer Null und keines der Unterprogramme aufgerufen, wird das Programm für den kontinuierlichen Betrieb aufgerufen

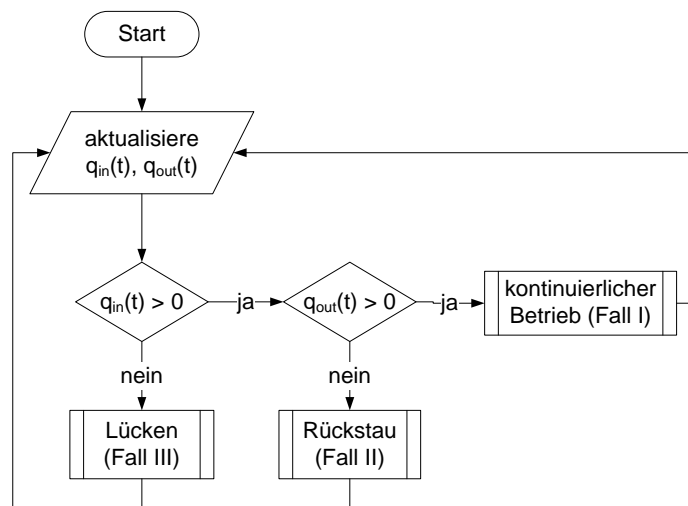


Abbildung 23: Flowchart des Hauptprogramms

Das Programm gliedert sich analog der drei beschriebenen Betriebszustände in drei Unterprogramme. Die Entscheidung, welcher dieser drei Fälle vorliegt und damit welches Unterprogramm aufgerufen werden muss, wird durch die Überwachung des Puffereinflaßes ($q_{in}(t)$) und Pufferauslaßes ($q_{out}(t)$) getroffen. Dazu werden diese beiden Werte in jedem Programmzyklus aktualisiert. Für $q_{in}(t) \leq 0$ wird das Unterprogramm für den Lückenschluss ausgeführt (je nach Pufferart für den Anti-Block-Puffer oder für den Anti-Starve-Puffer, siehe Kapitel 3.3.5). Dies geschieht auch beim Vollfahren des Puffers, da in diesem Fall der erste gemessene Wert für $q_{in}(t)$ gleich Null ist. Ist dies nicht der Fall, wird $q_{out}(t)$ abgefragt. Ist dieser Wert gleich Null, wird das Unterprogramm für den Rückstaubetrieb aufgerufen (je nach Pufferart für den Anti-Block-Puffer oder für den Anti-Starve-Puffer, siehe Kapitel 3.3.4). Sind beide Werte größer Null und keines der Unterprogramme aufgerufen, wird das Programm für den kontinuierlichen Betrieb aufgerufen

(siehe Kapitel 3.3.3). Der Aufbau des Hauptprogramms ist in Abbildung 23 dargestellt und unterscheidet sich für Anti-Starve- und Anti-Block-Puffer nicht.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Unterprogramme jeweils für den Anti-Block-(AB) und den Anti-Starve-Betrieb (AS) dargestellt.

3.3.3 Aufbau des Unterprogramms für den kontinuierlicher Betrieb AS I und AB I

Das Unterprogramm für den kontinuierlichen Betrieb zielt darauf ab, die Pufferfüllung $B(t)$ einer Sollfüllung B_{set} anzugleichen. Die Pufferfüllung ergibt sich nach Formel 3.4 aus einlaufendem (q_{in}) und auslaufendem (q_{out}) Flaschenstrom.

$$B(t) = \int_0^t (q_{\text{in}}(\tau) - q_{\text{out}}(\tau)) d\tau \quad 3.4$$

Hierzu ist eine exakte Zählung der ein- und auslaufenden Flaschen notwendig. Für die Zählung an Ein- und Auslauf kann im einfachsten Fall eine Lichtschranke zum Einsatz kommen. Handelt es sich jedoch um einen mehrsträngigen Ein- oder Auslauf, kommt das in Kapitel 3.4 vorgestellte Sensorsystem zur Erfassung von im Pulk geförderten Behältern zum Einsatz. Auf diese Weise kann zu jedem Zeitpunkt der aktuelle Belegungszustand des Transporteurs in Anzahl an Behältern angegeben werden. Dieser Wert dient als zentrale Führungsgröße für die gesamte Regelung. Dazu wird $B(t)$ zur Sollfüllung ins Verhältnis gesetzt und je nach Puffertyp werden die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen ergriffen.

AS I

Ist bei einem Anti-Starve-Puffer die Sollfüllung überschritten, muss die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine (Slave) gedrosselt werden. Ist die Sollfüllung unterschritten, muss die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine erhöht werden. Die Geschwindigkeit der Transportbänder muss dabei den Maschinenausbringungen angepasst werden. Dabei müssen zum einen die in Kapitel 3.1.1 aufgeführten Bedingungen zum sicheren Betrieb des Transporteurs eingehalten werden, zum anderen muss die Geschwindigkeitsabstufung so gewählt werden, dass sie möglichst gering zwischen den einzelnen Transportbandabschnitten ausfällt. So können hohe Differenzgeschwindigkeiten vermieden und die Lärmemissionen durch kollidierende Flaschen reduziert werden.

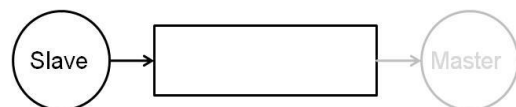


Abbildung 24: Schematische Abbildung des Systems für einen Anti-Starve-Puffer.

Der nicht regelbare Master ist grau dargestellt.

Um $B(t)$ dem Sollwert B_{set} angleichen zu können, wird beim Anti-Starve-Puffer die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine $q_{\text{in_set}}(t)$ im Verhältnis zur nachfolgenden Maschine angepasst. Dies geschieht nach der folgenden Formel:

$$q_{in_set}(t) = q_{out}(t) \cdot \left(\frac{B_{set}}{B(t)}\right)^p \quad 3.5$$

Wird die angestrebte Füllung unterschritten ($\frac{B_{set}}{B(t)} < 1$), wird der Sollwert der Ausbringung für die vorgeschaltete Maschine im Verhältnis zum Ist-Wert der nachgeschalteten Maschine reduziert. Tritt der umgekehrte Fall ein, hat dies zur Folge, dass der Bruch in Formel 3.5 größer eins wird und die vorgeschaltete Maschine im Verhältnis zur nachgeschalteten hochgeregelt wird. Der empirisch ermittelte Faktor p dient zur Anpassung des Regelverhaltens und kann variiert werden. Durch seine Anpassung kann die Geschwindigkeit, mit der B_{set} angefahren wird, angepasst werden. Das oben beschriebene Regelverhalten der vorgeschalteten Maschine in Abhängigkeit von $B(t)$ ist in Abbildung 25 dargestellt.

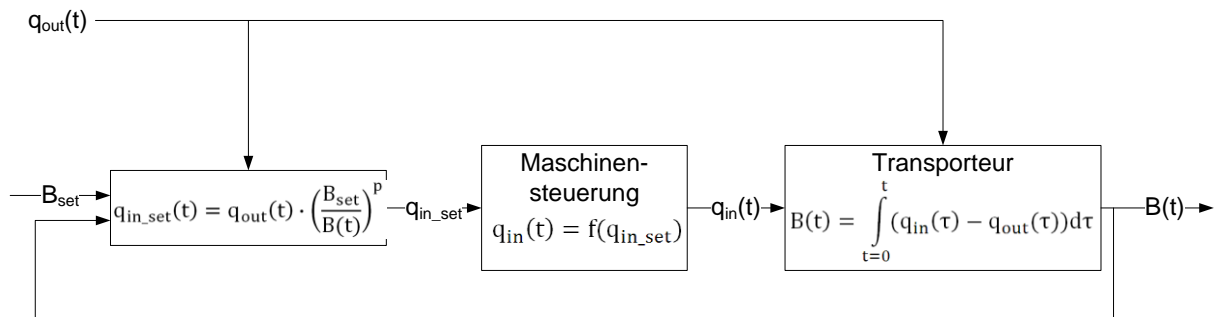


Abbildung 25: Regelkreis für den kontinuierlichen Betrieb des Anti-Starve-Puffers (AS I)

AB I

Der kontinuierliche Betrieb eines Anti-Block-Puffers unterscheidet sich im Vergleich zum Anti-Starve-Puffer in erster Linie in Bezug auf die nachzuregelnde Maschine (vergleiche Abbildung 24 und Abbildung 26). Ist die Sollfüllung eines Anti-Block-Puffers erreicht, wird diese gehalten, indem die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine (Slave) der der vorgeschalteten Maschine (Master) angepasst wird. Ist die Sollfüllung überschritten, muss die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine erhöht werden. Ist die Sollfüllung unterschritten, muss die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine reduziert werden. Die Geschwindigkeit der Transportbänder muss genau wie beim Anit-Starve-Puffer den Maschinenausbringungen angepasst werden.

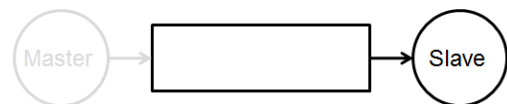


Abbildung 26: Schematische Abbildung des Systems für einen Anti-Block-Puffer.

Der nicht regelbare Master ist grau dargestellt.

$$q_{out_set}(t) = q_{in}(t) \cdot \left(\frac{B(t)}{B_{set}}\right)^p \quad 3.6$$

Auch hier hat die aktuelle Füllung direkten Einfluss auf die Maschinenausbringung. Wird der Quotient $(B(t)/B_{set})$ größer eins, wird die nachgeschaltete Maschine im Verhältnis zur

vorgeschalteten Maschine hochgeregelt. Tritt der umgekehrte Fall ein, wird die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine reduziert.

Die Geschwindigkeiten der Transportbänder werden für AS I und AB I auf die gleiche Weise angepasst. Die Geschwindigkeitsberechnung für das Ein- und Auslaufband ($v_{in}(t)$ und $v_{out}(t)$) erfolgt analog der Formeln 3.1 und 3.2 aus Kapitel 3.1.1. Durch die stufenlose Anpassung der Maschinenausbringungen ergibt sich eine ebenfalls stufenlose Anpassung der Geschwindigkeiten des Ein- und Auslaufbands.

Die Geschwindigkeit der Mittelsektion(-en) sollte so abgestimmt sein, dass die minimal möglichen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Transportbandabschnitten bestehen. So können Behälterzusammenstöße mit hohen Differenzgeschwindigkeiten vermieden werden. Die Abstufung erfolgt daher nach der Formel 3.7:

$$v_{n,set}(t) = v_{in}(t) - n \cdot \left(\frac{v_{in}(t) - v_{out}(t)}{N + 1} \right) \quad 3.7$$

Begonnen wird dabei mit der ersten Mittelsektion, die der Einlaufsektion folgt ($n = 1$). Die Berechnung erfolgt dann für alle Sektionen bis zum vorletzten Transportbandabschnitt $n = N$.

3.3.4 Aufbau des Unterprogramms für den Betrieb bei Rückstau AS II und AB II

Muss die dem Puffer nachgeschaltete Maschine auf Grund eines Rückstaus oder einer Störung stehen bleiben, kommt es auf dem Transporteur zu einem Rückstau. Da $q_{out}(t) \leq 0$ ist, wird das Unterprogramm für den Betrieb bei Rückstau aufgerufen (siehe Abbildung 23). Die entsprechende Situation ist in Abbildung 27 dargestellt.

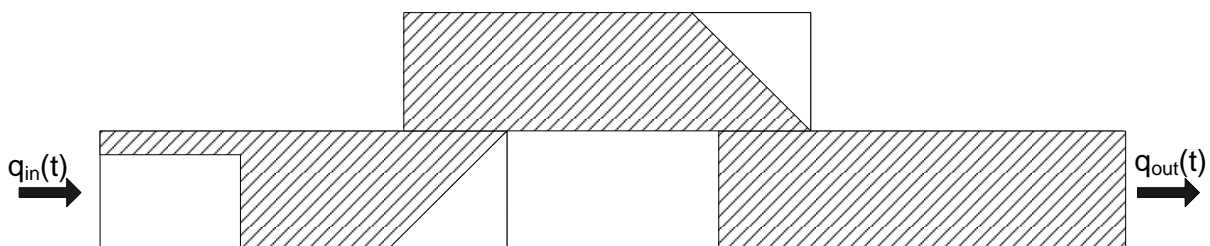


Abbildung 27: Rückstau auf dem Puffer, verursacht durch einen Stillstand der nachgeschalteten Maschine ($q_{out}(t) \leq 0$)

Auf diesen Fall wird die Regelung bei Anti-Starve- und Anti-Block-Puffern unterschiedlich reagieren, daher sollen diese hier getrennt dargestellt werden.

AS II

Bei einem Stillstand der nachgeschalteten Maschine arbeitet die vorgeschaltete Maschine weiter und regelt - der Pufferfüllung entsprechend - langsam bis zum Stillstand herunter. Auch hier wird die Transportbandgeschwindigkeit den Maschinenausbringungen angepasst. Die komplett gefüllten Transportbandabschnitte können außerdem abgeschaltet werden, da die nachgeschaltete Maschine nicht mit Flaschen versorgt werden muss.

Steht die nachgeschaltete Maschine (Slave), kann die dem Puffer vorgeschaltete Maschine (Master) nicht mehr auf Basis der Ausbringung des Masters nachgeregelt werden. Daher wird in diesem Fall auf eine alternative Führungsgröße zurückgegriffen. Dazu wird die Sollausbringung ($q_{in_set}(t)$) des Slaves auf Basis der Ausbringung des Masters vor dem Stillstand ($q_{out}(t_{Stillstand})$) nach der Formel 3.8 nachgeregelt.

Dies führt dazu, dass die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine kontinuierlich reduziert wird. Dies kann aber nur so lange erfolgen, bis eine kritische Füllung des Puffers erreicht ist. Daher wird die aktuelle Füllung ($B(t)$) permanent mit der Kapazität (C) des Puffers abgeglichen. Ist diese erreicht oder überschritten, muss die dem Puffer vorgeschaltete Maschine angehalten werden. Darüber hinaus wird nur bis zu einer minimalen Ausbringung (q_{in_min}) heruntergeregelt, da die meisten Maschinen nicht beliebig langsam betrieben werden können. Diese Minimalausbringung wird dann bis zum Stillstand oder dem erneuten Hochregeln der Maschine gehalten.

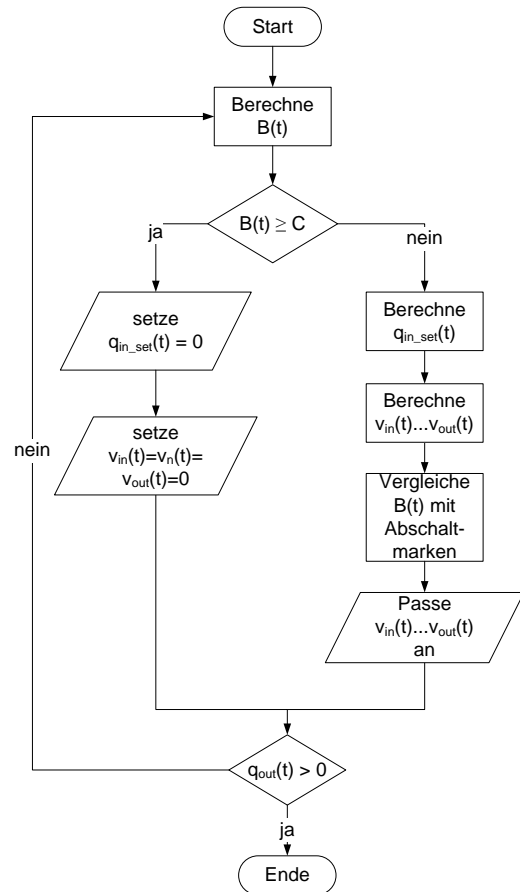


Abbildung 28: Flowchart für den Rückstaumodus im Anti-Starve-Betrieb

$$q_{in_set}(t) = q_{out}(t_{Stillstand}) \cdot \left(\frac{B_{set}}{B(t)}\right)^p, \text{ wenn } q_{in_set}(t) \geq q_{in_min} \quad 3.8$$

$$q_{in_set}(t) = q_{in_min}, \text{ wenn } q_{in_set}(t) < q_{in_min}$$

Die Geschwindigkeiten der Transporteure werden analog dem Fall AS I nach den Formeln 3.1 und 3.7 angepasst. Der einzige Unterschied besteht darin, dass $v_{out_set}(t)$ auf Basis von $q_{out}(t_{Stillstand})$ berechnet werden muss, da $q_{out}(t) = 0$.

$$v_{\text{out_set}}(t) = c_{\text{out}} \cdot q_{\text{out}}(t_{\text{Stillstand}}) \quad 3.9$$

Zusätzlich werden komplett gefüllte Abschnitte des Transporteurs abgeschaltet. Dazu werden feste Werte der Pufferfüllung vorgegeben, ab denen einzelne Abschnitte abgeschaltet werden.

Läuft die nachgeschaltete Maschine wieder an, wird das Unterprogramm AS II beendet, das Programm wechselt in das Hauptprogramm und von dort in den kontinuierlichen Betrieb AS I.

AB II

Bei einem Stillstand der nachgeschalteten Maschine arbeitet die vorgeschaltete Maschine weiter. Auf ein Herunterregeln der Ausbringung, wie unter AS II beschrieben, wird beim Anti-Block-Betrieb verzichtet, weil es aus Effizienzgründen das Ziel sein muss, den Master möglichst lange mit der vorgegebenen Ausbringung zu betreiben. Durch dieses Vorgehen muss unter Umständen eine höhere Lärmemission in Kauf genommen werden, da bei zunehmender Füllung der Transporteurabschnitte weniger Überschübe/Segmente zur Reduzierung der Geschwindigkeiten der Behälter zur Verfügung stehen. Die Transportbandgeschwindigkeiten werden - wie bereits mehrfach beschrieben - den Maschinenausbringungen angepasst. Die hinteren Transportbandabschnitte werden abgeschaltet, sobald sie komplett gefüllt sind. Eine Abschaltung des Masters erfolgt erst, wenn eine kritische Füllung, die der Kapazität des Puffers entspricht, erreicht ist. Die Abschaltung bzw. der Entzug der Freigabe ist das einzige Signal, das das Unterprogramm für den Anti-Block-Betrieb an den Master übermitteln kann.

Die Freigabe wird dem Master entzogen, wenn die Füllung $B(t)$ die Kapazität des Puffers (C) nahezu erreicht hat (siehe Formel 3.10). Zusätzlich berücksichtigt wird, dass der Master nach dem Entzug der Freigabe herunter regelt und die in der Maschine vorhandenen Flaschen noch in dem Puffer eingespeist werden müssen ($f(q_{in})$). Der Platz für diese muss auf dem Puffer noch zur Verfügung stehen.

$$q_{in_set}(t) = 0 \text{ wenn } C \leq B(t) + f(q_{in}) \quad 3.10$$

Die Bändergeschwindigkeit wird für den Einlauf ($v_{in}(t)$) und die mittleren Transporteurabschnitte ($v_n(t)$) analog dem Fall AB I eingestellt (Formeln 3.1 und 3.7). Die Geschwindigkeit für die Auslaufbänder wird der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine vor dem Stillstand ($q_{out}(t_{Stillstand})$) angepasst.

$$v_{out_set}(t) = c_{out} \cdot q_{out}(t_{Stillstand}) \quad 3.11$$

Auch bei der Anti-Block-Regelung werden komplett gefüllte Transporteurabschnitte abgeschaltet und erst wieder zugeschaltet, wenn die nachfolgende Maschine wieder anläuft. In diesem Fall wechselt das Programm zurück in das Unterprogramm AB I.

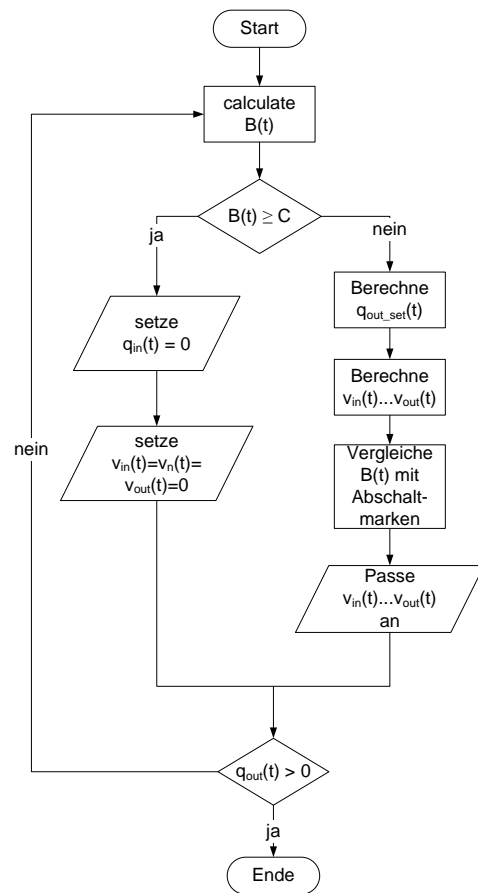


Abbildung 29: Flowchart für den Rückstaumodus im Anti-Block-Betrieb

3.3.5 Aufbau des Unterprogramms für den Betrieb beim Auftreten von Lücken AS III und AB III

Bei Stillständen der vorgeschalteten Maschine kommt es zu Lücken im Behälterpulk und, sofern der letzte Stillstand der nachgeschalteten Maschine länger zurück liegt, zu einer Unterschreitung der Sollfüllung des Puffers. Beides gilt es im Sinne eines gleichmäßigen Betriebs der Maschinen und der gesamten Anlage zu vermeiden. Die Lücken im Behälterpulk sollten daher geschlossen werden, bevor sie die nachgeschaltete Maschine erreichen und somit einen Stillstand verursachen. Die Sollfüllung muss nach der Störung möglichst schnell wieder angefahren werden, um den Transporteur für die nächste Störung in den richtigen Betriebszustand zu versetzen.

Dazu wird die Situation auf dem Transporteur für die Regelung der Anlage möglichst genau abgebildet. In diesem Fall heißt das, dass die Behälterpuls, die sich auf dem Transporteur

befinden, möglichst genau erfasst werden müssen. Sobald die vorgeschaltete Maschine stehen bleibt, wird die Position der letzten Flaschen, die die Maschine verlassen haben, fortlaufend berechnet ($x_{1\text{Band}}(t)$) (siehe Abbildung 30). Dazu muss die Geschwindigkeit des Transportbandabschnitts bekannt sein, auf dem sich der letzte Behälter des ersten Flaschenpulses befindet. Außerdem müssen die Längen der einzelnen Transportbandabschnitte bekannt sein. Auf Basis der aktuellen Position des Behälters wird dann entschieden, welche Geschwindigkeit zur Berechnung herangezogen wird. Genauso wird beim Wiederanlaufen der vorgeschalteten Maschine verfahren. Allerdings wird in diesem Fall die erste Flasche, die die Maschine verlässt, verfolgt. Die berechnete Position entspricht somit der ersten Flasche des zweiten Behälterpulses $x_2(t)$ (siehe Abbildung 30).

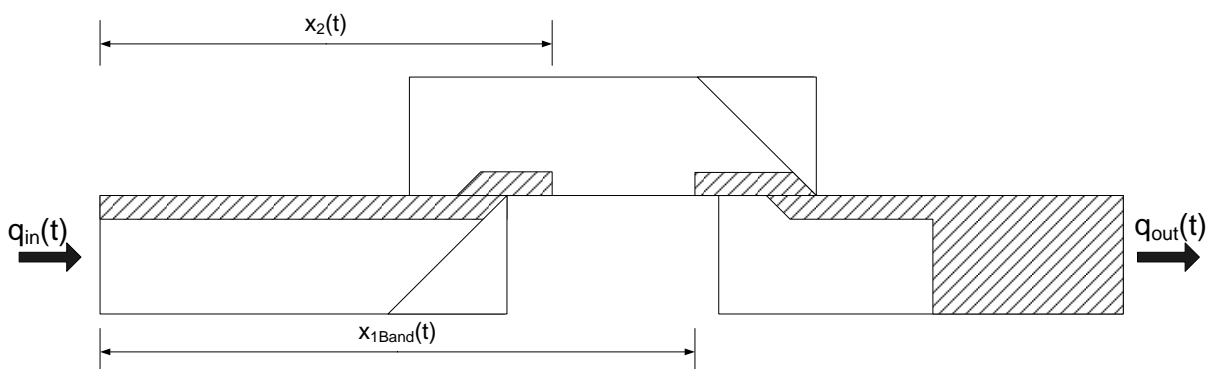


Abbildung 30: Darstellung der Behälterpositionen $x_{1\text{Band}}(t)$ und $x_2(t)$ im freien Transport.

Die Berechnung erfolgt für jeden Abschnitt auf Grund der unterschiedlichen Längen ($l_0, l_1, \dots, l_n, \dots, l_N$) und unterschiedlichen Geschwindigkeiten ($v_{\text{in}}, \dots, v_n, \dots, v_{\text{out}}$) einzeln. Die Positionsberechnung erfolgt durch die Integration der jeweiligen Geschwindigkeit über die Zeit. Als Integrationsgrenzen dienen der Zeitpunkt des Abschnittswechsels (t_0) und die aktuelle Zeit (t). Zur aktuell auf dem jeweiligen Transportbandabschnitt berechneten Position müssen jeweils die Längen der vorhergehenden Abschnitte addiert werden ($\sum_{i=0}^{n-1} l_i$), um die Position in Bezug auf den Puffereinlauf zu berechnen.

$$x(t) = \int_{t_0}^t v_{\text{in}}(\tau) d\tau, \quad \text{wenn } x(t-1) < l_0 \quad 3.12$$

$$x(t) = \sum_{i=0}^{n-1} l_i + \int_{t_0}^t v_n(\tau) d\tau, \quad \text{wenn } x(t-1) \geq \sum_{i=0}^{n-1} l_i \wedge x(t-1) < \sum_{i=0}^n l_i \quad 3.13$$

$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} l_i + \int_{t_0}^t v_{\text{out}}(\tau) d\tau, \quad \text{wenn } x(t-1) \geq \sum_{i=0}^{N-1} l_i \wedge x(t-1) < \sum_{i=0}^N l_i \quad 3.14$$

Die letzte Flasche des ersten Behälterpulks kann in den sich aufstauenden Pulk am Ende des Transporteurs übergehen (siehe Abbildung 31). Ist dies der Fall, muss die Berechnung der Position $x_1(t)$ auf andere Art und Weise erfolgen, da sich die Flasche nicht mehr mit der Geschwindigkeit des Transportbandes bewegt, sondern mit der Abzugsgeschwindigkeit des Pulks. Zur Berechnung der Position muss bekannt sein, wie viele Behälter sich am Ende des Transporteurs befinden, welchen Flächenbedarf die Behälter in der dichtesten Zylinderpackung haben (siehe Kapitel 2.1.3.2), welche Geometrie der Transporteur aufweist (Breite b_n und Länge l_n) und welche Länge der gesamte Transporteur hat ($L = \sum_{i=0}^{i=N} l_i$).

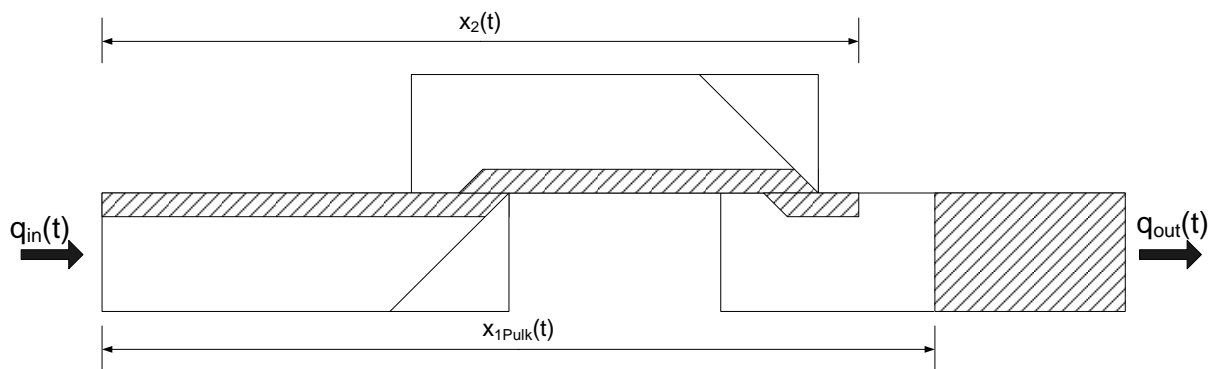


Abbildung 31: Darstellung der Behälterpositionen $x_{1Pulk}(t)$ und $x_2(t)$. $x_{1Pulk}(t)$ stellt die Position der letzten Flasche des ersten Behälterpulks dar, die sich nun mit Abzugsgeschwindigkeit des Pulks bewegt.

Im ersten Integral der beiden Formeln 3.15 und 3.16 werden die Behälter berücksichtigt, die bis zum Zeitpunkt des Stillstands der vorgeschalteten Maschine ($t_{Stillstand}$) auf den Transporteur gelangt sind. Im zweiten Integral werden alle Behälter erfasst, die den Transporteur bis zum Zeitpunkt der Berechnung verlassen haben. Die Differenz der beiden Integrale ergibt die Anzahl an Behältern, die sich am Ende des Transporteurs befindet. Multipliziert man diese Anzahl mit ihrem Platzbedarf ($e \cdot d$), erhält man die mit Flaschen belegte Fläche. Dividiert man die Fläche durch die Breite des Puffers, erhält man eine Länge. Bei dieser handelt es sich um den Abstand des Endes des Flaschenpulks zum Pufferende. Hierbei wurde berücksichtigt, auf welchem Pufferabschnitt (n) sich das Ende des Flaschenpulks befindet, da diese unterschiedliche Breiten (b_n) aufweisen können¹. Zieht man diese ermittelte Länge nun von der Gesamtlänge des Transporteurs (L) ab, erhält man die Position des Endes des Flaschenpulks in Bezug auf den Pufferanfang ($x_{1Pulk}(t)$). Der Unterschied zwischen Formel 3.15 und Formel 3.16 besteht in der Position des Endes des Behälterpulks. Befindet sich der Behälterpulk nicht auf dem letzten Transportbandabschnitt (mit dem Index N), werden die Behälter, die sich auf den hinteren Transportbandabschnitten

¹ In realen Anlagen muss beachtet werden, dass sich die Breite des Puffers, speziell an den Ein- bzw. Ausläufen, über die Länge des Pufferabschnitts ändern kann. Dies muss bei der Berechnung berücksichtigt werden.

befinden, bei der Berechnung berücksichtigt. In Formel 3.16 wird daher die Anzahl an Behältern, die sich auf den hinteren komplett gefüllten Abschnitten befindet, von der Gesamtanzahl an Behältern auf dem Transporteur abgezogen.

$$x_{1\text{Pulk}}(t) = L - \frac{e \cdot d}{b_N} \cdot \left(\int_0^{t_{\text{Stillstand}}} q_{\text{in}}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{\text{out}}(\tau) d\tau \right) \quad 3.15$$

$$\text{für } \left(\int_0^{t_{\text{Stillstand}}} q_{\text{in}}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{\text{out}}(\tau) d\tau \right) - \frac{b_N \cdot l_N}{e \cdot d} \leq 0 \text{ und } t_{\text{Stillstand}} \leq t$$

$$x_{1\text{Pulk}}(t) = L - \frac{e \cdot d}{b_n} \cdot \left(\left(\int_0^{t_{\text{Stillstand}}} q_{\text{in}}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{\text{out}}(\tau) d\tau \right) - \sum_{i=n+1}^N \frac{b_i \cdot l_i}{e \cdot d} \right) \quad 3.16$$

$$\text{für } \left(\int_0^{t_{\text{Stillstand}}} q_{\text{in}}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{\text{out}}(\tau) d\tau \right) - \sum_{i=n}^N \frac{b_i \cdot l_i}{e \cdot d} > 0 \text{ und } t_{\text{Stillstand}} \leq t$$

Nach der Berechnung der Positionen, sowohl für den freien Transport ($x_{1\text{Band}}(t)$) als auch für den Transport im Pulk ($x_{1\text{Pulk}}(t)$), entscheidet der Algorithmus, welche für $x_1(t)$ berechnete Position die richtige ist. Dazu werden die beiden berechneten Positionen miteinander verglichen. Ist $x_{1\text{Band}}(t)$ kleiner $x_{1\text{Pulk}}(t)$, ist $x_{1\text{Band}}(t)$ die richtige Position, da der letzte Behälter des ersten Behälterpulk das theoretisch berechnete aufgestaute Pulkende ($x_{1\text{Pulk}}(t)$) noch nicht erreicht hat. Tritt der umgekehrte Fall ein und $x_{1\text{Pulk}}(t)$ ist kleiner gleich $x_{1\text{Band}}(t)$, ist $x_{1\text{Pulk}}(t)$ die richtige Position, da sich die letzte Flasche des vorderen Behälterpulk ($x_{1\text{Band}}(t)$) nicht hinter dem berechneten aufgestauten Pulkende ($x_{1\text{Pulk}}(t)$) befinden kann.

$$x_1(t) = x_{1\text{Band}}(t), \quad \text{wenn } x_{1\text{Band}}(t) < x_{1\text{Pulk}}(t) \quad 3.17$$

$$x_1(t) = x_{1\text{Pulk}}(t), \quad \text{wenn } x_{1\text{Band}}(t) \geq x_{1\text{Pulk}}(t) \quad 3.18$$

Mit Hilfe der Anfangs- und Endposition jedes Flaschenpulk können die entsprechenden Eingriffe in die Maschinenausbringungen und die Anpassung der Bändergeschwindigkeiten vorgenommen werden, um die durch Stillstände entstandenen Lücken möglichst schnell zu schließen.

Auch in diesem Fall werden der Anti-Starve- und der Anti-Block-Puffer auf Grund unterschiedlicher Anpassungen der Transportbandgeschwindigkeiten und Maschinenausbringungen getrennt voneinander betrachtet.

AS III

Tritt bei einem Anti-Starve-Puffer ein Stillstand der vorgeschalteten Maschine auf, können zunächst die Geschwindigkeiten aller Transportbandabschnitte der Geschwindigkeit der nachgeschalteten Maschine angepasst werden. Die Geschwindigkeit der Transportbänder wird auf das zur Versorgung der nachgeschalteten Maschine notwendige Minimum v_{Band} reduziert (siehe Formel 3.3 Kapitel 3.1.1). Dies ist möglich, weil die Bedingung für v_{in} (Formel 3.1) aus Kapitel 3.1.1 nicht mehr erfüllt werden muss (solange die vorgeschaltete Maschine steht). Dies kann je nach Puffergeometrie insbesondere der Ein- und Ausläufe eine Reduzierung der Geschwindigkeiten auf einzelnen Abschnitten bedeuten, da die Behälter auf dem Transporteur meist in einem breiteren Pulk gefördert werden, als am Ein- oder Auslauf der Transporteure. Ein „Abbremsen“ (siehe Kapitel 3.3.3) der aus der vorgeschalteten Maschine eingespeisten Behälter über mehrere Überschübe, ist auf Grund des Stillstands nicht mehr notwendig. Daher werden die Geschwindigkeiten nach folgender Formel der Geschwindigkeit $v_{\text{out}}(t)$ und damit $q_{\text{out}}(t)$ angepasst:

$$v_{\text{in_set}}(t) = v_{\text{n_set}}(t) = v_{\text{out_set}}(t) = c_{\text{out}} \cdot q_{\text{out}}(t) + \Delta v_{\text{tailback}} \quad 3.19$$

Der zusätzliche Faktor $\Delta v_{\text{tailback}}$ dient zur Erhöhung oder Verringerung der Geschwindigkeit in Bezug auf das Auslaufband. Hiermit werden verschiedene Breiten der Transporteure berücksichtigt, bzw. verschiedener Breiten des Behälterstroms im Normalbetrieb. Zur sicheren Versorgung der nachgeschalteten Maschine mit Behältern ist dabei auf eine Minimalgeschwindigkeit zu achten (siehe Kapitel 3.1.1). Bei starken Unterschieden zwischen den einzelnen Abschnitten kann für jeden Abschnitt ein eigener Faktor eingeführt werden.

Läuft die vorgeschaltete Maschine wieder an, versucht die Regelung die Lücken zuzufahren, bevor sie die nachfolgende Maschine erreichen und einen Stopp dieser verursachen. Dabei muss zwischen verschiedenen Fällen unterschieden werden:

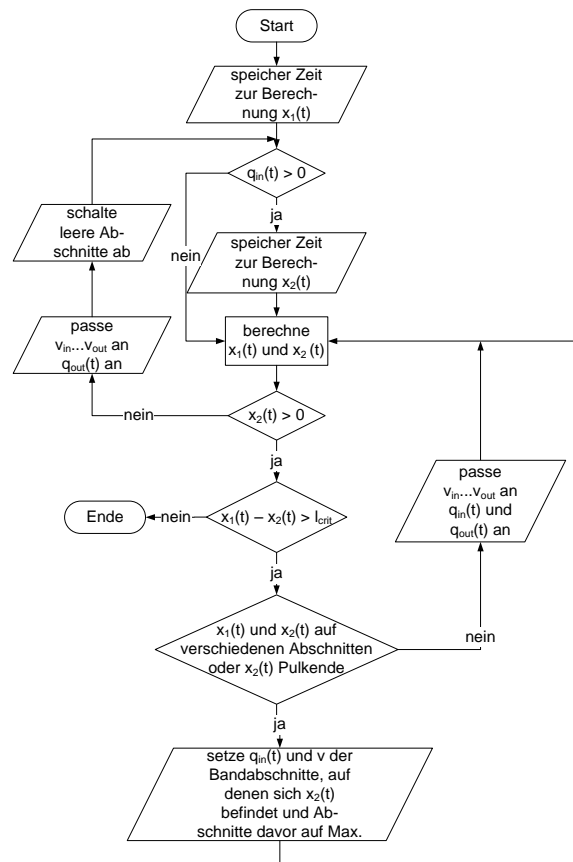


Abbildung 32: Flowchart für den Lückenschlussmodus im Anti-Starve-Betrieb.

- a) Die beiden Behälterpuls mit den Positionen $x_1(t) = x_{1\text{Band}}(t)$ und $x_2(t)$ befinden sich auf dem gleichen Transportbandabschnitt (siehe Abbildung 33). Die Lücke kann nicht zugefahren werden, da sich beide Behälterpuls mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen. Die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine wird, wie in Fall AS I beschrieben, über die Pufferfüllung berechnet und angepasst. Die Geschwindigkeiten der Bänder werden, wie ebenfalls unter AS I beschrieben, berechnet und angepasst.

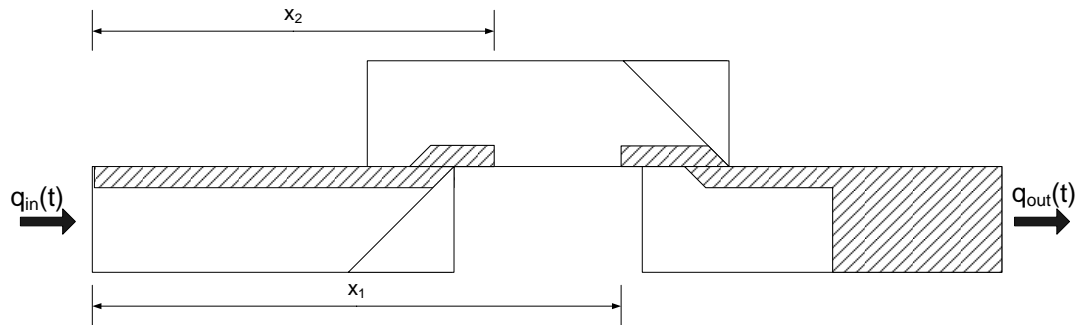


Abbildung 33: Hinterer und vorderer Behälterpuls befinden sich auf dem gleichen Transportbandabschnitt, so dass ein Schließen der Lücke nicht möglich ist.

- b) Die beiden Behälterpuls mit den Positionen $x_1(t) = x_{1\text{Band}}(t)$ und $x_2(t)$ befinden sich auf verschiedenen Transportbandabschnitten (siehe Abbildung 34). Daher wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine auf das Maximum erhöht (Einstellausbringung). Die Geschwindigkeit des ersten Transportbandabschnitts $v_{in}(t)$ wird entsprechend Formel 3.1 an die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine angepasst. Anschließend wird die Position $x_2(t)$ mit den Längen der einzelnen Abschnitte verglichen. Alle Abschnitte, die sich vor der aktuellen Position befinden sowie der Abschnitt auf dem sich $x_2(t)$ befindet, werden in ihrer Geschwindigkeit der Geschwindigkeit $v_{in}(t)$ angeglichen.

$$v_{in_set}(t) = c_{in} * q_{in}(t), \text{ wenn } x_2(t) \leq l_0 \wedge x_{1\text{Band}}(t) > l_0 \quad 3.20$$

$$v_{in_set}(t) = \dots = v_{n_set}(t) = c_{in} * q_{in}(t), \text{ wenn } x_2(t) \leq \sum_{i=0}^n l_i \wedge x_{1\text{Band}}(t) > \sum_{i=0}^n l_i \quad 3.21$$

Die hinteren Abschnitte werden mit der oben beschriebenen Geschwindigkeit weiterbetrieben. Auf diese Weise wird die Länge der Lücke reduziert.

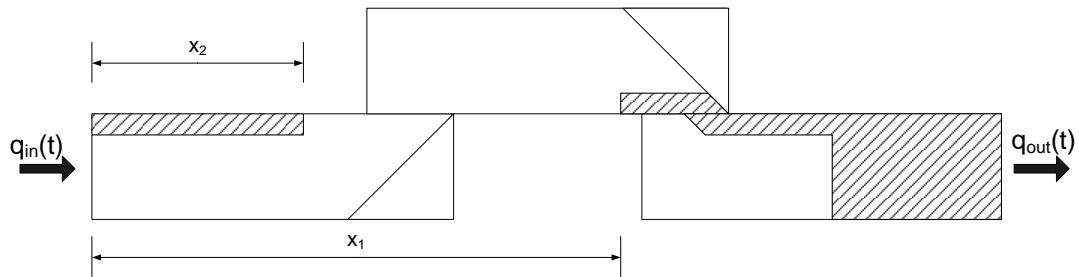


Abbildung 34: Der hintere Behälterpulk befindet sich auf einem anderen Transportbandabschnitt wie der vordere, so dass er durch die Regelung gezielt an den vorderen herangeführt werden kann.

- c) Der hintere Behälterpulk ist komplett in den aufgestauten Pulk am Ende des Transporteurs übergegangen (siehe Abbildung 35). Daher wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine $q_{in}(t)$ auf das Maximum hochgeregelt (Einstellausbringung). Alle Transportbänder, auf denen sich der hintere Behälterpulk mit der Position $x_2(t)$ befindet, werden der Geschwindigkeit des ersten Transportbandabschnittes $v_{in}(t)$ angepasst. Dies gilt auch für den Abschnitt, auf dem sich $x_1(t) = x_{1Pulk}(t)$ befindet, wenn sich $x_2(t)$ ebenfalls auf diesem Abschnitt befindet. Dies hat zwar zur Folge, dass kurzzeitig höhere Staudrücke im ersten Flaschenpulk herrschen, dafür kann $x_2(t)$ aber an $x_1(t)$ herangeführt werden. Mit einer deutlichen Erhöhung der Schallemissionen ist nicht zu rechnen, da sich die Flaschen des ersten Behälterpulses nicht mehr im freien Transport befinden und somit nicht auf den sich langsam bewegenden aufgestauten Pulk auflaufen.

$$v_{in_set}(t) = \dots = v_{n_set}(t) = c_{in} * q_{in}(t), \text{ wenn}$$

$$x_2(t) \leq \sum_{i=0}^n l_i \wedge x_1(t) = x_{1Pulk}(t) \quad 3.22$$

$$v_{in_set}(t) = \dots = v_{n_set}(t) = v_{out_set}(t) = c_{in} * q_{in}(t), \text{ wenn}$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} l_i \geq x_2(t) \leq L \wedge x_1(t) = x_{1Pulk}(t) \quad 3.23$$

Leere Transporteurabschnitte werden abgeschaltet. Die Abschnitte, auf denen sich der erste Pulk ($x_2(t)$) befindet, werden mit der für $v_{out}(t)$ nach der Formel 3.2 oder 3.23 berechneten Geschwindigkeit betrieben.

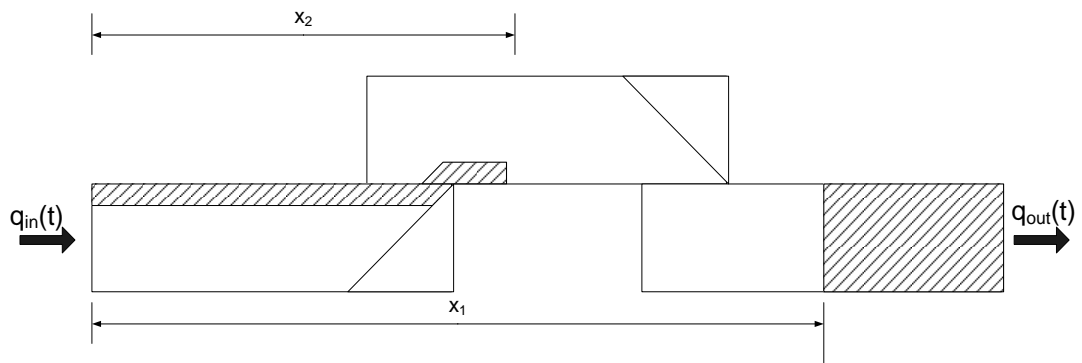


Abbildung 35: Der hintere Behälterpulk staut sich am Ende des Transporteurs auf, so dass der vordere an diesen herangeführt werden kann.

Das Unterprogramm für den Lückenschluss wird so lange ausgeführt, bis die Lückenlänge einen kritischen Wert (l_{crit}) unterschritten hat und die Lücke somit als geschlossen gilt. Im Anschluss wird, soweit keine weiteren Lücken vorliegen, mit dem kontinuierlichen Betrieb fortgefahren und die Lücke somit sanft geschlossen.

$$x_1(t) - x_2(t) < l_{crit} , \text{ wenn } x_1(t) < L \quad 3.24$$

$$L - x_2(t) < l_{crit} , \text{ wenn } x_1(t) \geq L \quad 3.25$$

AB III

Bei Anti-Block-Puffern wird die nachgeschaltete Maschine bei einer Störung der vorgeschalteten Maschine entsprechend der Pufferfüllung heruntergeregelt. Allerdings kann $q_{in}(t)$ nicht zur Berechnung herangezogen werden, da dieser Wert auf Grund des Stillstands Null ist. Daher wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine vor dem Stillstand ($q_{in}(t_{Stillstand})$) verwendet. Analog dem Fall AS II wird auch hier die Maschine nur bis zu einer minimalen Ausbringung von q_{out_min} heruntergeregelt.

$$q_{out_set}(t) = q_{in}(t_{Stillstand}) \cdot \left(\frac{B(t)}{B_{set}} \right)^p , \quad \text{wenn } q_{out_set}(t) \geq q_{out_min} \quad 3.26$$

$$q_{out_set}(t) = q_{out_min} , \quad \text{wenn } q_{out_set}(t) < q_{out_min}$$

Die Geschwindigkeit des Einlaufbandes wird ebenfalls über die letzte Ausbringung der vorgeschalteten Maschine vor der Störung ($q_{in}(t_{Stillstand})$) eingestellt.

$$v_{in_set}(t) = c_{in} \cdot q_{in}(t_{Stillstand}) \quad 3.27$$

Läuft die vorgeschaltete Maschine wieder an, versucht die Regelung auch im Anti-Block-Betrieb die Lücken zuzufahren. Der Unterschied zwischen der Anti-Block- und der Anti-Starve-Regelung ist dabei allerdings, dass bei der Anti-Block-Regelung die vorgeschaltete Maschine (Master) nicht mitgeregelt werden kann. Die Bandbreite der Geschwindigkeitsanpassungen der Transportbänder ist damit begrenzt. Die maximale Geschwindigkeit, die gewählt werden kann, ergibt sich aus Formel 3.3. Diese stellt die maximale Geschwindigkeit dar, bei der keine Lücken in den zweiten Behälterpulk gefahren werden.

Auch in diesem Fall muss, wie unter AS III beschrieben, je nach Position der auf dem Transporteur befindlichen Behälterpuls zwischen den bereits oben erwähnten Fällen unterschieden werden:

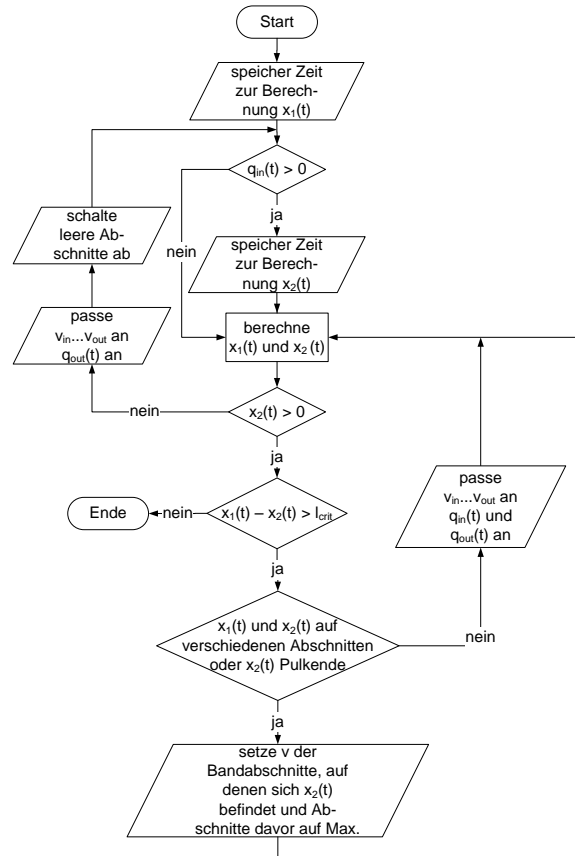


Abbildung 36: Flowchart für den Lückenschlussmodus im Anti-Block-Betrieb.

- a) Die beiden Behälterpuls mit den Positionen $x_1(t) = x_{1\text{Band}}(t)$ und $x_2(t)$ befinden sich auf dem gleichen Transportbandabschnitt (siehe Abbildung 33). Die Lücke kann nicht zugefahren werden, da sich beide mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen. Die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine wird, wie in Formel 3.26 beschrieben, über die Pufferfüllung berechnet und angepasst. Die Geschwindigkeiten der Bänder werden, wie unter AB I beschrieben, berechnet und angepasst.
- b) Die beiden Behälterpuls mit den Positionen $x_1(t) = x_{1\text{Band}}(t)$ und $x_2(t)$ befinden sich auf verschiedenen Transportbandabschnitten (siehe Abbildung 34). Daher wird die Geschwindigkeit des ersten Transportbandabschnitts $v_{in}(t)$ auf die maximal mögliche Geschwindigkeit erhöht. Anschließend wird die Position $x_2(t)$ mit den Längen der einzelnen Abschnitte verglichen. Alle Abschnitte, die kleiner gleich der aktuellen Position sind, werden in ihrer Geschwindigkeit der Geschwindigkeit $v_{in}(t)$ angeglichen.

$$v_{in_set}(t) = v_{max}, \text{ wenn } x_2(t) \leq l_0 \wedge x_{1\text{Band}}(t) > l_0^1 \quad 3.28$$

¹ v_{max} muss hier nach der Formel 3.1 bestimmt werden, um keine Lücken in den Behälterstrom zu fahren.

$$v_{in_set}(t) = \dots = v_{n_set}(t) = v_{max}, \text{ wenn } x_2(t) \leq \sum_{i=0}^n l_i \wedge x_{1Band}(t) > \sum_{i=0}^n l_i \quad 3.29$$

Die hinteren Abschnitte werden mit der auf das nachgeschaltete Aggregat abgestimmten Geschwindigkeit weiterbetrieben. Auf diese Weise kann die Länge der Lücke reduziert werden. Abschnitte, auf denen sich keine Behälter befinden, werden abgeschaltet.

- c) Der vordere Behälterpulk ($x_1(t) = x_{1Pulk}(t)$) ist komplett in den sich aufstauenden Pulk am Ende des Transporteurs übergegangen (siehe Abbildung 35). Alle Transportbänder, auf denen sich der hintere Behälterstrom mit der Position $x_2(t)$ befindet, werden in ihrer Geschwindigkeit der Geschwindigkeit des ersten Transportbandabschnittes $v_{in}(t)$ angepasst.

$$v_{in_set}(t) = \dots = v_{n_set}(t) = v_{max}, \text{ wenn } x_2(t) \leq \sum_{i=0}^n l_i \wedge x_1(t) = x_{1Pulk}(t) \quad 3.30$$

$$v_{in_set}(t) = \dots = v_{n_set}(t) = v_{out}(t) = v_{max}, \text{ wenn} \quad 3.31$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} l_i \geq x_2(t) \leq L \wedge x_1(t) = x_{1Pulk}(t)^1$$

Leere Transporteurabschnitte werden abgeschaltet. Die Abschnitte, auf denen sich der erste Pulk befindet, werden mit der für $v_{out}(t)$ berechneten Geschwindigkeit betrieben, so lange sich der zweite Pulk nicht auf diesen befindet.

Auch im Anti-Block-Modus des Puffers wird das Unterprogramm für den Lückenschluss so lange ausgeführt, bis die in den Formeln 3.24 und 3.25 beschriebene Abbruchbedingung erfüllt ist, die Länge der Lücke also kleiner l_{crit} ist.

3.4 Entwicklung eines Systems zur Behälterzählung im Pulk

Um die in Kapitel 3.3 vorgestellte Regelung umsetzen zu können, müssen die auf dem Transporteur vorherrschenden Zustände (siehe Abbildung 22) sicher erfasst werden können. Dazu ist es notwendig die Behälterströme zu verfolgen und die aktuelle Füllung des Puffers möglichst exakt zu erfassen.

Bisher wurden die in Kapitel 2.1.3.3 beschriebenen Stauschalter zur Erfassung der Füllung der Transporteure eingesetzt. Das Problem beim Einsatz dieser Art der Erfassung ist, dass nur komplett gefüllte Bereiche erkannt werden können, die in Produktflussrichtung hinter dem Stauschalter liegen. Das führt dazu, dass weder die exakte Position der auf dem Transporteur befindlichen Behälterpuls, noch die Position eines sich aufstauenden Behälterpuls bestimmt werden können. Diese Art der Zustandserfassung ist somit für den oben beschriebenen Algorithmus zur stufenlosen Regelung von Behältertransporteuren nicht geeignet. Daher soll

für das neue Regelungskonzept eine andere Möglichkeit der Erfassung gewählt werden, die ohne den Einsatz von Stauschaltern auskommt.

Für eine exakte Erfassung der Pufferfüllung werden die von der vorgeschalteten Maschine zugeführten und die von der nachgeschalteten Maschine abgeführten Behälter erfasst. Die Differenz aus diesen beiden Zählwerten ergibt die aktuelle Füllung des Transporteurs als Anzahl von Behältern. Diese wird zusammen mit der Sollfüllung als Führungsgröße für die stufenlose Regelung verwendet. Zusätzlich können, mit dem Wissen über die Geometrie des Puffers und dem Flächenbedarf der Behälter, sämtliche für den Algorithmus benötigten Positionen der im System befindlichen Behälterpuls berechnet werden (siehe Kapitel 3.3).

Für einsträngige Ein- und Ausläufe, wie sie beispielsweise nach Karussellmaschinen (z. B. Flaschenfüllmaschine, Flaschenausstattungsmaschine) oder Linearmaschinen (z. B. Inspektionsmaschine) vorkommen, können dazu Lichtschranken eingesetzt werden. Diese werden an den Geländerführungen installiert und zählen die einsträngig vorbeigeförderten Behälter.

Bei mehrsträngigen Ein- und Ausläufen ist eine Zählung mit Hilfe einer Lichtschranke nicht möglich. Sie kommen beispielsweise bei Flaschenreinigungsmaschinen, Ein- und Auspackmaschinen und Tunnelpasteurisierungsmaschinen vor. Für eine Zählung von Behältern in diesem Bereich hat Kather [74] eine Möglichkeit vorgestellt, bei der diese mit Hilfe von über dem Transporteur installierten Lichttastern erfasst wurden. Allerdings erwies sich dieses Sensorsystem als nicht praxistauglich, da zum einen nur geschlossene Behälter sicher erfasst werden konnten und zum anderen der Fehler bei der Zählung relativ groß war. Diese Probleme konnten auch nicht durch die bei Kather angesprochenen Veränderungen des Sensorsystems behoben werden. Daher musste ein neues Sensorsystem entwickelt werden.

3.4.1 Anforderungen an ein Sensorsystem zur Behälterzählung im Pulk

Die wichtigste Anforderung an das Sensorsystem ist eine zuverlässige Erfassung von Flaschen, die sich im Pulk bewegen. Dazu müssen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Wie in Kapitel 3.1.3 in den Anforderungen an die Pufferregelung bereits erläutert, können kurzzeitig Durchsätze von bis zu 100.000 Fl./h an Pufferein- und -ausläufen erreicht werden. Daher muss das Sensorsystem in der Lage sein, diese sicher zu erkennen und zu zählen.
- Die Bandgeschwindigkeiten der Transporteure variieren sehr stark. Sie werden auf die entsprechenden Gegebenheiten der Anlage abgestimmt. Als generelle Grenze der Transportgeschwindigkeit bei Glasflaschen sind 1,2 m/s anzusehen, da laut Vogelpohl ab dieser Geschwindigkeit bei einem abrupten Stopp mit Flaschenbruch zu rechnen ist [86]. Bei PET-Flaschen sind die maximalen Bandgeschwindigkeiten niedriger, da sie durch ihren hohen Schwerpunkt zum Kippen neigen [150]. Die Bandgeschwindigkeit und damit die maximale Geschwindigkeit der Flaschen beträgt auf Massentransporteur ca. 0,15 – 0,3 m/s, wobei der normale Arbeitsbereich je nach

eingesetztem Flaschentyp bei ca. 0,18 bis 0,22 m/s liegt. Allerdings können bei sehr schmalen Transporteuren auch höhere Geschwindigkeiten vorkommen. Daher sollte die Abtastrate des Sensors hoch genug sein, um Flaschen bis zu einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s zu erfassen.

- Pufferstecken sind im Bereich der Ein- und Ausläufe selten breiter als ein Meter. Dieser Wert wurde aus verschiedenen Anlagenplänen ermittelt. Eine Messbereichsbreite von einem Meter wäre somit für heutige Anlagen in der Regel ausreichend.
- Der Sensor sollte unter Berücksichtigung aller im praktischen Betrieb auftretenden Transportbedingungen über eine hohe Zählgenauigkeit verfügen.
 - Die Geschwindigkeiten der Transportbänder können zwischen 0,0 und 0,5 m/s variieren. Dabei treten die Geschwindigkeitsänderungen oft sehr abrupt auf.
 - Es kann auf dem Band zu Querverschiebungen kommen, speziell, wenn sich die Flaschen bis unter den Sensor stauen und somit im Pulk verschieben.
 - Vor allem bei einem schnellen Betrieb der Anlage können Vibrationen auftreten. Diese dürfen das Zählergebnis nicht beeinflussen.
- Sowohl die Materialien, als auch die Gestaltung des Sensors sollten sich an den Anforderungen des Hygienic Design orientieren. Darüber hinaus müssen die Materialien so gewählt werden, dass sie von den Reinigungsmitteln, die in Abfüll- und Verpackungsanlagen zum Einsatz kommen, nicht angegriffen werden und vor allem die empfindliche Elektronik schützen.
- Der Sensor muss sich schnell umrüsten lassen, da auf den meisten Abfüll- und Verpackungsanlagen verschiedene Flaschentypen verarbeitet werden, die unterschiedliche Höhen und Durchmesser aufweisen.
- Eine einfache Überwachung durch eine Monitorfunktion ist wünschenswert, um beispielsweise Zählerstände einfach überprüfen zu können oder eine Einstellung des Sensors vorzunehmen.

Auf Basis dieses Anforderungskatalogs wurde ein Sensorsystem entwickelt und auf seine Tauglichkeit hin überprüft.

3.4.2 Verwendete Hardware

Die Glasflaschen, die in den in der Arbeit betrachteten Anlagen zum Einsatz kommen, können mit einer Vielzahl von Sensorsystemen (z. B. induktiven und kapazitiven Sensoren), die sonst im Bereich der Abfüll- und Verpackungstechnik üblichen sind, nur schlecht erfasst werden. Eine sonst übliche Zählung mit Hilfe von Lichtschranken ist auf Grund der Führung der Behälter im Pulk ebenfalls nicht möglich. Daher muss die Erfassung und Zählung der Behälter optisch erfolgen. Hierzu wurde ein kamerabasiertes System zur Zählung entwickelt.

Neben einer geeigneten Kamera werden für das Sensorsystem eine auf die Kamera, die Einsatzumgebung und die Anwendung abgestimmte Beleuchtungsquelle und eine Auswerteeinheit zur Bearbeitung und Auswertung der aufgenommenen Behälter benötigt. Die entsprechenden Komponenten sollen in der Folge kurz vorgestellt werden.

Im Sensorsystem kommt eine monochrome CMOS-Kamera der Firma Photon Focus zum Einsatz. Die Kamera trägt die Typenbezeichnung MV-D1024E-40-U2-12. Sie verfügt über einen Bildsensor mit einer Matrix von 1024 x 1024 Pixeln. Die Wahl fiel auf diese Art von Sensor, da er es erlaubt, die Pixel relativ einfach per Offsetadressierung einzeln auszulesen. Es kann somit ein ROI (Region of Interest) definiert werden und dementsprechend nur dieser ausgelesen werden. Somit kann der Erfassungsbereich auf den benötigten Ausschnitt begrenzt werden. Darüber hinaus hat die Reduktion der auszulesenden Bilddaten den Vorteil, dass die Bildrate der Kamera (Anzahl an Bildern, die pro Zeiteinheit ausgelesen werden kann) deutlich erhöht werden kann. Die Bildrate verhält sich umgekehrt proportional zur Größe des ausgelesenen ROIs. Des Weiteren ist das gewählte Kamerasystem modular aufgebaut, so dass die eingesetzte Auswertehardware direkt auf die Kamerakomponenten - wie den Framegrabber - zugreifen kann, ohne über externe Schnittstellen angeschlossen werden zu müssen. Dies ermöglicht eine schnelle Auslesegeschwindigkeit.

Die Verarbeitung der Daten erfolgt durch das DSAM (datenverarbeitendes Sensor-Aktor-Modul) der Firma werner nophut GmbH. Es ist sowohl für die Bildauswertung als auch für die Kommunikation der intelligenten Kamera verantwortlich und ist direkt mit der eingesetzten Kamera verbunden. Es ist in der Lage, die Bilder synchron zur Bildrate auszuwerten (siehe Kapitel 3.4.3) und somit die Bildverarbeitung in der geforderten Geschwindigkeit zu garantieren. Die Auswertung der Bilder erfolgt dabei mit Hilfe eines FPGAs (Field Programmable Gate Array), auf dem der Auswertalgorithmus umgesetzt ist. Darüber hinaus verfügt das DSAM über diverse Schnittstellen, von denen bei der intelligenten Kamera die USB- und die Ethernetschnittstelle zur Kommunikation mit externen Komponenten eingesetzt werden.

Als dritte Komponente des Systems wird eine geeignete Beleuchtungsquelle benötigt, die erst eine Auswertung der von der Kamera aufgenommenen Bilder möglich macht. Die Beleuchtung muss dabei so gewählt werden, dass die gesamte Einheit aus Kamera Auswertung und Beleuchtung möglichst unempfindlich gegenüber Fremdlicht ist. Das Auftreten von ungewollten Lichtquellen wird sich im Betrieb des Sensors nicht ausschließen lassen, da sich eine Einhausung des gesamten Sensors aus hygienischen Gründen nicht verwirklichen lässt. Hinzu kommt das Problem, dass die Metallketten, die bei den meisten Anlagen zum Einsatz kommen, eine spiegelnde Oberfläche aufweisen, was bei der Aufnahme der Bilder Probleme bereiten kann. Die für die geforderte Anwendung gewählte Kombination aus Kamera und Beleuchtungsquelle soll daher in der Folge erläutert werden.

Es wurden mehrere verschiedene Beleuchtungsquellen getestet, um eine Bildqualität zu erreichen, die eine fehlerfreie Auswertung der aufgenommenen Bilder ermöglicht. Dabei

spielte auch die Möglichkeit die Beleuchtung im Umfeld von Getränkeabfüllanlagen einsetzen zu können eine große Rolle.

Die Wahl fiel auf LEDs als Lichtquelle. Um die gesamte Breite des Transporteurs ausleuchten zu können, sind diese in einer LED-Leiste zusammengefasst, die von der Firma Diana Electronic-System GmbH bezogen wurde (siehe Abbildung 37). Die Leiste verfügte über eine Länge von 1 m. Sie reicht somit aus, um den in den Anforderungen an den Sensor definierten Pufferabschnitt ausleuchten zu können. Sie ist mit einzelnen LEDs bestückt, die jeweils über einen Abstrahlwinkel von 8° verfügen, so dass das Licht sehr stark auf einen Bereich fokussiert werden kann. Dies reduziert zum einen Reflektionen der Kamerabeleuchtung an anderen Bauteilen, wie z. B. den Scharnierbandketten, zum anderen wird das Licht konzentriert im Bildbereich zur Verfügung gestellt. Die Lichtausbeute liegt darüber hinaus bei den eingesetzten LEDs mit 80 Lumen/Watt sehr hoch im Vergleich zu sonst üblichen Beleuchtungsmitteln.

Die LED-Leiste verfügt somit über die Vorteile, dass sie die benötigte Lichtleistung, die zur Auswertung mit der nötigen hohen Bildrate und damit kurzen Belichtungszeit notwendig ist, zur Verfügung stellt. Darüber hinaus ist sie in einem sehr kompakten hygienischen Gehäuse untergebracht. Dabei handelt es sich um eine Plexiglasröhre, die an den Enden mit Edelstahlkappen verschlossen ist. Auf diese Weise ist die Elektronik vor Feuchtigkeit und mechanischen Beschädigungen geschützt.



Abbildung 37: LED-Leiste als Beleuchtungsquelle für den Sensor

Weitere Vorteile der LED-Technik sind der geringe Stromverbrauch, die hohe Lebenserwartung von ca. 50.000 Betriebsstunden [12], die geringe Abwärme, die beim Betrieb auftritt, und die niedrige Spannung, mit der diese betrieben werden kann.

3.4.3 Aufbau des Systems und Verarbeitung der Bilder

Der Aufbau des Systems hat entscheidenden Einfluss auf die Bildqualität und damit auf die Zählgenauigkeit des Sensorsystems. Das System muss so aufgebaut sein, dass die zur Erkennung und Zählung der Flaschen ausgewählte Mündung bestmöglich beleuchtet wird und somit sicher erkannt werden kann. Dazu wurde die Beleuchtungsquelle so zur Kamera angebracht, dass das auf die Mündung der Flasche projizierte Licht direkt spiegelnd in die

Kamera reflektiert werden kann (siehe Abbildung 38). Bereits bei relativ geringen Abweichungen des Winkels von Kamera, Behältermundung und Lichtquelle wird die Bildqualität bedeutend schlechter und eignet sich somit nicht mehr für die automatische Auswertung. Dies liegt an dem oben erwähnten geringen Abstrahlwinkel der eingesetzten LEDs.

Die mit Hilfe dieser Aufstellung aufgenommenen Bilder sind, wie das in Abbildung 39 dargestellte Bild einer Flasche auf einem Kettenförderer, für die anschließende automatische Auswertung geeignet.

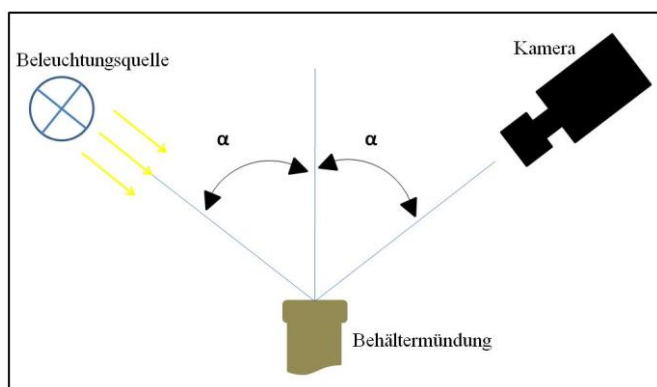


Abbildung 38: Spiegelnde Reflektion des Lichts an der Behältermundung

Abbildung 39: Aufnahme einer Flasche auf dem Kettenförderer

Die begrenzenden Faktoren bei der Verarbeitung der Bilder sind zum einen die oben erwähnte Ausleserate und zum anderen die Bildverarbeitung selbst. Daher war es das Ziel, die auszulesenden und zu verarbeitenden Bilddaten auf ein Minimum zu reduzieren. Dies geschieht auch bei der intelligenten Kamera zur Behälterzählung im Pulk. Zur Erfassung und Zählung der Behälter wird nicht der gesamte Bildbereich von 1024 x 1024 Pixeln benötigt. Es ist ausreichend, die Mündung zu erfassen. Diese ist bei den meisten Flaschensorten genormt. Für die in der Brauerei weit verbreitete Kronenkorkenmündung sind die Abmessungen der Mündung beispielsweise in der DIN 6094 definiert. Daher muss auch nur ein Bereich abgebildet werden, der etwas größer ist, als die Flaschenmündung selbst. Im Fall der NRW-Flasche genügt bei der gewählten Kameraposition ein ROI von 32 Pixeln Länge. Die Breite des ROIs muss an die jeweilige Transporteurbreite angepasst werden. Vom Framegrabber wird dann nur dieser voreingestellte Bereich aus dem Bildchip ausgelesen und anschließend verarbeitet. Durch diese Reduktion der auszulesenden Daten kann die Bildrate von 37 fps im Vollbildmodus auf 500 fps erhöht werden. Dadurch ist sichergestellt, dass jede Flasche, die den Detektionsbereich von 32 Pixeln (ca. 32 mm Breite) mit der in den Anforderungen definierten Geschwindigkeit von 0,5 m/s passiert, viermal komplett erfasst wird ($(32 \text{ mm} - 28 \text{ mm}) / 500 \text{ mm/s} = 0,008 \text{ s} \rightarrow 500 \text{ fps} \cdot 0,008 \text{ s} = 4 \text{ Bilder}$) und somit sicher erkannt werden kann. Zusätzlich hat die Reduktion der Bildrate die Vorteile, dass die Behältermundungen nur über ein sehr kurze Strecke (ca. 32 mm) verfolgt werden müssen und die zu verarbeitenden Bilddaten stark reduziert werden.

Nach der Aufnahme und dem Auslesen erfolgt eine Umwandlung des Graustufenbildes in ein binäres Bild. Dazu wird in Abhängigkeit von der Umgebungshelligkeit und der Blendeneinstellung des Kameraobjektivs ein Schwellenwert eingestellt. Nach der Bearbeitung erscheinen alle Pixel, die einen Helligkeitswert unterhalb des Schwellenwertes aufweisen, als dunkle Bildteile, alle die einen Wert über dem Schwellenwert aufweisen, als weiße Bildteile. Die Verarbeitung erfolgt dabei wie in Abbildung 40 schematisch dargestellt. Ausgewertet werden die unten in der Abbildung dargestellten binären Bilder.

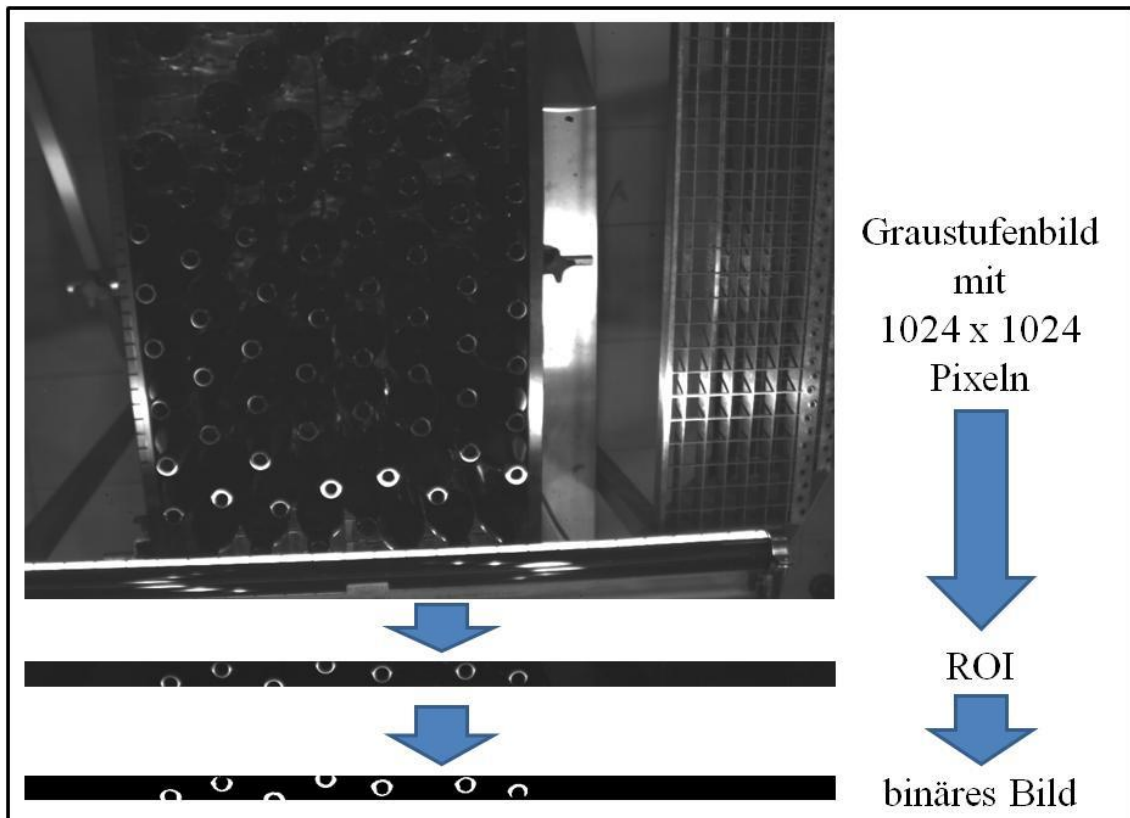


Abbildung 40: Bildverarbeitung durch die intelligente Kamera zur Behälterzählung im Pulk

Hierbei müssen die Flaschenmündungen je nach eingesetztem Auswertalgorithmus entweder als komplett geschlossene Kreise (wie in Abbildung 40 dargestellt) oder aber auch als teilweise geöffnete Kreise dargestellt werden. Die Auswertung kann somit an die zu verarbeitende Flaschenqualität angepasst werden. Der Algorithmus wurde vom Industriepartner in einem gemeinsamen Projekt erarbeitet und wird daher an dieser Stelle nicht dargestellt.

3.4.4 Anbindung des Sensors an eine SPS

Die intelligente Kamera verfügt über mehrere Schnittstellen. Zum einen ist eine USB-Schnittstelle vorhanden. Über diese kann eine Parametrierung der Kamera erfolgen. Es kann ein normaler PC oder Laptop angeschlossen werden. Mit Hilfe eines Programms der

Herstellerfirma kann z. B. der entsprechende ROI gewählt werden und die Belichtungszeit festgelegt werden.

Die wichtigere Schnittstelle stellt allerdings die Ethernet-Schnittstelle dar. Über sie erfolgt die Anbindung an die Feldebene der Anlage. Hier kann der Zählwert beispielsweise von einer SPS entgegengenommen und verarbeitet werden. Die Übertragung erfolgt auf Basis des TCP/IP-Protokolls und stellt damit eine offene Schnittstelle dar, die viele Geräte auf der Feldebene beherrschen. Die Zählraten werden in Form eines 16 Byte Datensatzes übertragen, der neben den Zählerwerten auch weitere Informationen, wie z. B. den Status der Kamera, enthalten kann. Die Abfrage und Interpretation muss dann durch die Steuerung erfolgen.

Prinzipiell lässt sich sagen, dass nur die physikalische Schnittstelle (RJ-45 Steckverbinder) und das Übertragungsprotokoll (TCP/IP) festgelegt wurden. Der Aufbau des zu übertragenden Datenpakets kann frei gestaltet werden. Das Kameraprogramm muss dazu lediglich angepasst werden. Ein Beispiel für die in der Arbeit eingesetzte Datenübertragung findet sich im Kapitel 3.4.6.

3.4.5 Gestaltung eines hygienegerechten Gehäuses

Ein sehr wichtiger Punkt bei der Entwicklung des Sensors stellt die Gestaltung des Gehäuses dar. Es muss nicht nur die empfindliche Elektronik schützen, sondern auch den Anforderungen des Hygienic Design entsprechen. Dieser Punkt gewinnt im Bereich der Lebensmittelindustrie und somit auch bei deren Abfüllung und Verpackung immer mehr an Bedeutung und wird mittlerweile von vielen Anlagenherstellern in



Abbildung 41: Intelligente Kamera zur Behälterzählung im Pulk (Quelle: Dipl.-Ing. werner nophut GmbH)

die Praxis umgesetzt. In Bezug auf die Kamera und die Beleuchtungsquelle erscheint dieser Punkt besonders wichtig vor dem Hintergrund, dass sowohl die Beleuchtung, als auch die Kamera über dem Transporteur angebracht werden müssen und somit je nach Anwendungsfall auch über den offenen gereinigten Behältern (z. B. nach der Flaschenreinigungsmaschine). Eine Kontamination der Behälter in diesem Bereich muss unbedingt vermieden werden.

Die Auswertelektronik und die Kamera wurden in einem Rohr untergebracht, das an beiden Enden verschweißt und somit verschlossen ist. Der hintere Boden kann mit Hilfe von eingeschweißten Gewindestangen und speziell abgedichteten Hutmuttern geöffnet werden,

um Zugriff auf die Elektronik und die Kamera zu ermöglichen. Die Abdichtung zwischen den beiden Gehäuseteilen wird durch eine Polyurethandichtung sichergestellt. Sie wurde speziell angefertigt. Das Objektiv der Kamera ist an einem angeschraubten Rohr mit geringerem Durchmesser untergebracht. Dieses ist nach vorne durch eine Glasscheibe abgeschlossen. Die Dichtungen in diesem Bereich wurden ebenfalls speziell angefertigt. Die Befestigung des Gehäuses an ein Gestell wird über eine angeschweißte Öse ermöglicht.

Eine weitere problematische Stelle des Gehäuses ist die Kabeldurchführung. Hierfür wurde eine spezielle EHEDG zertifizierte Kabeldurchführung der Firma Rittal GmbH & Co.KG gewählt. Sie ist so konstruiert, dass sie das Anhaften und Einwachsen von Mikroorganismen erschwert. Die Kabel selbst werden in einem Polyurethanschlauch zusammengefasst, so dass auch diese hygienisch bis zum nächsten Schaltschrank bzw. bis zum nächsten Verteilerkasten geführt werden können.

3.4.6 Einbindung der intelligenten Kamera zur Behälterzählung im Pulk in eine Pilotanlage

Am Pilotrundläufer (siehe Kapitel 3.5) wurde die Kamera über eine Switch der Firma Siemens (Scalance X-414) an die Profinet Schnittstelle der SPS des Typs Siemens S7-300 CPU 317-2 PN/DP angebunden. Die Kommunikation erfolgte auf Basis des Transmission Control Protocols (TCP), mit Hilfe dessen im Duplex-Betrieb Daten von der Kamera zur Steuerung und von der Steuerung zur Kamera übertragen werden können. Umgesetzt wurde allerdings nur die Simplex-Übertragung von der Kamera zur Steuerung. Dazu baut die Steuerung mit Hilfe des Kommunikationsbausteine FB 65 (TCON) eine Verbindung zur Kamera auf. Im Anschluss sendet die Kamera zyklisch die Zählerwerte an die Steuerung. Diese nimmt die Daten mit Hilfe des FB 64 (TRCV) entgegen und speichert sie in einem Eingangspuffer. Bei den empfangenen Daten handelt es sich um ein 16 Byte großes Datenpaket, das in mehrere Bereiche aufgeteilt ist (siehe Abbildung 42). Ein Byte ist für Steuersignale reserviert, wie beispielsweise den Status der Kamera oder eventuell vorhandene Fehlermeldungen. Fünf Byte sind für die Übertragung des Zählerwerts reserviert und zwei weitere Byte für die Meldung des Überlaufs des Zählers. Die verbleibenden acht Byte sind als Reserve noch unbelegt und für weitere Anwendungen vorgesehen.

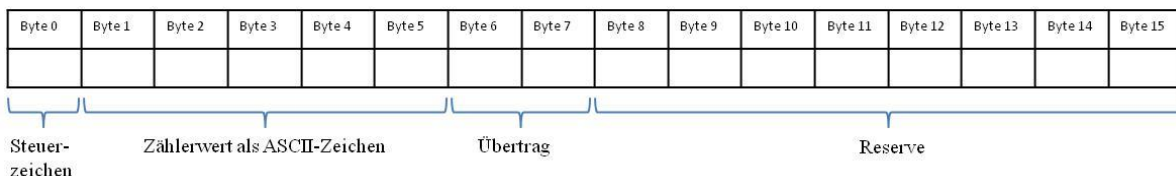


Abbildung 42: Aufbau des von der intelligenten Kamera übertragenen Datenpakets

Die Übertragung des Zählers erfolgt als ASCII-Code. Die ASCII-Zeichen werden in der Steuerung von einem für diesen Zweck programmierten Baustein aus dem Eingangsspeicher gelesen und in einen Integerwert umgewandelt.

Die mechanische Installation der intelligenten Kamera erfolgt mit Hilfe eines Gestells aus Edelstahlrohren oberhalb des Auslaufs von Abschnitt 2 der Versuchsstrecke (siehe Abbildung 43).

Weitere Details und Erläuterungen zum eingesetzten Sensorsystem finden sich darüber hinaus in folgenden Quellen [140], [141], [142], [143], [145] und [147].

3.5 Pilotanlage zur Umsetzung verschiedener Pufferkonzepte

Zur Umsetzung des neuen Regelungskonzeptes und der stauschalterbasierten Regelung stand eine Pilotanlage zur Verfügung, die für die Durchführung der Versuche umgebaut und erweitert wurde. Die Pilotanlage ist als Rundlauf konzipiert (siehe Abbildung 43). Das bedeutet, dass sämtliche Behälter, nachdem sie den Versuchsbereich durchlaufen haben, diesem wieder zugeführt werden können. Dieses Konzept hat den entscheidenden Vorteil, dass relativ wenig Behälter für die Versuche benötigt werden. Zusätzlich können auch Versuche über einen beliebigen Zeitraum durchgeführt werden, da die Behälterzahl durch die erneute Zuführung nicht begrenzt ist. Der Nachteil dieses Konzepts liegt in der Notwendigkeit der Entkopplung von Ein- und Auslauf der Versuchsstrecke. Hierzu ist ein zusätzlicher Puffer notwendig, der alle Flaschen, die auf der Versuchsstrecke Platz haben, aufnehmen kann, so dass dieser nach Bedarf komplett gefüllt oder geleert werden kann. Dieser zusätzliche Puffer benötigt Platz und stellt einen apparativen Aufwand dar.

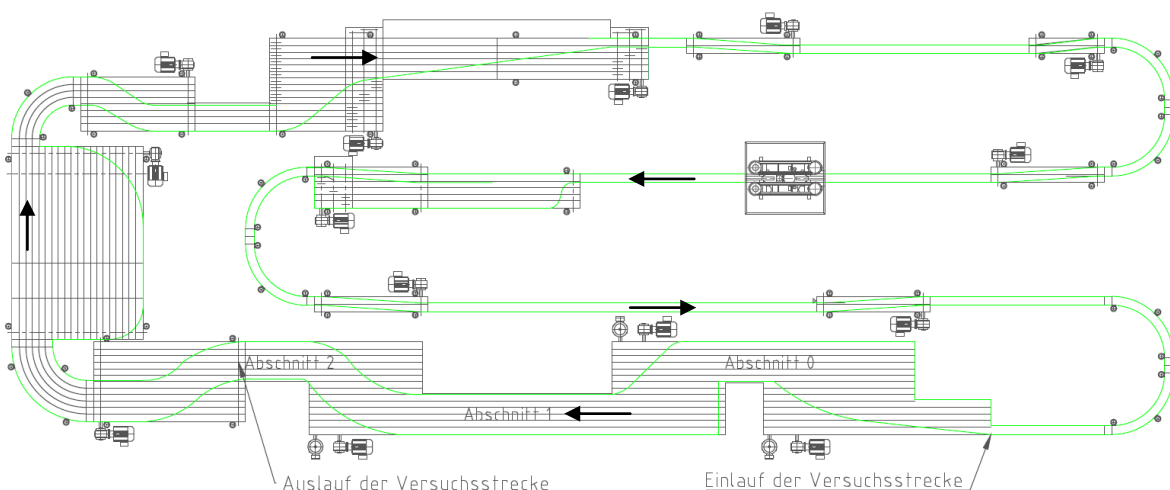


Abbildung 43: CAD-Plan der Pilotanlage

In Abbildung 43 ist der komplette Pilotrundläufer maßstabsgetreu abgebildet. Die Versuchsstrecke befindet sich zwischen dem Ein- und Auslauf. Sie besteht aus den Pufferabschnitten 0, 1 und 2. Der Behältereinlauf der Versuchsstrecke erfolgt einsträngig. Die Transportbandabschnitte 0 und 1 verfügen jeweils über zwei Antriebe, die getrennt

angesteuert werden können. Dadurch kann die linke Hälfte der Antriebsbänder mit einer anderen Geschwindigkeit betrieben werden als die rechte Hälfte. Der Abschnitt 2 verfügt nur über einen Antrieb. Die durch die Versuchsstrecke geförderten Behälter verlassen diese am Ende des Abschnittes 2 mehrsträngig und somit im Pulk. Im Anschluss gelangen sie über einen kurvengängigen Transporteur entweder in die drucklose Behälterzusammenführung DLZ oder bei Rückstau in den Entkopplungspuffer. Dieser dient der Entkopplung von Ein- und Auslauf der Versuchsstrecke. Er kann je nach Bedarf bei Rückstau Behälter aufnehmen und bei Flaschenmangel in der Kurve vor der DLZ Behälter in den Produktionsstrom zurückspeisen. Nach der DLZ gelangen die Behälter in einen einsträngigen Bandabschnitt. In diesem Bereich ist eine Leerflaschen-Inspektionsmaschine (Heuft InLine) der Firma Heuft Systemtechnik GmbH integriert. Nach dem einsträngigen Transportabschnitt gelangen die Behälter wieder auf die Versuchsstrecke.

3.5.1 Die Steuerungsarchitektur der Pilotanlage

Die Bändersteuerung des Pilotrundläufers erfolgt durch zwei getrennte Steuerungen. Der einsträngige Transportbandabschnitt und die DLZ werden durch den Heuft Synchron gesteuert. Hierbei handelt es sich um eine im Kapitel 2.1.3.3 erwähnte Aufholregelung für einsträngige Transportbandabschnitte. Sämtliche Sensorik und Aktorik, die an diesen Bandabschnitten verbaut ist, ist an diese Steuerung angeschlossen.

Die übrigen Bandabschnitte werden von einer SPS der Firma Siemens angesteuert. Dabei handelt es sich um eine S7-300 mit der Typenbezeichnung CPU 317-2 PN/DP, die durch das Interfacemodul IM 151-1 erweitert wurde. Alle in diesem Bereich verbauten Stauschalter und Lichtschranken sind über digitale Eingangsbaugruppen der Steuerung bzw. des Interfacemoduls angeschlossen. Die Frequenzumrichter der Motoren werden über eine Profibus-Verbindung angesteuert.

Sämtliche Eingaben, die vom Bediener getätigt werden müssen, können über mehrere Bedienterminals vorgenommen werden. Alle Eingaben, die vom Heuft Synchron verarbeitet werden sollen, können an den beiden Bedienterminals des Heuft Synchron bzw. des Heuft InLine vorgenommen werden. Alle Eingaben, die die Versuchsstrecke und den übrigen Pilotrundläufer betreffen, werden über eine mit WinCC erstellte Bedienoberfläche vorgenommen. Über diese Bedienoberfläche erfolgt auch die Kommunikation zwischen den beiden Anlagenteilen. Der Heuft InLine bekommt von hier aus den Sollwert für die Ausbringung vorgegeben und die Freigabe für die im Bereich des Heuft Synchron verbauten Frequenzumrichter.

3.5.2 Vergleichbarkeit des Pilotrundläufers mit einer industriell genutzten Anlage

Durch die Möglichkeit, die Versuchsstrecke des Pilotrundläufers mit verschiedenen Füllungen, Bändergeschwindigkeiten und Ausbringungen der vorgeschalteten Maschine zu

betreiben, können Transportstrecken mit einem Behälterdurchsatz von bis zu 36.000 Fl./h nachgestellt werden.

Allerdings sind hierbei einige Einschränkungen zu beachten. So ist der Versuchsstrecke keine Maschine nachgeschaltet, die die Behälter definiert entnimmt. Daher muss der Flaschenablauf alleine durch die Bandgeschwindigkeit des Abschnitts 2 angepasst werden. Dies ist speziell beim Anfahren einer Sollfüllung, bei zuvor komplett leerem Transporteur, schwierig. Die Breite des Flaschenstroms verändert sich in diesem Zeitraum stark. Während die ersten Flaschen einzeln oder in einem schmalen Behälterstrom ankommen, stauen sich diese während des Betriebs auf der kompletten Breite des Transporteurs auf. Daher muss der Transporteurauslauf bis zur Freigabe der nachgeschalteten Maschine durch die Steuerung manuell blockiert werden.

Auch während des Betriebs unterliegt der Auslauf des Transporteurs leichten Schwankungen, die sich allerdings in sehr engen Grenzen bewegen (ca. ± 200 Fl./h). Diese Schwankungen können auch im Praxisbetrieb durch Regeleingriffe an den Maschinen auftreten und sollten durch die Transporteurregelung ausgeglichen werden.

Ein Nachregeln der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine ist nicht möglich, da diese beim Pilotrundläufer nicht vorhanden ist. Daher muss in diesem Fall die Geschwindigkeit des Auslaufbandes verändert werden, um dem Behälterstrom zu erhöhen oder zu erniedrigen. Auf Grund der Führung im Pulk reagiert der Flaschenstrom allerdings nur sehr träge auf diese Änderungen der Bändergeschwindigkeit, da ein Großteil der eingebrachten kinetischen Energie als Reibungsverluste zwischen den Behältern und dem Transportband sowie zwischen Behältern und Geländerführung und zwischen den Behältern selbst verloren geht. Ein exaktes Nachregeln der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine ist somit an der Versuchsstrecke nicht umsetzbar.

Zur Darstellung eines kontinuierlichen Betriebs wird der Bandabschnitt 2 wie der Einlauf einer Maschine betrieben. Das bedeutet, er wird je nach Ausbringung der Maschine eingestellt. Sollen Störungen simuliert werden, wird der Transporteur angehalten, was speziell durch die gewählte Geländerführung am Auslauf zu einem Stopp des gesamten Flaschenpulses führt und somit die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine auf null setzt.

3.6 Simulation von mehrsträngigen Behältertransporteuren

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 dargestellt, gibt es mehrsträngige Behältertransporteure in vielen Variationen, die sich zum Teil erheblich unterscheiden. Das Problem, das sich daraus ergibt, ist die Möglichkeit, die Regelungskonzepte an all diesen Variationen testen zu können. Zu den unterschiedlichen Transportsystemen kommt hinzu, dass auch äußere Parameter, wie die Einstellausbringung der vor- und nachgeschalteten Maschinen und deren Störzeitverhalten, stark variieren. Diese Parameter haben Einfluss auf die Transporteurregelung. Diese Vielzahl an Parametern lässt sich nicht an einer realen Anlage testen. Daher wurde ein

Simulationsmodell aufgebaut, mit dessen Hilfe zusätzlich eine Effizienzanalyse unterschiedlicher Regelungsstrategien über einen langen Versuchszeitraum möglich ist.

3.6.1 Anforderungen an die Simulation

Um eine Simulation aufzubauen, müssen die Systemgrenzen klar definiert werden [155]. Diese müssen den zu regelnden Bereich und alle möglichen Störgrößen der Regelung umfassen. Das bedeutet, dass sowohl der Transporteur, als auch die vor- und nachgeschaltete Maschine in das System miteinbezogen werden müssen. Die Maschinen fungieren dabei als Quellen bzw. Senken, die Material in das System einbringen oder entfernen. Sie müssen darüber hinaus so parametrisiert werden können, dass das in Kapitel 2.1.2 beschriebene Störverhalten dargestellt werden kann.

Das zentrale Element der Simulation stellt der Transporteur selbst dar. Die Simulation muss in der Lage sein, den Behälterfluss innerhalb der Systemgrenzen ausreichend genau darzustellen, um die verschiedenen Regelungskonzepte zu testen. Hierzu muss nicht zwingend jeder Behälter einzeln dargestellt werden. Vielmehr ist es notwendig, die Behälterströme möglichst genau darzustellen. Dazu müssen mindestens der Anfang und das Ende jedes Behälterpulses bekannt sein, sofern es sich innerhalb der Systemgrenzen befindet. Außerdem müssen die Breite des Behälterpulses an jeder Stelle des Systems sowie das Ende eines aufgestauten Behälterpulses, der sich im System befindet, bekannt sein. Der Behälterstrom muss sich dabei realitätsgetreu in Abhängigkeit der Belegung des Transporteurs und der Bändergeschwindigkeit durch das System bewegen.

Um das jeweilige Verhalten des Systems vorgeben zu können, muss die Simulation über Schnittstellen für die Vorgabe der Maschinenausbringungen und der Bändergeschwindigkeiten verfügen. Außerdem muss die Simulation die jeweilige Regelung mit Daten versorgen, wie sie auch in einer realen Anlage zur Verfügung stünden. Dabei handelt es sich z. B. um den Belegungszustand bestimmter Transporteurabschnitte (reale Anlage: Stauschalter) und Zählerwerte vom Ein- und Auslauf (reale Anlage: Lichtschranke oder intelligente Kamera).

Des Weiteren soll es möglich sein, alle Parameter mit möglichst geringem Aufwand umstellen zu können, um beispielsweise die Geometrie der Puffer oder die Einstellausbringungen der Maschinen zu ändern. Außerdem sollen die Komponenten der Simulation so verknüpft werden können, dass auch größere Anlagenabschnitte – bestehend z. B. aus zwei Transporteuren und drei Maschinen – dargestellt werden können.

3.6.2 Aufbau der Simulation

Aus der Forderung, die Simulation mit geringem Aufwand an unterschiedliche Puffer- und Maschinenkonstellationen anpassen zu können, wurde ein modularer Aufbau gewählt. Jede Komponente des Systems wurde daher als eigenes Modul aufgebaut, das über Ein- und Ausgänge verfügt. Bei diesen handelt es sich zum einen um Schnittstellen für den Materialtransport – also den Behälterfluss – und zum anderen um Schnittstellen zum

Austausch von Informationen. Über die Informationsschnittstellen gibt das jeweilige Modul Auskunft über seinen Zustand, also beispielsweise die Füllung des Transporteurabschnitts und zum anderen erhält es Informationen von der Regelung, wie z. B. Sollgeschwindigkeit oder Sollausbringung.

Der Simulationsablauf erfolgt dabei zeitdiskret, um zu jedem Zeitpunkt den eindeutigen Zustand speziell der Transporteure und damit der Behälterströme bestimmen zu können. Dies ist die Voraussetzung, um die beschriebenen Regelungskonzepte unter realitätsnahen, quasi kontinuierlichen Bedingungen testen zu können.

Im Folgenden soll näher auf die Komponenten, aus denen das System zusammengesetzt werden kann, eingegangen werden. Die Nomenklatur der Variablen orientiert sich an [74], [148] und [149], wurde aber für den Anwendungsfall angepasst und erweitert.

3.6.2.1 Transporteurmodul (TM)

Das Transporteurmodul (TM) dient der Abbildung eines einzelnen Transporteurabschnitts. Es kann mit beliebig vielen anderen Transporteurmodulen zu einem kompletten Transporteur (T) verschaltet werden. Charakterisiert ist das Modul durch Transportbänder, die über einen Motor angetrieben werden und sich damit mit der gleichen Geschwindigkeit oder einem festen Geschwindigkeitsverhältnis der Transportbänder zueinander bewegen (Abstufung durch Übersetzung, wie z. B. bei DLZ). Der Transporteur ist dadurch gekennzeichnet, dass er die Behälter von einer Maschine übergeben bekommt und diese auch wieder an eine Maschine übergibt. Er umfasst somit alle Transporteurmodule zwischen zwei Maschinen.

Das Transporteurmodul verfügt über vier Schnittstellen, jeweils eine Quelle und eine Senke für den Materialfluss sowie jeweils eine Schnittstelle für den Datenempfang und die Datenversendung (siehe Abbildung 44). Über die Quelle und die Senke kann das Modul mit

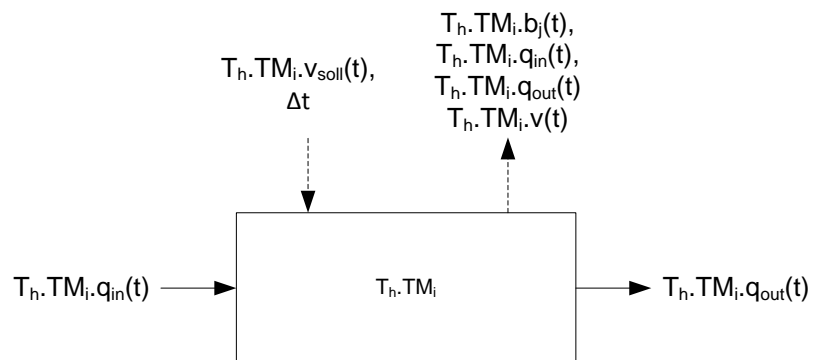


Abbildung 44: Die Schnittstellen des Transporteurmoduls

anderen Transporteurmodulen oder mit einem Maschinenmodul verbunden werden und so Materialströme austauschen. Die beiden Datenschnittstellen dienen in erster Linie der Verbindung mit dem Steuerungsmodul. Über sie werden die für die Berechnung des Materialstroms benötigten Daten empfangen. Dabei handelt es sich um die Schrittweite der Simulation (Δt), also die Zeit, die seit dem letzten Berechnungszeitpunkt vergangen ist sowie die aktuelle Sollvorgabe für die Transporteurgeschwindigkeit des jeweiligen Moduls ($T_h.TM_i.v_{soll}(t)$). Um diese beiden Werte berechnen zu können, wird die jeweilige Regelung

des Steuerungsmoduls mit Informationen versorgt. Dabei stehen verschiedene Daten zur Verfügung. Je nach gewählter Regelung, handelt es sich um den aktuellen Behälterzustrom ($T_h \cdot TM_i \cdot q_{in}(t)$) und die Behälterabgabe ($T_h \cdot TM_i \cdot q_{out}(t)$), die aktuelle Geschwindigkeit ($T_h \cdot TM_i \cdot v(t)$) und die Füllung der Elemente des Transporteurmoduls ($T_h \cdot TM_i \cdot b_j(t)$) (Erläuterung siehe unten), mit dem sich Stauschalterabfragen realisieren lassen. Neben der Versorgung des Steuerungsmoduls mit Daten werden diese Schnittstellen auch als virtuelle Sensoren verwendet. Diese zeichnen während der Versuchsläufe Prozessdaten auf und legen sie für eine spätere Auswertung in einer oder mehreren Dateien ab.

Tabelle 4: Erläuterung der Parameter des Transporteurmoduls (TM)

Variable / Konstante des Transporteurmoduls		Einheit
T	Transporteur: Gesamtheit aller TM zwischen zwei Maschinen	
TM	Transporteurmodul: Abschnitt eines Transporteurs, der über die gleichen Eigenschaften z. B. Geschwindigkeit verfügt, also an einer realen Anlage nur durch einen Antrieb betrieben würde	
„Element“	Jedes TM ist in Elemente der Breite x unterteilt. Es ist kein eigenes Symbol zugeordnet. Die mit dem Index j bezeichneten Parameter beziehen sich auf die Elemente.	
h	Index des Transporteurs, die Nummerierung erfolgt in Materialflussrichtung $h \in \{0, \dots, H\}$	
i	Index des Transporteurmoduls, die Nummerierung erfolgt in Materialflussrichtung, beginnend beim ersten TM des T, $i \in \{0, \dots, I\}$	
j	Index des Elements, die Nummerierung erfolgt in Materialflussrichtung, beginnend beim ersten Element des TM, $j \in \{0, \dots, J\}$	
x	Breite der Elemente	m
$T_h \cdot TM_i \cdot v_{soll}(t)$	Sollgeschwindigkeit des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	$m \cdot s^{-1}$
$T_h \cdot TM_i \cdot v(t)$	Geschwindigkeit des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	$m \cdot s^{-1}$
$T_h \cdot TM_i \cdot q_{in}(t)$	Zufluss von Behältern des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	$Fl. \cdot s^{-1}$
$T_h \cdot TM_i \cdot q_{out}(t)$	Abfluss von Behältern des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	$Fl. \cdot s^{-1}$
$T_h \cdot TM_i \cdot q_{j \text{ in pot}}(t)$	potentieller Zufluss von Behältern des Elements j , des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	$Fl. \cdot s^{-1}$

$T_{h,TM_i} \cdot q_{j \text{ in}}(t)$	Zufluss an Behältern des Elements j, des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	Fl.·s ⁻¹
$T_{h,TM_i} \cdot q_{j \text{ out}}(t)$	Abfluss an Behältern des Elements j, des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	Fl.·s ⁻¹
$T_{h,TM_i} \cdot b_j(t)$	Füllung des Elements j, des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	Fl.
$T_{h,TM_i} \cdot c_j$	Kapazität des Elements j, des Transporteurmoduls i, des Transporteurs h	Fl.

Die relevanten physikalischen Vorgänge, die im System bei einem normalen Betrieb auftreten können, werden vom Transporteurmodul selbst berechnet und umgesetzt. Das Transporteurmodul wird dazu in gleiche Elemente der Breite x zerlegt (die Festlegung der Breite x wird in Kapitel 3.6.3 erläutert). Jedes dieser Elemente verfügt prinzipiell über die gleichen Schnittstellen wie das Transporteurmodul selbst (zur Verdeutlichung des Aufbaus des Transporteurmoduls siehe Abbildung 45). Die aktuelle Füllung ergibt sich damit aus der Differenz von Behältereingang und -abgang jedes Elements, so dass allgemein für das Transporteurmodul, aber auch für jedes Element des Transporteurmoduls, die Formel 3.32 gilt.

$$\frac{db(t)}{dt} = q_{in}(t) - q_{out}(t) \tag{3.32}$$

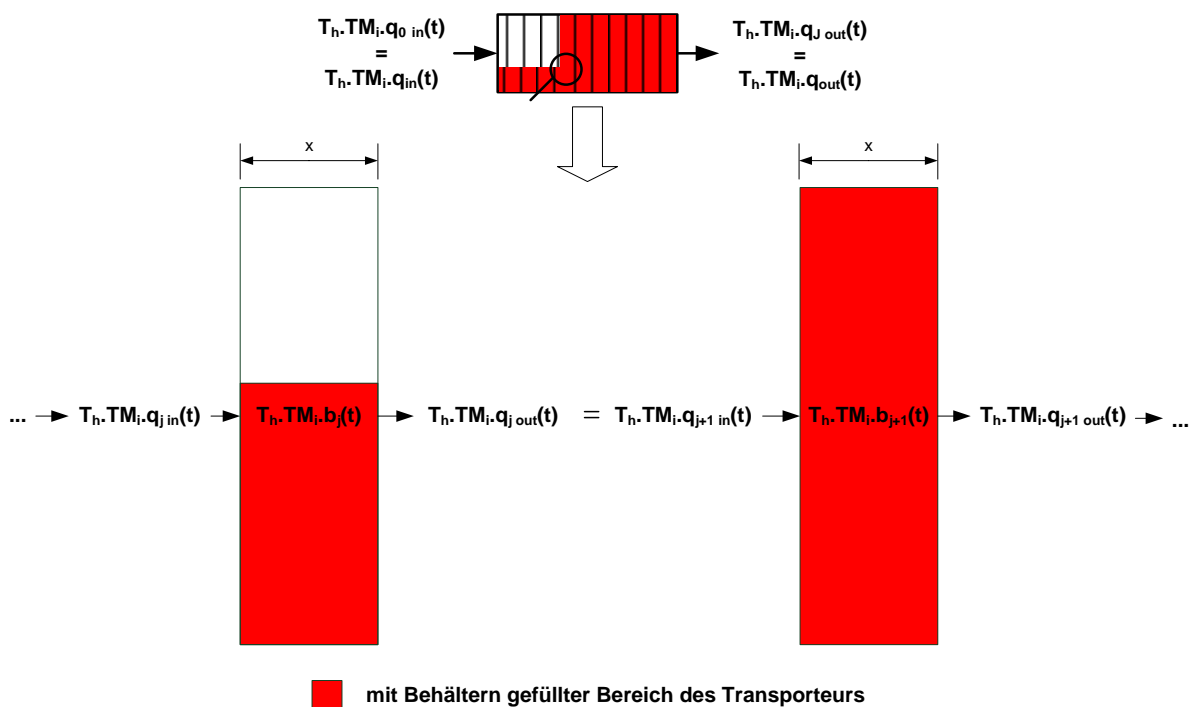


Abbildung 45: Darstellung des Materialflusses im Transporteurmodul durch Zerlegung in Elemente der Breite x.

Der Materialfluss zwischen den einzelnen Elementen kann berechnet werden, wenn die Geschwindigkeit des Transporteurmoduls ($T_h.TM_i.v(t)$) und die Füllung der benachbarten Elemente ($T_h.TM_i.b_{j-1}(t)$ und $T_h.TM_i.b_{j+1}(t)$) bekannt sind. Die Berechnung erfolgt dabei vom Ende des Transporteurs her, beginnend mit dem letzten Modul des letzten Transporteurs mit dem größten Wert des Index h ($h = H$) und i ($i = I$) und dem Element mit dem größten Wert des Index j ($j = J$) und wird dann für alle weiteren Module bis zur ersten Quelle des Systems der Maschine mit dem Index $k = 0$ durchgeführt. Dabei wird jeweils nur der Zustrom von Behältern für jedes Element $T_h.TM_i.q_{j\text{ in}}(t)$ berechnet. Der Abgang an Behältern ergibt sich aus dem Zustrom des nachfolgenden Elements und wird nach den Formeln 3.38, 3.39 und 3.40 festgelegt. Zur Berechnung des Behälterzustroms wird zunächst der potentielle Zustrom an Behältern ($T_h.TM_i.q_{j\text{ in pot}}(t)$) nach den Formeln 3.33 oder 3.34 bestimmt.

$$T_h.TM_i.q_{j\text{ in pot}}(t) = \frac{T_i.v(t) * T_i.b_{j-1}(t)}{x} \text{ wenn } i > 0^1 \quad 3.33$$

$$T_h.TM_i.q_{j\text{ in pot}}(t) = M_k.q_{\text{out}}(t) \text{ für } k = h \text{ wenn } i = 0 \quad 3.34$$

Anschließend muss festgestellt werden, ob der potentiell berechnete Zustrom an Behältern auf Grund der bereits vorherrschenden Füllung ($T_h.TM_i.b_j(t)$) und der Kapazität des Elements ($T_h.TM_i.c_j$) möglich ist. Ist dies der Fall, kann der tatsächliche Zustrom an Behältern ($T_h.TM_i.q_{j\text{ in}}(t)$) dem potentiellen Zustrom gleich gesetzt werden und die Füllung des Elements unter Berücksichtigung der Zeitschrittweite berechnet werden. Nimmt der potentielle Zustrom an Behältern größerer Werte an, als die Kapazität abzüglich der Füllung, darf der Zustrom im jeweiligen Zeitschritt nur der Differenz der beiden Werte entsprechen. Dieser Zusammenhang ist in den Formeln 3.35 und 3.36 dargestellt.

$$T_h.TM_i.q_{j\text{ in}}(t) = T_h.TM_i.q_{j\text{ in pot}}(t) \quad 3.35$$

$$\text{wenn } T_h.TM_i.c_j - T_h.TM_i.b_j(t-1) \geq \int_{t-1}^t T_h.TM_i.q_{j\text{ in pot}}(\tau) d\tau$$

$$T_h.TM_i.q_{j\text{ in}}(t) = \frac{T_h.TM_i.c_j - T_h.TM_i.b_j(t)}{dt} \Rightarrow \quad 3.36$$

$$\text{wenn } T_h.TM_i.c_j - T_h.TM_i.b_j(t-1) < \int_{t-1}^t T_h.TM_i.q_{j\text{ in pot}}(\tau) d\tau$$

Handelt es sich bei dem Element um das erste des Transporteurs ($j = 0$ und $i = 0$), befindet sich davor eine Maschine. Es gilt folgende Bedingung.

$$M_k.q_{\text{out}}(t) \leq \frac{T_h.TM_0.c_0 - T_h.TM_0.b_0(t)}{dt} \text{ für } k = h \quad 3.37$$

¹ Die Formel 3.33 gilt nur, wenn die Breite x nach der Formel 3.51 festgelegt wurde.

Die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine darf nicht größer sein, als die mögliche Aufnahmekapazität des nachfolgenden Elements des Transporteurs (siehe Formel 3.37). In einer realen Anlage würde dies zu schweren Störungen oder sogar zu Beschädigungen führen, da sich die Behälter in die Maschine zurückstauen können. Dieser Fall wird durch die Ablaufsteuerung der Simulation abgefangen (siehe Kapitel 3.6.3).

Die Abgabe von Behältern der einzelnen Elemente kann dem Zustrom des nachfolgenden Elements gleichgesetzt werden, da per Definition keine Behälter verloren gehen. Handelt es sich um das letzte Element des Transporteurmoduls, müssen die Behälter an die nachfolgende Maschine oder das nachfolgende Transporteurmodul übergeben werden.

$$T_{h, TM_i} \cdot q_{j out}(t) = T_{h, TM_i} \cdot q_{j+1 in}(t) \text{ wenn } i < T_{h, I} - 1 \wedge j < T_{h, TM_i} \cdot J - 1 \quad 3.38$$

$$T_{h, TM_i} \cdot q_{j out}(t) = M_k \cdot q_{in}(t) \text{ für } k = h + 1 \text{ wenn } i = T_{h, I} \wedge j = T_{h, TM_i} \cdot J \quad 3.39$$

$$T_{h, TM_i} \cdot q_{j out}(t) = T_{h, TM_{i+1}} \cdot q_{0 in}(t) \text{ wenn } i < T_{h, I} \wedge j = T_{h, TM_i} \cdot J \quad 3.40$$

Die Füllung jedes Elements ergibt sich dann nach der Formel 3.41.

$$T_{h, TM_i} \cdot b_j(t) = \int_{t-1}^t T_{h, TM_i} \cdot q_{j in}(\tau) - T_{h, TM_i} \cdot q_{j out}(\tau) d\tau \quad 3.41$$

Der Aufbau und das Verhalten der Elemente des Transporteurmoduls wird in Abbildung 45 genauer dargestellt. Das Transportmodul und die übrigen Module sind in Abbildung 49 zu einer Anlage verschaltet dargestellt.

3.6.2.2 Maschinenmodul (M)

Das Maschinenmodul (M) dient zur Abbildung des Verhaltens einer realen Maschine, die mit nur einem Materialkreislauf der Anlage verbunden ist. Im Fall des in dieser Arbeit aufgebauten Simulationsmodells handelt es sich bei dem Materialkreislauf um den Behältertransport der Anlage.

Das Maschinenmodul verfügt, genau wie das Transporteurmodul, über vier Schnittstellen, die in Abbildung 46 dargestellt sind. Zwei dieser Schnittstellen dienen der Kommunikation mit der Steuerung, die beiden anderen der Darstellung des Materialstroms. Über die beiden Schnittstellen zur Datenkommunikation kann die Maschine ihre aktuelle Ausbringung melden

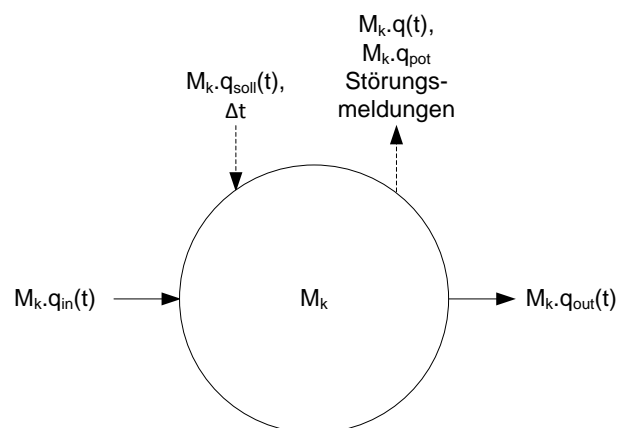


Abbildung 46: Die Schnittstellen des Maschinenmoduls

($M_k \cdot q_{in}(t)$), ihre potentielle Ausbringung/Einstellausbringung ($M_k \cdot q_{pot}(t)$) (Einstellausbringung nach DIN 8782 [29]) und eventuell vorhandene Störungen, die in der Folge noch näher erläutert werden. Empfangen kann das Maschinenmodul die Vorgabe für die Ausbringung ($M_k \cdot q_{soll}(t)$) und die seit dem letzten Simulationsschritt vergangene Zeit (Δt).

Tabelle 5: Erläuterung der Parameter des Maschinenmoduls (M)

Variable / Konstante des Maschinenmoduls		Einheit
M	Maschinenmodul	
k	Index des Maschinenmoduls, die Nummerierung erfolgt in Materialflussrichtung $k \in \{0, \dots, K\}$	
$M_k \cdot q_{in}(t)$	Behälterfluss am Einlauf der Maschine k	Fl. · s ⁻¹
$M_k \cdot q_{out}(t)$	Behälterfluss am Auslauf der Maschine k	Fl. · s ⁻¹
$M_k \cdot q_{soll}(t)$	Sollwert des Behälterflusses der Maschine k	Fl. · s ⁻¹
$M_k \cdot q_{pot}(t)$	Einstellausbringung nach DIN 8782 [29] der Maschine k	Fl. · s ⁻¹
$M_k \cdot t_{TTR}$	gibt die Dauer der nächsten Störung an	s
$M_k \cdot t_{TBF}$	gib die Dauer der nächsten störungsfreien Periode an	s
$M_k \cdot t_d$	Die Totzeit der Maschine gibt die Zeitspanne an, die Behälter vom Einlauf bis zum Auslauf der Maschine benötigen	s

Sämtliche Daten können während der Simulation aufgezeichnet werden und zur späteren Auswertung in einer oder mehreren Dateien abgelegt werden. Über den Materialein- ($M_k \cdot q_{in}(t)$) und ausgang ($M_k \cdot q_{out}(t)$) des Maschinenmoduls kann dieses mit einem weiteren Maschinenmodulen (z. B. zur Darstellung von geblockten Maschinen) oder einem Transporteurmodul verbunden werden und den Materialstrom darstellen. Wird das Maschinenmodul mit Transporteurmodulen verbunden, wie das in der Regel der Fall sein wird, gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

$$M_k \cdot q_{in}(t) = T_h \cdot TM_1 \cdot q_{out}(t) = T_h \cdot TM_1 \cdot q_{J out}(t) \text{ für } h = k - 1 \quad 3.42$$

$$M_k \cdot q_{out}(t) = T_h \cdot TM_0 \cdot q_{in}(t) = T_h \cdot TM_0 \cdot q_{0 in}(t) \text{ für } h = k \quad 3.43$$

Tritt der in Formel 3.37 angesprochene Fall auf, dass die Maschinenausbringung größer wird als die Aufnahmefähigkeit des nachfolgenden Elements, bricht die Simulation ab, da Inkonsistenzen auftreten (siehe Abbildung 48).

Dem Maschinenmodul kommen im Rahmen des Simulationsmodells in erster Linie zwei Aufgaben zu. Zum einen soll es „zufällig“ verteilte Maschinenstörungen simulieren und zum anderen das Totzeit- und das Anfahrverhalten der Maschine darstellen.

Zur Umsetzung eines An- und Abfahrverhaltens wird eine Kurvengleichung hinterlegt, nach der die Maschine ihre Ausbringung steigert oder senkt. In der Regel wird dies eine Geradengleichung sein, es kann aber auch jede beliebige andere Funktion umgesetzt werden. Das bedeutet, dass auch bei der Vorgabe einer höheren Sollausbringung durch die Regelung ($M_k \cdot q_{\text{soll}}(t)$) nur der Wert umgesetzt wird, der nach den Vorgaben für die Maschine möglich ist. Somit muss $M_k \cdot q(t)$ nicht $M_k \cdot q_{\text{soll}}(t)$ entsprechen. Speziell beim Anfahren der Maschine und bei der Reduktion der Ausbringung kann es zu Abweichungen zwischen Soll- und Istwert kommen.

Die meisten Maschinen weisen ein Totzeitverhalten auf, auch wenn dies im Normalfall nicht so ausgeprägt ist wie das der Transporteure (eine Ausnahme stellt lediglich die Flaschenreinigungsmaschine dar). Das bedeutet, dass die Flaschen, die in die Maschine gelangen, erst nach dem Zeitintervall $M_k \cdot t_d$ wieder am Ausgang der Maschine zur Verfügung stehen. Das Totzeitverhalten kann speziell beim Anfahren und beim Stoppen der Maschine eine Rolle spielen, da beim Anfahren eine zeitliche Verzögerung bis zum Austritt der ersten Flasche auftritt und beim Stoppen der Maschine auch nach dem Schließen der Flaschensperre am Einlauf noch Flaschen austreten. Auch dieses Verhalten der Maschinen kann mit Hilfe des Maschinenmoduls umgesetzt werden.

$$M_k \cdot q_{\text{out}}(t) = 0, \text{ wenn } M_k \cdot q_{\text{in}}(t - t_d) = 0 \quad 3.44$$

$$M_k \cdot q_{\text{out}}(t) = M_k \cdot q_{\text{in}}(t), \text{ wenn } M_k \cdot q_{\text{in}}(t - t_d) > 0 \quad 3.45$$

Die wichtigste Aufgabe des Maschinenmoduls ist allerdings die Abbildung des Störverhaltens einer realen Maschine. Dies ist vor dem Hintergrund der Aufgabe der Simulation zu sehen. Diese soll dem Überprüfen der Regelungskonzepte und der Auswirkungen auf die Anlageneffizienz dienen. Der Einsatz eines Puffers und damit auch einer Regelung macht nur bei störanfälligen Maschinen Sinn (siehe Kapitel 2.1.3). Um ein realistisches Störverhalten zu realisieren, ist es notwendig, zwei Kennzahlen in der Simulation umzusetzen. Dies sind die in Kapitel 2.1.2 erwähnte MTTR und die MTBF. Die MTBF gibt dabei an, wie lange die Maschine im Mittel läuft, bevor eine Störung auftritt. Die MTTR gibt an, wie lange diese Störung im Mittel dauert. Bei beiden Werten handelt es sich um maschinenspezifische Größen, die für verschiedene Abfüllanlagen beispielsweise in [152], [153] und [159] bestimmt wurden. Ziel der Simulation muss es sein, zur Laufzeit aus einer statistischen Verteilungsfunktion zufällige Störzeiten zu generieren. Nach Ablauf der Simulation müssen die generierten Störzeiten der gewählten Verteilung entsprechen. Dazu wird ein Zufallszahlengenerator benötigt, der Pseudozufallszahlen generiert. Die Programmierumgebung, in der die Simulation erstellt wurde, nutzt Knuths Generatoralgorithmus für subtraktive Zufallszahlen [78]. Für die Simulation erzeugt dieser

durch eine Erweiterung Zufallszahlen im Intervall null bis eins (p). Diese Zahlen können wiederum in die gewählten Störzeitenverteilung ($F(t)$) eingesetzt werden. Wird diese nach der Zeit (t) (siehe Formel 3.49) aufgelöst, erhält man die Länge der Störzeit $M_{k,t_{TTR}}$, bzw. die Länge der nächsten störungsfreien Periode $M_{k,t_{TBF}}$.

$$t = F(p)^{-1} \quad 3.46$$

Addiert man diesen Wert zur Simulationszeit zum Zeitpunkt der Berechnung (t_0), erhält man den Zeitpunkt der nächsten Störung bzw. den Zeitpunkt, zu dem die Störung endet. Eine neue Berechnung findet statt, sobald $M_{k,t_{TTR}}$ und $M_{k,t_{TBF}}$ verstrichen sind. Auf diese Weise wird ein zufälliges Störzeitverhalten der Maschinen simuliert.

$$M_{k,q_{in}}(t) = 0 \text{ wenn } t > t_0 + M_{k,t_{TBF}} \wedge t < t_0 + M_{k,t_{TBF}} + M_{k,t_{TTR}} \quad 3.47$$

$$M_{k,q_{in}}(t) = f(M_{k,q_{soll}}(t)) \text{ wenn } t < t_0 + M_{k,t_{TBF}} \wedge t > t_0 + M_{k,t_{TBF}} + M_{k,t_{TTR}} \quad 3.48$$

3.6.2.3 Steuerungsmodul

Im Steuerungsmodul wurde der für die Regelung des entsprechenden Modells benötigte Algorithmus umgesetzt. Das Modul entspricht der SPS an einer realen Anlage, auf der ebenfalls das Steuerungsprogramm läuft und die entsprechenden Sensoren angeschlossen sind.

Da sich die Programme, beispielsweise für den Stauschalterbetrieb und die stufenlose Regelung, stark unterscheiden, ist auch der Aufbau des Moduls flexibel gehalten. Das einzige, was alle Steuerungsmodule gemeinsam haben, sind die Schnittstellen zur Anbindung der übrigen Module. Dabei kann bei diesem Modul auf die Schnittstellen zum Materialtransport verzichtet werden, so dass nur die beiden Schnittstellen für den Datenaustausch mit den übrigen Modellkomponenten bleiben. Die von den Modulen zur Verfügung gestellten Daten sind immer komplett vorhanden, werden aber nicht alle für jede Regelungsvariante genutzt. Genutzt werden immer nur jene Daten, die auch in der realen Anlage zur Verfügung stehen. Die Schnittstellen des Steuerungsmoduls sind in Abbildung 47 dargestellt.

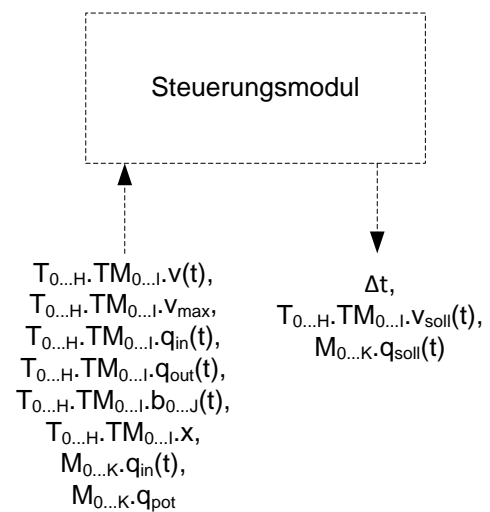


Abbildung 47: Die Schnittstellen des Steuerungsmoduls

3.6.3 Ablaufsteuerung der Simulation

Bei der gewählten Simulation handelt es sich um eine quasi kontinuierliche Ablaufsimulation. Das heißt, dass die einzelnen Simulationsschritte in kurzer Folge zyklisch wiederholt werden,

so dass ein quasi kontinuierlicher Ablauf gewährleistet wird. Hierbei muss die Schrittweite der Zeitschritte Δt so gewählt werden, dass auf der einen Seite der entstehende Fehler möglichst gering ist, auf der anderen Seite aber so wenig Berechnungen wie möglich durchgeführt werden müssen, um die Simulationsgeschwindigkeit nicht unnötig zu reduzieren. Im gewählten Modell bedeutet dies, dass die Übergänge der Behälter zwischen den Modulen bzw. zwischen den Elementen der Transporteurmodule exakt wiedergegeben werden müssen. Dabei müssen die Zeitschritte der Geschwindigkeit der Transporteure und der Breite der Elemente angepasst werden. Wichtig ist, dass Δt so gewählt wird, dass sich der Behälter zwischen den Zeitschritten nicht weiter als die Distanz x bewegen kann. Daher muss Δt der Formel 3.49 entsprechen.

$$\Delta t < \frac{x}{v_{\max}} \text{ mit } v_{\max} = \max(T_0 \cdot TM_0 \cdot v(t), \dots, T_H \cdot TM_I \cdot v(t)) \quad 3.49$$

In der Simulation wurde für die Schrittzeit ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 0,5 eingeführt. Damit ergibt sich die Zeitschrittweite der Simulation Δt in Abhängigkeit des Transportmoduls mit der höchsten Geschwindigkeit zu:

$$\Delta t = \frac{x}{v_{\max}} * 0,5 \text{ mit } v_{\max} = \max(T_0 \cdot TM_0 \cdot v(t), \dots, T_H \cdot TM_I \cdot v(t)) \quad 3.50$$

Ein weiterer Faktor, der festgelegt werden muss, ist die Breite der Elemente der Transporteurmodule x . Er sollte so gewählt werden, dass er dem benötigten Platz der Behälter auf dem Transporteur entspricht. Unter der Annahme, dass sich die Behälter, analog dem in Kapitel 2.1.3.2 beschriebenen Verhalten, in der dichtesten Zylinderpackung anordnen, wurde x nach der Formel 3.51 festgelegt.

$$x = e = \frac{d}{2} \sqrt{3} \quad 3.51$$

Kleinere Werte für x bringen zwar eine höhere Auflösung, erhöhen aber den Rechenaufwand und führen zu keinem Mehrwert, der aus der Simulation gewonnen werden kann. Größere Werte verringern die Genauigkeit der Simulation, da nicht genau festgelegt werden kann, wo sich der Behälter in dem zu groß gewählten Bereich x befindet.

Sind die Schrittweite und die Größe der Elemente festgelegt, können Flaschenströme für das System berechnet werden. Der Ablauf der Simulation ist in Abbildung 48 dargestellt. Zunächst wird die Schrittweite der Simulation bestimmt. Da beim ersten Durchlauf der Simulation noch keiner der Transporteure in Betrieb ist, wird die Schrittweite unter Annahme der maximal möglichen Transporteurgeschwindigkeit berechnet. Anschließend wird überprüft, ob die Simulationszeit bereits abgelaufen ist. Diese Überprüfung ist im ersten Simulationsschritt überflüssig, wird aber für die weiteren Durchläufe wichtig und stellt eine der beiden Abbruchbedingungen des Programms dar. Ist die Simulationszeit abgelaufen wird das Programm beendet. Ist sie noch nicht abgelaufen, werden die Betriebsdaten, die das

Steuerungsmodul benötigt, erfasst und für die anschließenden Regelungseingriffe abgespeichert. Die Daten werden, wie dies auch bei einer SPS der Fall ist, nur einmal pro Programmzyklus aktualisiert. Anschließend wird das Steuerungsmodul aufgerufen. In diesem läuft das gesamte Maschinenprogramm der simulierten Anlage ab, das alle Regelungsbefehle umsetzt. Je nach gewähltem Regelungsalgorithmus werden die entsprechenden Werte für die Geschwindigkeit der Transporteure und die Ausbringung der Maschinen vorgenommen und in Form der Betriebsdaten an das physikalische Modell der Anlage weitergegeben. Dieses besteht aus den oben beschriebenen Modulen (TM und M) und setzt sämtliche physikalischen Vorgänge des Systems um. Ist der gesamte Materialfluss auf diese Weise berechnet, prüft die Simulation, ob Fehler bei der Berechnung des Behälterflusses aufgetreten sind. Kam es zu Fehlern, wird der Simulationslauf abgebrochen. Verlieft der Simulationslauf fehlerfrei, beginnt der Programmzyklus von vorne mit der Festlegung der Zeitschrittweite.

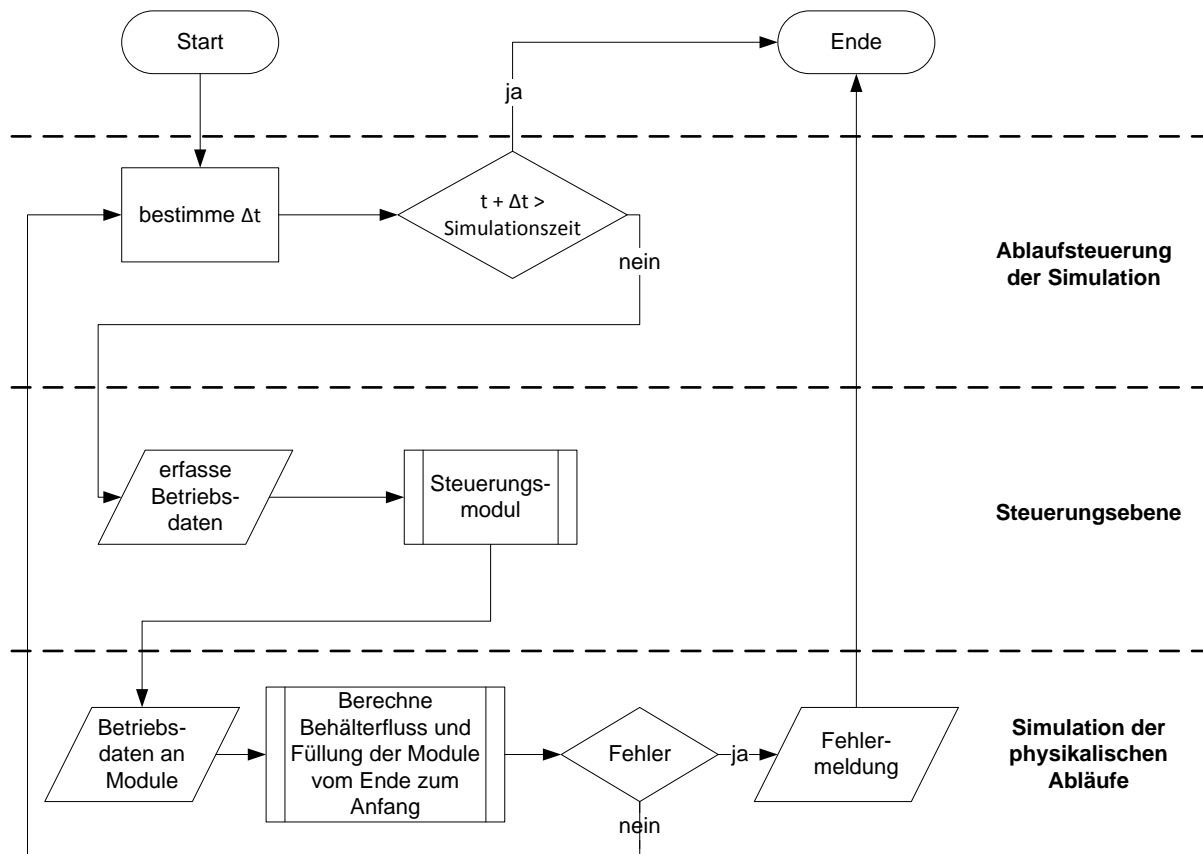


Abbildung 48: Flussdiagramm zur Darstellung des Programmablaufs der Simulation

3.6.4 Aufbau einer virtuellen Versuchsanlage

Mit den in Kapitel 3.6.2 beschriebenen Modulen und dem in Kapitel 3.6.3 beschriebenen Ablaufverhalten kann eine virtuelle Anlage mit linear verketteten Maschinen aufgebaut werden, wie sie, mit Ausnahme der Einpack- und Auspackmaschine, im Flaschenkreislauf einer Mehrwegflaschen-Abfüllanlage vorkommen. Zu beachten ist, dass jedes Anlagenmodell als erstes und letztes Element ein Maschinenmodul aufweisen muss. Der Einlauf des ersten

Maschinenmoduls wird als Quelle mit unbegrenzter Kapazität ohne Störungen des Materialflusses parametrisiert. Der Ausgang des letzten Maschinenmoduls wird dementsprechend als Senke mit unbegrenzter Kapazität definiert. Auf diese Weise werden keine Störungen von außen, sondern nur Eigenstörungen des Systems berücksichtigt. Diesem Aufbau folgen alle in dieser Arbeit beschriebenen Modelle.

Um Regelungskonzepte für den Anti-Starve- sowie den Anti-Block-Betrieb von Puffern testen zu können, wurde ein Modell bestehend aus drei Maschinen und zwei zwischengeschalteten Transportstrecken aufgebaut (siehe Abbildung 49). Die Pufferregelung ist auf das in der Mitte befindliche Zentralaggregat (M_1) ausgerichtet. Vor diesem befindet sich die vorgeschaltete Maschine M_0 und der Transporteur T_0 , der aus drei Transporteurmodulen aufgebaut ist. In Materialflussrichtung hinter dem Zentralaggregat befindet sich ein ebenfalls aus drei Transporteurmodulen bestehender Transporteur T_1 und eine nachgeschaltete Maschine M_2 . Der Aufbau der Transporteure entspricht dem Aufbau am Pilotrundläufer (siehe Abbildung 20) und wurde so gewählt, um die simulierte Anlage mit Hilfe des Pilotrundläufers validieren zu können. Prinzipiell ist aber auch jede andere lineare Anlagenkonstellation umsetzbar. Auch Erweiterungen des in C++ umgesetzten Simulationsmodells sind problemlos möglich.

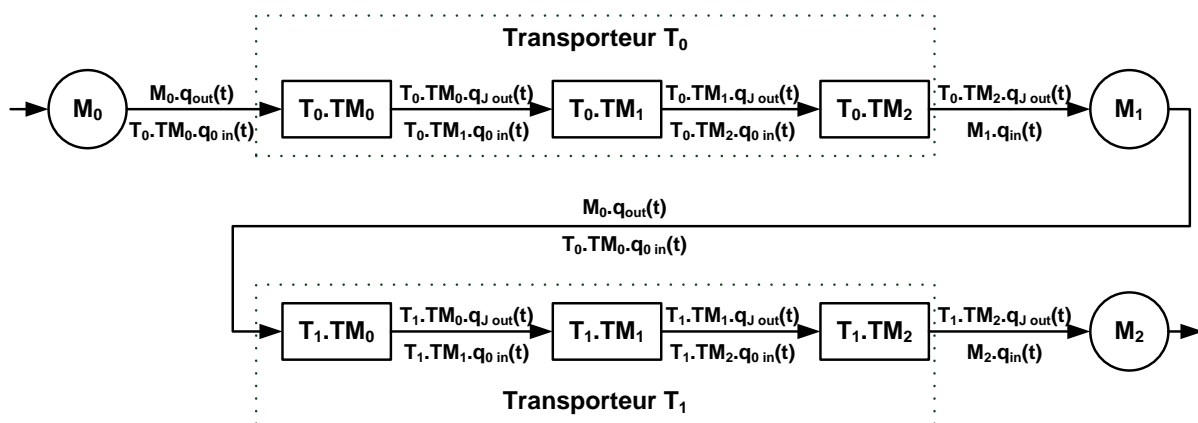


Abbildung 49: Aufbau des Simulationsmodells bestehend aus drei Maschinen und zwei Transporteuren mit je drei Transporteurmodulen

Im Steuerungsmodul wurden sowohl die stufenlose Pufferregelung als auch zwei Variationen der stauschalterbasierten Regelung umgesetzt. Zum einen handelt es sich bei den stauschalterbasierten Regelungen um die in Kapitel 3.2 dargestellte Regelung, die mit Hilfe von sechs Stauschaltern fünf unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile fahren kann. Neben dieser Regelung wurde eine rudimentärere stauschalterbasierte Regelung umgesetzt. Diese verfügt nur über vier Stauschalter und dementsprechend drei Geschwindigkeitsstufen, die angefahren werden können. Der Aufbau entspricht der in Kapitel 3.2 dargestellten Regelung. Es wurde lediglich auf die Stauschalter Stau_2 und Stau_5 verzichtet. Die beiden durch diese Schalter realisierten Fälle werden durch die Stauschalter Stau_3 und Stau_4 aufgerufen. Auf die vorher durch diese beiden Stauschalter aufgerufenen Fälle wird verzichtet. Die

Zwischenstufen bei den Einstellungen der Geschwindigkeit und der Ausbringung des Slaves entfallen somit.

Zur Validierung des Modells wurde die stufenlose Regelung herangezogen, da sie exakter auf die jeweiligen Pufferzustände reagiert und so geringere Schwankungen bzw. Abweichungen zu erwarten sind. Dies erleichtert den Vergleich zwischen Simulationsmodell und Pilotanlage, da die verbleibenden Abweichungen auf das Simulationsmodell zurückzuführen sind. Verifiziert wurden sowohl die stauschalterbasierte Regelung, als auch die stufenlose Regelung.

4 Ergebnisse der experimentellen Validierung und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Verifizierung (Plausibilitätsprüfung) sowie der Validierung der Simulation vorgestellt. Basierend auf der Simulation wurden Untersuchungen zur Effizienz der beiden Regelungskonzepte angestellt, die so an einer realen Anlage nicht hätten durchgeführt werden können. Neben diesen Simulationsergebnissen wurden an zwei realen Anlagen sowie am Versuchsrundläufer Untersuchungen zur Zählgenauigkeit der intelligenten Kamera durchgeführt. Auch diese Ergebnisse werden vorgestellt. Schließlich werden die Ergebnisse der schalltechnischen Untersuchungen der stufenlosen und der stauschalterbasierten Regelung vorgestellt, die am Versuchsrundläufer experimentell ermittelt wurden. Sämtliche Ergebnisse werden jeweils direkt im Anschluss diskutiert.

4.1 Experimentelle Überprüfung der Zählgenauigkeit der intelligenten Kamera

Zur Überprüfung der Zählgenauigkeit der intelligenten Kamera wurden sowohl am Versuchsrundläufer, als auch an industriell genutzten Anlagen Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse der am Versuchsrundläufer durchgeführten Versuche sind in Tabelle 8 dargestellt. Bei den vier durchgeführten Versuchsläufen wurden insgesamt 75.741 Flaschen gezählt. Hierbei kam es zu keinerlei Fehlzählungen.

Tabelle 6: Ergebnisse der am Versuchsrundläufer durchgeführten Versuche zur Zählgenauigkeit der intelligenten Kamera.

Anzahl gezählter Flaschen	Fehler in Flaschen	Fehler prozentual
30.105	0	0 %
24.987	0	0 %
15.643	0	0 %
5.006	0	0 %

Zur Überprüfung der Tauglichkeit für eine Nutzung im industriellen Umfeld wurden, über die Versuche am Versuchsrundläufer hinaus, Testläufe an gewerblich genutzten Abfüllanlagen durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden an unterschiedlichen Anlagen durchgeführten Versuchsläufe sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der an zwei gewerblich genutzten Abfüllanlagen durchgeführten Versuche zur Zählgenauigkeit der intelligenten Kamera.

Anzahl gezählter Flaschen	Fehler in Flaschen	Fehler prozentual
18.877	585	3,10 %
33.116	380	1,15 %

4.1.1 Diskussion zu 4.1

Die am Versuchsrundläufer durchgeführten Versuche zur Zählgenauigkeit der intelligenten Kamera verliefen sehr erfolgreich. Es kam zu keinerlei Fehlzählungen während der Versuchsläufe.

Bei den unter Praxisbedingungen durchgeführten Versuchen blieb die Kamera hinter diesen Ergebnissen zurück. Im ersten Versuchslauf kam es zu einer Fehlerquote von 3,10 %. Die Fehlzählungen waren darauf zurückzuführen, dass die Flaschen, im Gegensatz zu den am Versuchsrundläufer durchgeführten Versuchen, nicht in neuwertigen Zustand waren. Als Hauptstörursachen wurden zwei Punkte identifiziert: Die Mündungen der nicht gezählten Flaschen waren entweder durch Absplitterungen beschädigt oder durch Verschmutzungen, wie z. B. Etiketten, nicht mehr als solche zu erkennen. Auf Grund dieser Ergebnisse wurde der Auswertalgorithmus zwischen dem ersten und zweiten Versuchslauf angepasst. Die Fehlerkennungsrate konnte dadurch auf 1,15 % reduziert werden. Durch weitere Anpassungen des Algorithmus an die Praxisbedingungen sollte es aber möglich sein, auch diese Erkennungsrate weiter zu verbessern.

4.2 Verifizierung und Validierung der Simulation

Bevor Vergleiche der beiden Regelungskonzepte mit Hilfe der Simulation durchgeführt werden konnten, wurde diese zunächst verifiziert und validiert. Ziel war es, die Vergleichbarkeit der auf Basis der Simulation gewonnenen Ergebnisse mit denen einer realen Anlage nachzuweisen.

Im Rahmen der Verifizierung wurden einzelne Szenarien bzw. Zustände, die während des Simulationslaufs auftreten können, auf ihre Plausibilität geprüft. Für sämtliche Versuche der Verifizierung wurde die in Kapitel 3.3 erläuterte stufenlose Regelung genutzt.

4.2.1 Verifizierung der Simulation

Die Verifizierung der Simulation erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde die Funktionsweise der zu Transporteuren verschalteten Transporteurmodule überprüft. Hierbei lag das Augenmerk auf der korrekten Darstellung des Materialtransports. In einem zweiten Schritt wurde das fehlerfreie Zusammenspiel der in Kapitel 3.6.4 dargestellten Versuchsanlage überprüft. Die Abmessungen und Parameter der Transporteurmodule

stimmten bei allen im Rahmen der Validierung und Verifizierung durchgeführten Versuchen mit denen der Versuchsanlage überein.

4.2.1.1 Verifizierung des Materialtransports des Simulationsmodells

Zur Überprüfung des Materialtransports des Simulationsmodells wurde eine Pufferstrecke gewählt, die im Anti-Starve-Modus betrieben wird. Während der Tests wurden die drei grundsätzlichen Fälle ungestörter Betrieb, Rückstau und Lücken im Behälterstrom durch Mangel erzeugt und überprüft. Zur Generierung der jeweiligen Situationen wurden Störungen an der vor- bzw. nachgeschalteten Maschine simuliert. In den Diagrammen Abbildung 50 bis Abbildung 52 sind die Ergebnisse der Tests graphisch dargestellt. Zu sehen ist die Füllung der Elemente der drei Transporteurmodule. Auf der senkrechten Achse ist dabei die Füllung der Elemente in Anzahl Behältern dargestellt. Auf der waagerechten Achse sind die Nummern der jeweiligen Elemente der einzelnen Transporteurmodule aufgeführt ($T_h.TM_i.b_j$). Die Nummerierung der Elemente (waagerechte Achse) beginnt daher mit jedem neuen Modul erneut mit Null. Zusätzlich sind zur besseren Unterscheidbarkeit die Elemente der drei Transporteurmodule durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Im Hintergrund der nicht komplett gefüllten Bereiche ist die Kapazität der Elemente ($T_h.TM_i.c_j$) als grau umrandeter Balken dargestellt.

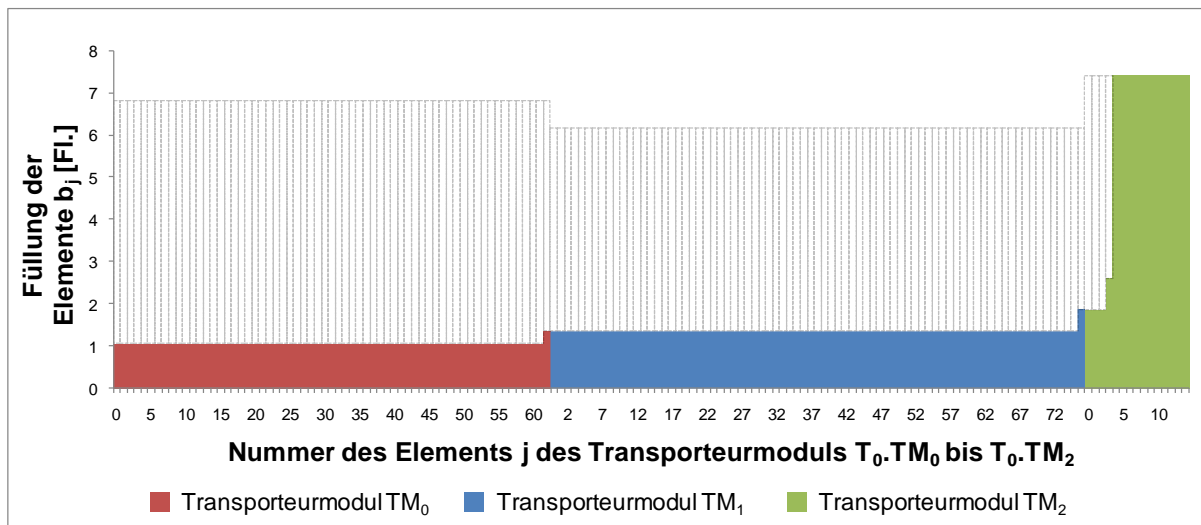


Abbildung 50: Darstellung der Elemente der Transporteurmodule $T_0.TM_0$ bis $T_0.TM_2$ aus Abbildung 49 90 Sekunden nach Anlauf der vorgeschalteten Maschine M_0 .

In Abbildung 50 ist der störungsfreie Betrieb dargestellt. Die eingestellte Sollfüllung von 600 Flaschen ist noch nicht erreicht. Im letzten Transporteurmodul ($T_0.TM_2$) sind die hinteren zehn Elemente komplett gefüllt. Die fünf Elemente davor sind, wie die Elemente der übrigen beiden Transporteurmodule, nicht komplett gefüllt. Ihre Füllung ergibt sich aus der Anzahl an eingespeisten Flaschen und der Geschwindigkeit des jeweiligen Transportbandabschnitts. Da die Geschwindigkeit der Transportbandketten vom ersten Transporteurmodul zum dritten Modul abnimmt, resultiert daraus ein breiterer Behälterstrom auf den hinteren Transporteurmodulen.

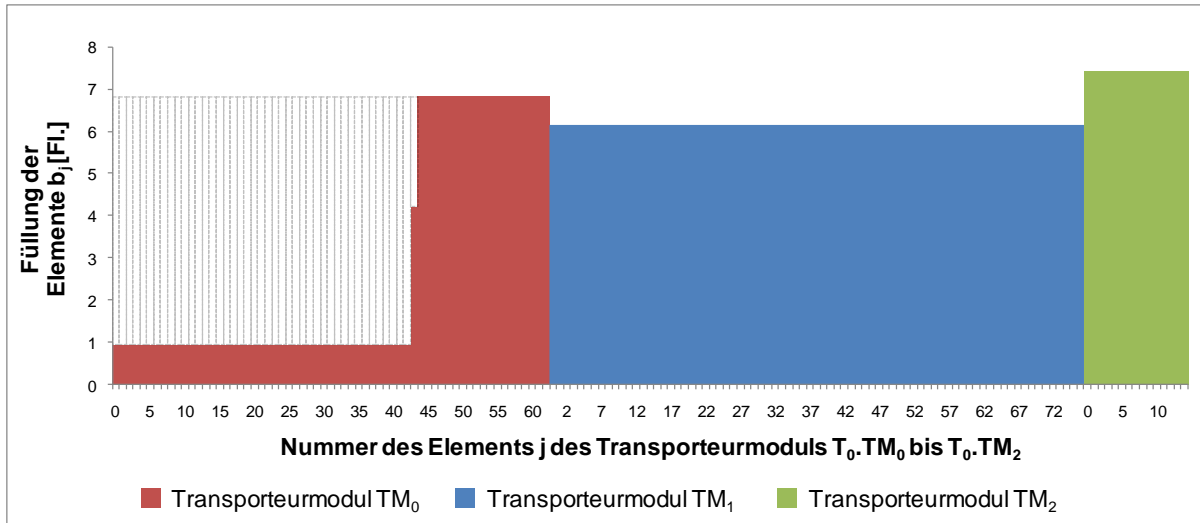


Abbildung 51: Darstellung der Elemente der Transporteurmodule $T_0.TM_0$ bis $T_0.TM_2$ aus Abbildung 49 nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine M_1 .

In der Abbildung 51 ist die Situation nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine dargestellt. Die Sollfüllung des Transporteurs ist überschritten. Das zweite und dritte Transporteurmodul sind komplett mit Behältern gefüllt. Auch die letzten Elemente des ersten Moduls sind bereits gefüllt. Davor befinden sich die Behälter noch im freien Transport. Die unterschiedlichen Füllungen der Elemente der einzelnen Module ergeben sich aus den unterschiedlichen Breiten der Transportbandabschnitte.

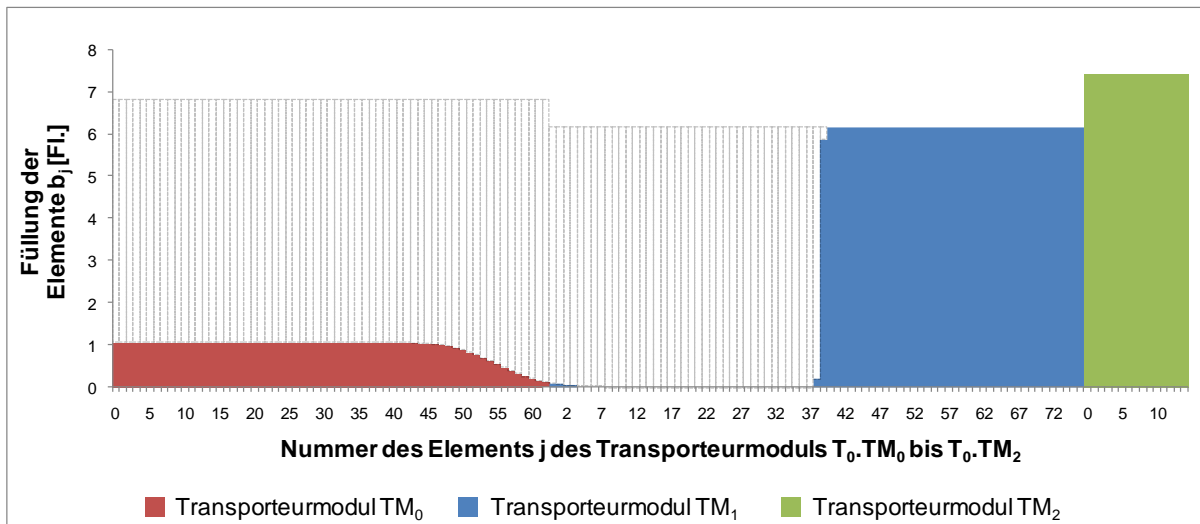


Abbildung 52: Darstellung der Elemente der Transporteurmodule $T_0.TM_0$ bis $T_0.TM_2$ aus Abbildung 49 nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine M_0 .

In Abbildung 52 ist der dritte Fall dargestellt. Die vorgeschaltete Maschine hatte eine Störung. Dadurch ist eine Lücke im Behälterstrom entstanden. Dies ist an den komplett geleerten Elementen des zweiten Transporteurmoduls zu erkennen. Die vorgeschaltete Maschine ist zum Zeitpunkt der Datenermittlung bereits wieder angelaufen. Auf dem ersten Transporteurmodul befindet sich der zweite Behälterpulk, der nun auf Grund des Rückstaus am Ende des Transporteurs aufholt und an den hinteren Behälterstrom herangefahren wird.

4.2.1.2 Diskussion zu 4.2.1.1

Mit Hilfe der Abbildungen lässt sich die Füllung der einzelnen Elemente der Transporteurmodule und damit auch die Füllung des gesamten Transporteurs auf einfache Weise visualisieren. Es kann nachgewiesen werden, dass sich die Breite des Flaschenstroms, wie erwartet, in Abhängigkeit des Zustroms an Behältern und der Geschwindigkeit der Bänder ausbildet. In Abbildung 50 ist zu sehen, wie die Breite des Behälterstroms auf Grund der abnehmenden Geschwindigkeit der Transportbänder der Module bis zum Ende des Transporteurs zunimmt. Ebenfalls nachgewiesen werden konnte die Staufähigkeit der Transporteure. Die hinteren Elemente des Transporteurs sind bei allen drei Abbildungen gefüllt, da in der Summe mehr Behälter eingespeist wurden, wie dem System entnommen wurden. Die virtuellen Behälter bewegen sich im freien Transport, genau wie in einer realen Anlage, mit der Geschwindigkeit der Transportbänder. Entsteht hingegen ein Rückstau, weil am Ende des Transporteurmoduls weniger Behälter entnommen, als eingespeist werden, füllt sich - durch die Art der Berechnung - der Transporteur. Die virtuellen Behälter bewegen sich im Pulk mit einer geringeren Geschwindigkeit, die nicht mehr der Bandgeschwindigkeit entspricht, sondern der sich aus Ausbringung der nachgeschalteten Maschine und Breite des Transporteurs ergebenden Pulkgeschwindigkeit. Auch dies entspricht dem Verhalten von staufähigen Transporteuren in realen Anlagen.

Auch das Leeren der Elemente funktioniert, wie in Abbildung 52 zu sehen ist. Nach Abreißen des Flaschenpulks durch einen Stillstand der vorgeschalteten Maschine (M_0) entsteht eine Lücke, die sich durch komplett geleerte Elemente äußert.

Ebenfalls zu erkennen sind die Grenzen der Darstellung des Systems. So verhalten sich die Behälter, die in den Pulk am Ende eines Transporteurs übergehen, anders als die simulierten Behälter des Systems. In einer realen Anlage werden die Behälter bereits abgebremst, bevor sie in das aufgestaute Pulkende übergehen. Dies geschieht durch Stöße benachbarter Flaschen, die ihrerseits an die langsameren Flaschen des aufgestauten Pulks stoßen. Dies äußert sich durch eine Wölbung des Pulkendes entgegen der Transportrichtung. Im Modell bildet sich dieser Bereich, in dem die Flaschen eine Geschwindigkeit zwischen Pulkgeschwindigkeit und Bandgeschwindigkeit annehmen, nicht aus. Dadurch endet der Pulk mit einer scharfen Begrenzung, wie in den Abbildungen zu erkennen ist. Eine weitere Abweichung des Modells ist in Abbildung 52 zu erkennen. Der zweite Flaschenpulk, der sich an der Grenze zwischen dem ersten ($T_0.TM_0$) und zweiten Transportmodul ($T_0.TM_1$) befindet, beginnt nicht mit einer klaren Abgrenzung gegenüber den leeren Bereichen, wie dies in einer realen Anlage der Fall ist. Stattdessen kommen Bereiche vor, die mit Bruchteilen von Flaschen gefüllt sind. Dieser Fehler tritt durch die Art der Berechnung der Flaschenübergänge auf. Mit Formel 3.33 (Kapitel 3.6.2.1) wird nicht die Position der einzelnen Flaschen berechnet, sondern ein Flaschenstrom in Abhängigkeit der Füllung des vorhergehenden Elements und der Geschwindigkeit der Transportbänder. Beide Fehler sind systembedingt, haben aber zu vernachlässigende Auswirkungen auf das Simulationsergebnis, wie sich in den folgenden Kapiteln zeigen wird.

Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass der Behälterfluss mit dem gewählten Modell ausreichend genau abgebildet werden kann.

4.2.1.3 Verifizierung des Anlagenverhaltens des Simulationsmodells

Im zweiten Schritt der Verifizierung der Simulation wurde der in Kapitel 3.6.4 dargestellte Anlagenausschnitt untersucht. Hierbei ging es in erster Linie um das Zusammenwirken der einzelnen Module der Anlage. Auch hierzu wurden Testfälle zur Überprüfung generiert und das Verhalten der simulierten Maschinen und Transporteure aufgezeichnet. Erfasst wurden dazu die Füllung der Transporteure ($T_0.B$ und $T_1.B$) sowie die Ausbringung der drei im System befindlichen Maschinen ($M_{0,q}$, $M_{1,q}$ und $M_{2,q}$). Sämtliche Messwerte wurden sekundlich, bzw. bei den in Abbildung 54 und Abbildung 55 dargestellten Szenarien alle zwei Sekunden, erfasst. Die Ausbringung der Maschinen ist jeweils in Flaschen pro Stunde und die Füllung der Transporteure in Anzahl Behälter dargestellt. Die Kapazität (C) der Transporteure betrug 1.000 Behälter. Die Sollfüllung für den ersten Transporteur ($T_{0.B_{soll}}$) wurde mit 600 Behältern festgelegt, die Sollfüllung des zweiten Transporteurs ($T_{1.B_{soll}}$) mit 250 Behältern. Dies waren die Werte, die die Regelung nach jeder Störung des Systems wieder anfahren sollte. Dazu konnte die Ausbringung der vor- und nachgeschalteten Maschine auf das 1,3-fache der mittleren Maschine – des Zentralaggregats – erhöht werden. Die Einstellausbringung der mittleren Maschine betrug 15.000 Fl./h und wurde nicht nachgeregelt. Die Regelung des Transporteurs T_0 und T_1 konnte der Maschine M_1 nur auf Grund eines Mangels bzw. eines Rückstaus die Freigabe entziehen.

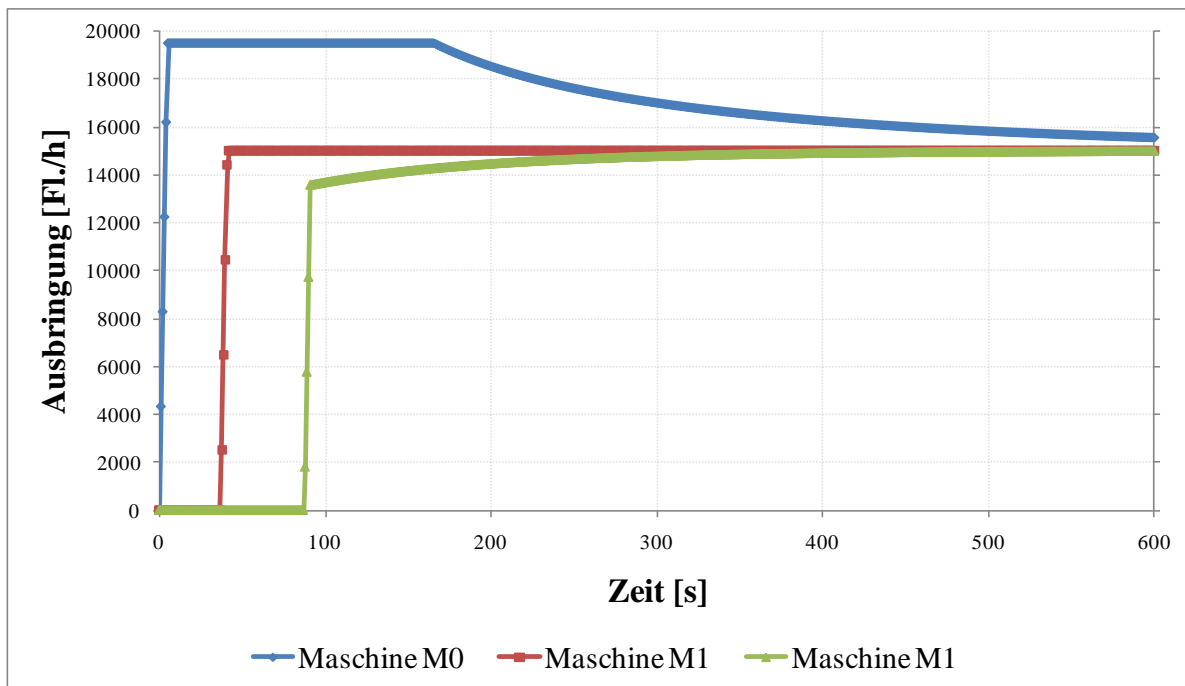
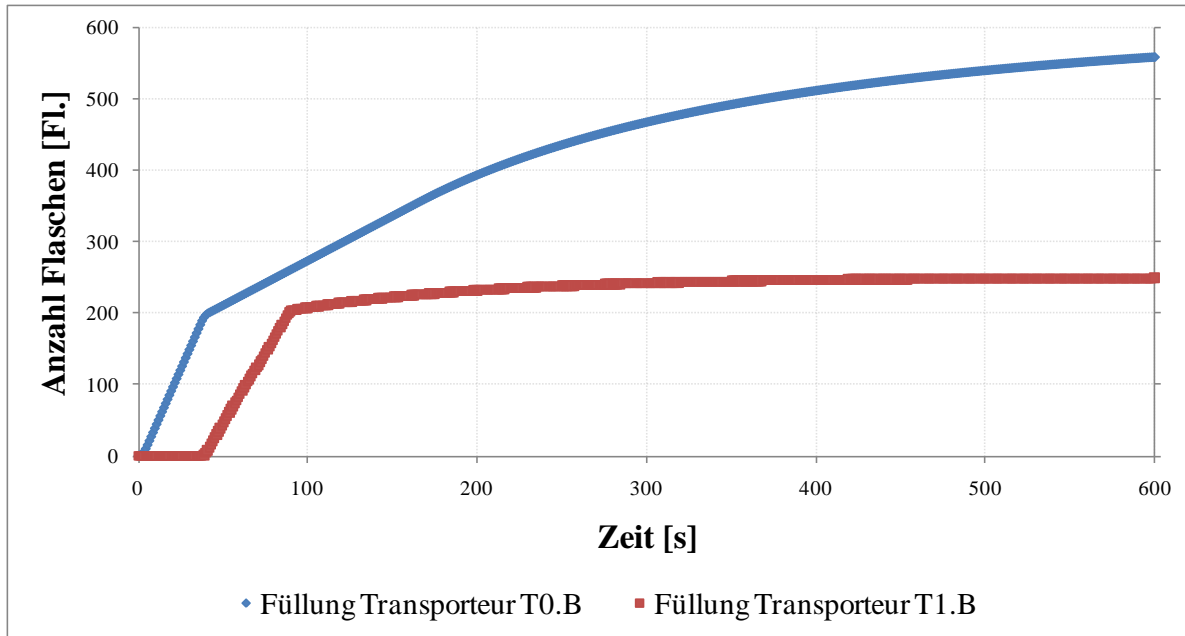


Abbildung 53: Anfahrverhalten der in Abbildung 49 dargestellten Anlage. In den beiden Diagrammen sind sowohl die Füllungsgrade der Transporteure (oben), als auch die Ausbringungen der Maschinen dargestellt.

In Abbildung 53 ist das Verhalten der Anlage beim Start dargestellt. Sämtliche Transporteure sind zu Versuchsbeginn leer (Abbildung 53 oben) und die Maschinen stehen (Abbildung 53 unten). Zunächst beginnt die erste Maschine des Systems M_0 zu arbeiten. Die Ausbringung wird bis auf die Einstellausbringung erhöht. In der Folge steigt die Füllung des ersten Puffers $T_{0.B}$ linear an. Nach der Puffertotzeit von 37,5 s beginnt die zweite Maschine des Systems M_1 zu arbeiten. Zu diesem Zeitpunkt haben die Behälter die Distanz der Pufferstrecke überwunden und stauen sich vor der zweiten Maschine, so dass sie dieser zur Verarbeitung zur Verfügung stehen. Der Zustand des Transporteurs entspricht zu diesem Zeitpunkt der

Abbildung 50. Die Füllung des zweiten Transporteurs beginnt nun linear anzusteigen. Der Anstieg der Füllung des ersten Transporteurs $T_{0.B}$ erfolgt ab diesem Zeitpunkt immer noch linear, aber mit deutlich geringerer Steigung, da dem Transporteur nun nicht nur Behälter zugeführt, sondern auch entnommen werden. Die Zunahme der Füllung erfolgt linear, bis die erste Maschine des Systems M_0 beginnt die Ausbringung herunter zu regeln.

Nach Überwindung der Totzeit des zweiten Transporteurs fängt auch die dritte Maschine des Systems M_2 an zu produzieren. In diesem Fall geht der lineare Anstieg der Füllung $T_{1.B}$ direkt in einen exponentiellen Anstieg über und nähert sich asymptotisch der Sollfüllung an. Das System erreicht auf diese Weise seinen Sollzustand.

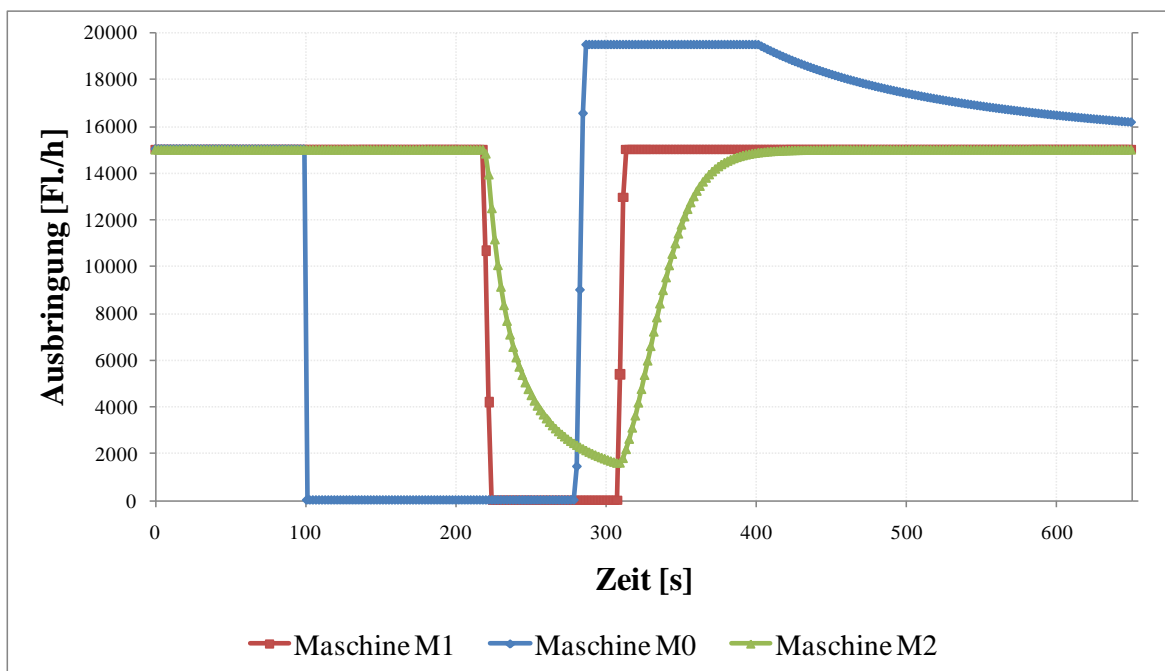
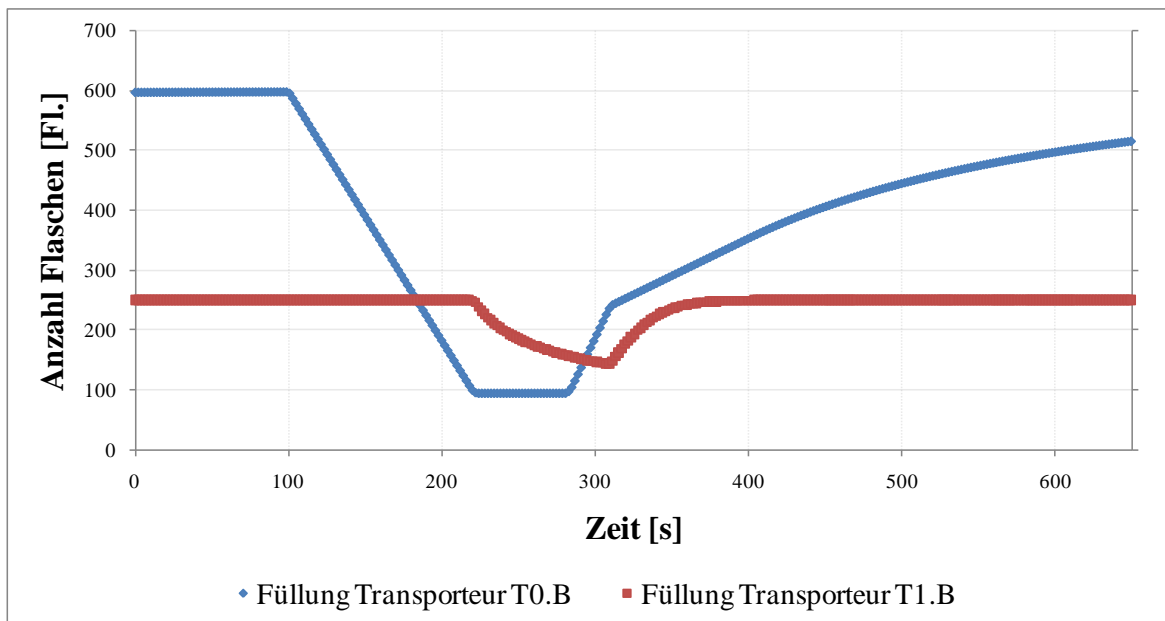


Abbildung 54: Verhalten der in Abbildung 49 dargestellten Anlage nach einer 180 s dauernden Störung der vorgeschalteten Maschine M_0

In Abbildung 54 ist das Verhalten der simulierten Anlage nach einer 180 s dauernden Störung der vorgeschalteten Maschine M_0 dargestellt. Das System befindet sich vor der Störung im Sollzustand. Das heißt, beide Transporteure weisen die Sollfüllung auf (Abbildung 54 oben) und die Maschinen M_0 bis M_2 arbeiten mit der Einstellausbringung des Zentralaggregats M_1 (Abbildung 54 unten). Nach dem Stillstand der Maschine M_0 arbeitet das Zentralaggregat M_1 zunächst mit Einstellausbringung weiter. Erst wenn der Transporteur bis auf 100 Flaschen geleert ist, wird der Maschine M_1 die Freigabe entzogen. Sie schaltet ab, um keine Behälterlücken in die Maschine zu fahren.

Nach der simulierten Störung läuft die Maschine M_0 mit ihrer Einstellausbringung wieder an. Dadurch steigt die Füllung $T_0.B$ linear an, bis nach Überwindung der Totzeit von 27 s die nachfolgende Maschine M_1 wieder anlaufen kann. Die Puffertotzeit ist in diesem Fall kürzer als beim Vollfahren, da sich bereits Flaschen im Bereich vor der nachfolgenden Maschine befinden und dieser nicht mehr gefüllt werden muss. Nach dem Anlaufen der Maschine M_1 füllt sich der Transporteur T_0 langsamer, da ihm kontinuierlich Flaschen entnommen werden. Ab dem Erreichen einer Füllung $T_0.B$ von 400 Flaschen beginnt die Maschine M_0 ihre Ausbringung herunter zu regeln und fährt die Sollfüllung von 600 Flaschen an.

Auf Grund der Mangelsituation und dem daraus resultierenden Stillstand von M_1 sinkt die Füllung auf dem zweiten Transporteur $T_1.B$. Daher regelt die dritte Maschine M_2 ihre Ausbringung der Pufferfüllung entsprechend herunter. Nachdem die Maschine M_1 wieder angelaufen ist, beginnt die Maschine M_2 ihre Ausbringung der Füllung des Transporteurs entsprechend zu steigern und erreicht mit Einstellung der Sollfüllung wieder die Einstellausbringung der vorgeschalteten Maschine M_1 .

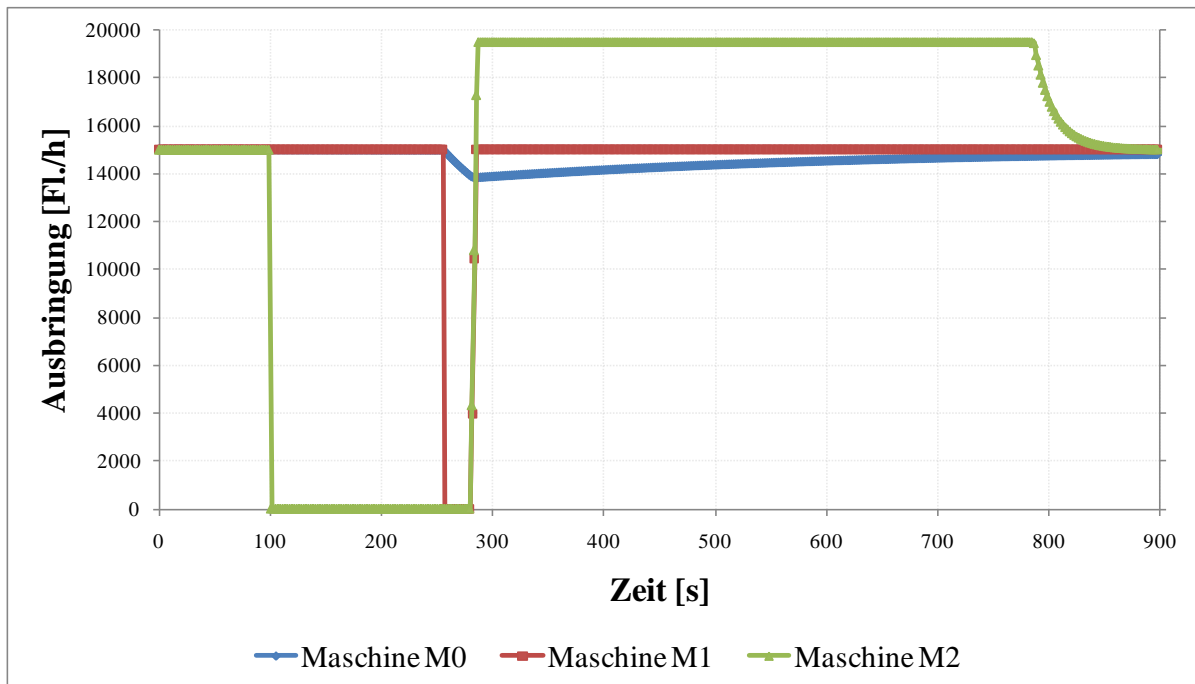
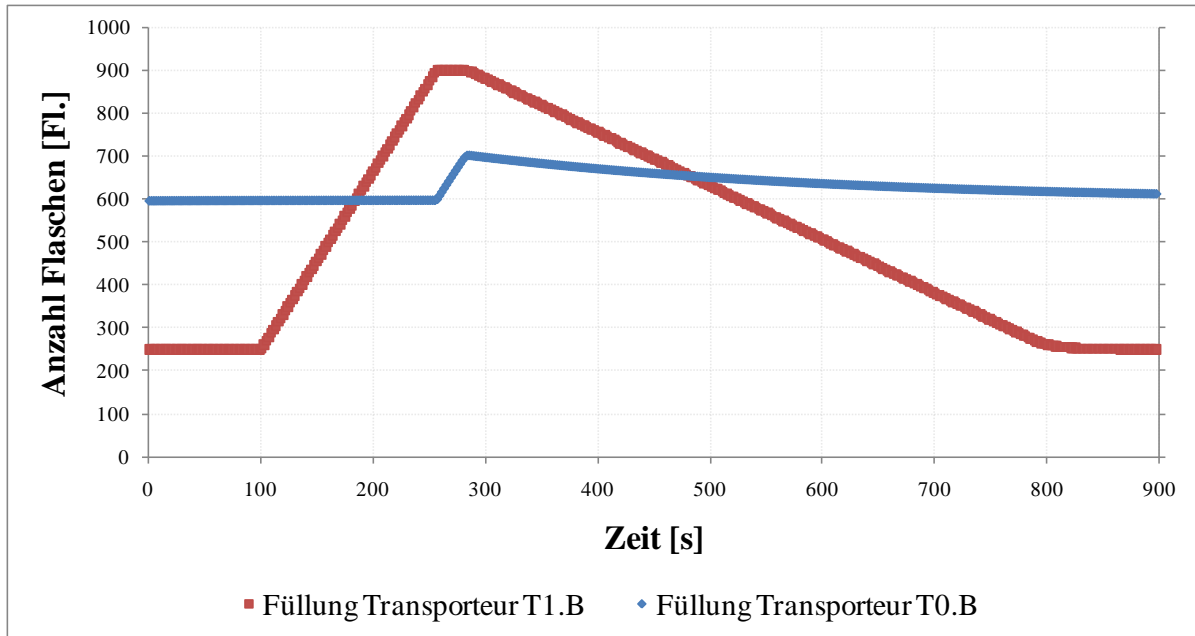


Abbildung 55: Verhalten der in Abbildung 49 dargestellten Anlage nach einer 180 s dauernden Störung der nachgeschalteten Maschine M_2

Als letzter Fall der Verifizierung wird in Abbildung 55 die Störung der in Flussrichtung letzten Maschine M_2 des Systems dargestellt. Auch in diesem Fall wird eine Störung von 180 s Dauer simuliert. Ausgangssituation war wiederum der Sollzustand des Systems.

Nach dem Stillstand der Maschine M_2 (Abbildung 55 unten) füllt sich der davor befindliche Transporteur T_1 (Abbildung 55 oben). Erreicht dieser seine maximale Füllung von 900 Flaschen, muss die vorgeschaltete Maschine M_1 auf Grund des Rückstaus abgeschaltet werden. M_1 kann erst wieder nach der Störung anlaufen. Das Anlaufen kann dabei zeitgleich

mit M_2 erfolgen, da M_2 mit Überausbringung im Verhältnis zu M_1 arbeitet und der Transporteur nicht komplett gefüllt wird ($T_1.B = 900 \text{ Fl.}$; $T_1.C = 1000 \text{ Fl.}$).

Auf Grund des kurzen Stillstands von M_1 füllt sich auch der davor befindliche Transporteur T_0 über seine Sollfüllung. Die vorgeschaltet Maschine M_0 wird daher in ihrer Ausbringung herunter geregelt. Nach dem Wiederanfahren der Maschine M_1 erhöht auch M_0 seine Ausbringung wieder kontinuierlich.

4.2.1.4 Diskussion zu 4.2.1.3

Durch die oben dargestellten Testfälle kann das fehlerfreie Zusammenwirken der Simulationsmodule für die drei Maschinen und zwei Pufferstrecken des Systems nachgewiesen werden. Die Komponenten beeinflussen sich dabei über die Füllung der beiden Transporteure in der erwarteten Weise gegenseitig. Sowohl das Anfahren des Sollzustands mit den Darstellungen der Totzeiten (siehe Abbildung 53), als auch das Fortpflanzen von Mangel- (Abbildung 54) bzw. Rückstausituationen (Abbildung 55) funktioniert fehlerfrei. Die Verifizierung der Simulation zeigte somit deren Eignung zur Abbildung des betrachteten Systems.

4.2.1.5 Verifizierung des statistischen Ausfallverhaltens des simulierten Maschinenmoduls

Wie in Kapitel 3.6.2.2 beschrieben, verfügt jedes Maschinenmodul über ein Unterprogramm zur Generierung von Ausfallzeiten. Dazu muss die Ausfallzeit (Down Time DT) und die Betriebszeit zwischen den Störungen (Time Between Failure TBF) getrennt generiert werden. Beide Zeiten werden mit Hilfe einer Weibullverteilung erzeugt. Für die Verifizierung und die Simulationsläufe wurde auf die Ergebnisse von Voigt [159] zurückgegriffen.

Um die Funktionsweise des Programmteils zur Generierung des Störzeitverhaltens zu überprüfen, wurden Störzeiten generiert und im Vergleich zur mathematischen Weibullfunktion aufgetragen. In Abbildung 56 ist die TBF einer Flaschenfüllmaschine in einer Mehrwegabfüllanlage aufgeführt. Die aufgeführten Werte wurden unter Annahme eines α -Wertes von 0,68 und eines β -Wertes von 1334,4 erzeugt (siehe Formeln 2.12 bis 2.14 in Kapitel 2.1.2.1). Die blau dargestellten „Zufallswerte der Simulation“ wurden von der Simulation generiert und im Diagramm aufgetragen. Bei der roten Kurve handelt es sich um den mit Hilfe der oben angegebenen Werte berechneten Verlauf der Weibullfunktion. Vergleicht man die beiden Kurven miteinander, ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,973.

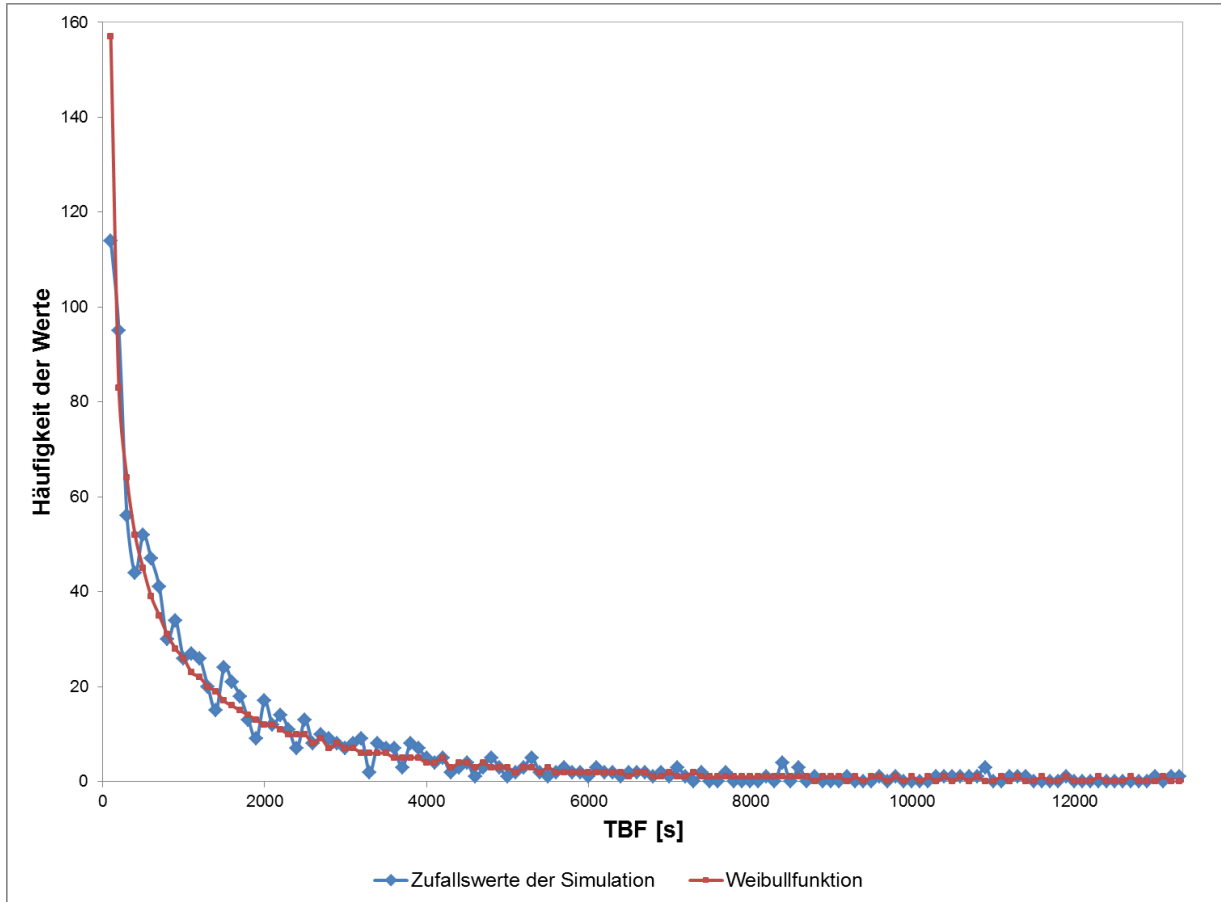


Abbildung 56: Time Between Failure einer Flaschenfüllmaschine in Form einer Häufigkeitsverteilung ($\alpha = 0,68$; $\beta = 1334,4$, Koeffizienten aus [159])

Auf die gleiche Weise wurde bei der Erstellung der Abbildung 57 vorgegangen. Die beiden Kurven wurden unter Vorgabe eines α -Wertes von 0,80 und eines β -Wertes von 57,2 erzeugt und stellen die Verteilung der Ausfalldauer der gleichen Maschine dar. Vergleicht man auch in diesem Fall die den Kurven zu Grunde liegenden Werte, erhält man einen Korrelationskoeffizienten von 0,988.

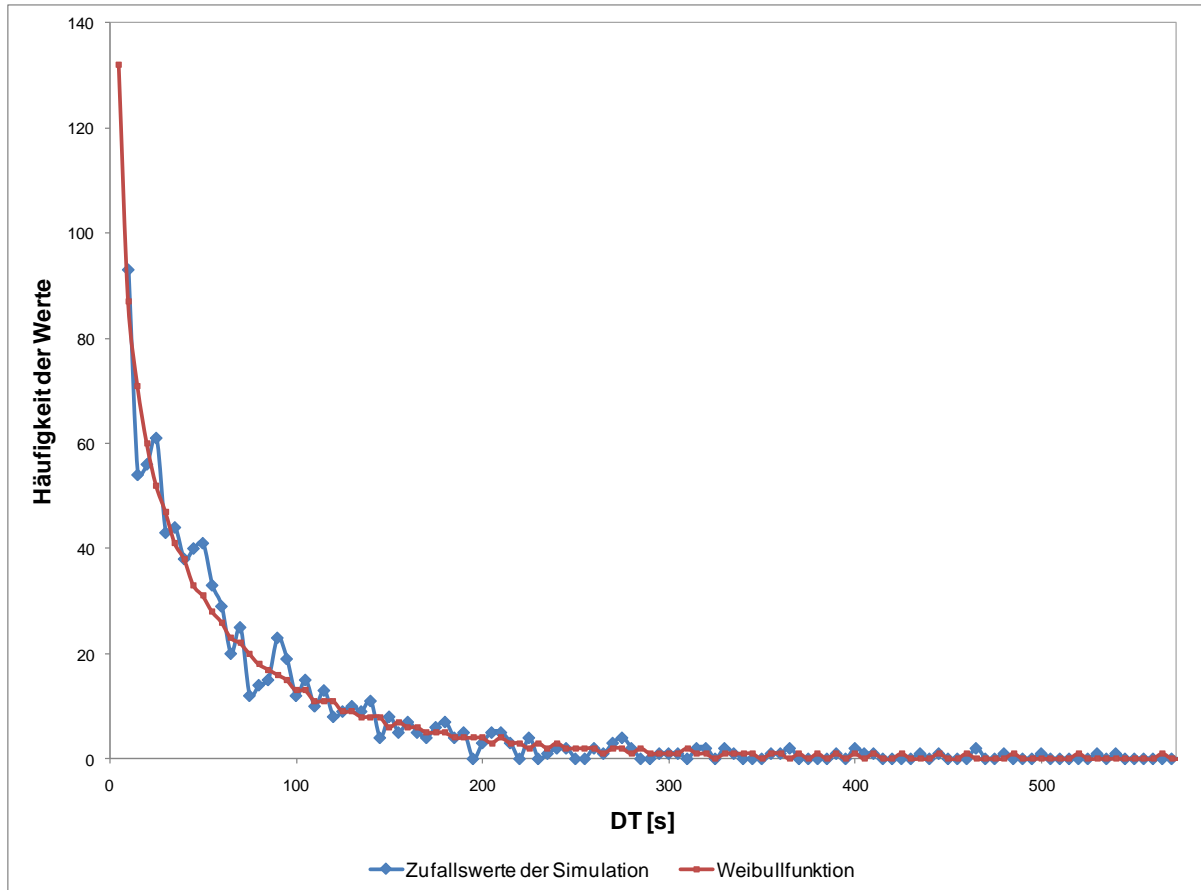


Abbildung 57: Down Time einer Flaschenfüllmaschine in Form einer Häufigkeitsverteilung ($\alpha = 0,80$; $\beta = 57,2$, Koeffizienten aus [159])

Sowohl bei den Werten der Verteilung für die Down Time als auch der Verteilung der Time Between Failure handelt es sich bei den Parametern α und β um reale Werte einer von Voigt untersuchten Maschine [159].

4.2.1.6 Diskussion zu 4.2.1.5

Das Störverhalten nach der Weibullfunktion kann durch das in Kapitel 3.6.2.2 beschriebene Unterprogramm zur zufälligen Generierung von Ausfallzeiten gut simuliert werden. Die durch die Simulation erzeugten Kurven weichen nur geringfügig von den mathematischen Funktionen ab. Dies äußert sich durch die nahe an eins heranreichenden Korrelationskoeffizienten, die durch den Vergleich der den Kurven zu Grunde liegenden Werte ermittelt wurden.

4.2.2 Validierung der Simulation

Im Rahmen der Validierung der Simulation wurde das Verhalten der Simulation mit dem eines realen Transporteurs verglichen. Als Referenzanlage stand der Versuchsrundläufer zur Verfügung (siehe Abbildung 43). Zur Überprüfung wurden wiederum Testfälle generiert. Dabei stand das Verhalten des Systems und der Simulation bei Situationen, die vom Sollzustand abweichen, im Vordergrund.

Alle Versuche wurden im Anti-Starve-Modus der Simulation bzw. des realen Betriebs des Versuchsrundläufers durchgeführt. Die Einstellausbringung der nachgeschalteten Maschine betrug dabei 15.000 Fl./h und wurde während der Versuchsrundläufe nicht geregelt. Lediglich der Stopp der nachgeschalteten Maschine bei Flaschenmangel war möglich. Die Einstellausbringung der vorgeschalteten Maschine betrug 19.500 Fl./h und konnte durch die Regelung variabel angepasst werden. Die Kapazität des Transporteurs betrug 1.000 Flaschen, die Sollfüllung wurde auf 550 Flaschen eingestellt.

Zusätzlich zum Regelverhalten der beiden Systeme wurde die Durchlaufzeit der Flaschen ermittelt. Hiermit ist die Zeit gemeint, die die Behälter benötigen, um von der vorgeschalteten Maschine zur nachgeschalteten gefördert zu werden. Diese beträgt bei der simulierten Transportstrecke 30,2 s, am Versuchsrundläufer beträgt sie 30,3 s ($\pm 0,18$ s, $n = 5$, $\alpha = 0,95$).

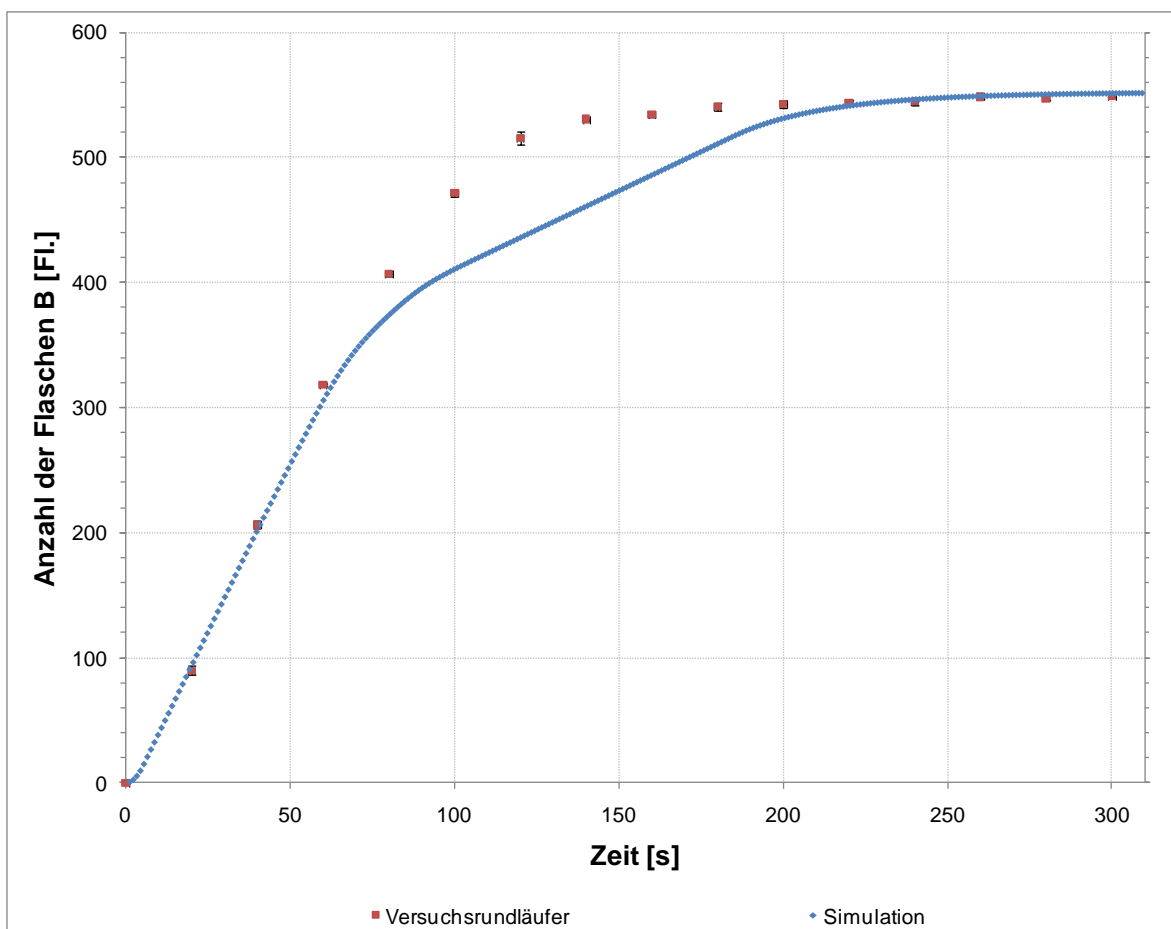


Abbildung 58: Anfahrverhalten der Sollfüllung (550 Fl.) bei zuvor komplett leerem Puffer (Versuche am Versuchsrundläufer $n = 5$; $\alpha = 0,05$)

In Abbildung 58 ist das Anfahrverhalten des Transporteurs dargestellt. Der Transporteur ist bei Versuchsbeginn komplett leer. Beginnt die vorgeschaltete Maschine zu arbeiten, füllt sich der Transporteur zunächst linear. Bis zu einer Füllung von ca. 250 Flaschen verhalten sich die Simulation und der Versuchsrundläufer gleich. Ab diesem Zeitpunkt füllt sich der virtuelle Transporteur der Simulation langsamer als der reale des Versuchsrundläufers (Erklärung siehe

Diskussion). Die Sollfüllung wird im Anschluss von beiden Systemen erreicht und eingehalten.

In Abbildung 59 ist das Verhalten des Transporteurs bei einer 30-sekündigen Störung der nachgeschalteten Maschine aufgetragen. Dabei füllt sich der Transporteur von seiner Sollfüllung ausgehend bis auf eine Füllung von ca. 650 Flaschen. Die vorgeschaltete Maschine regelt im Zeitraum der Störung, der gestiegenen Füllung entsprechend, ihre Ausbringung herunter. Nach Wiederanlauf der nachgeschalteten Maschine wird die Sollfüllung wieder angefahren. Der reale und der simulierte Transporteur verhalten sich dabei im Rahmen der Fehlerbreiten nahezu gleich. Erst kurz vor Erreichen der Sollfüllung ist ein signifikanter Unterschied zu erkennen. Die reale Anlage erreicht die Sollfüllung etwas später im Vergleich zur simulierten Anlage (Erklärung siehe Diskussion).

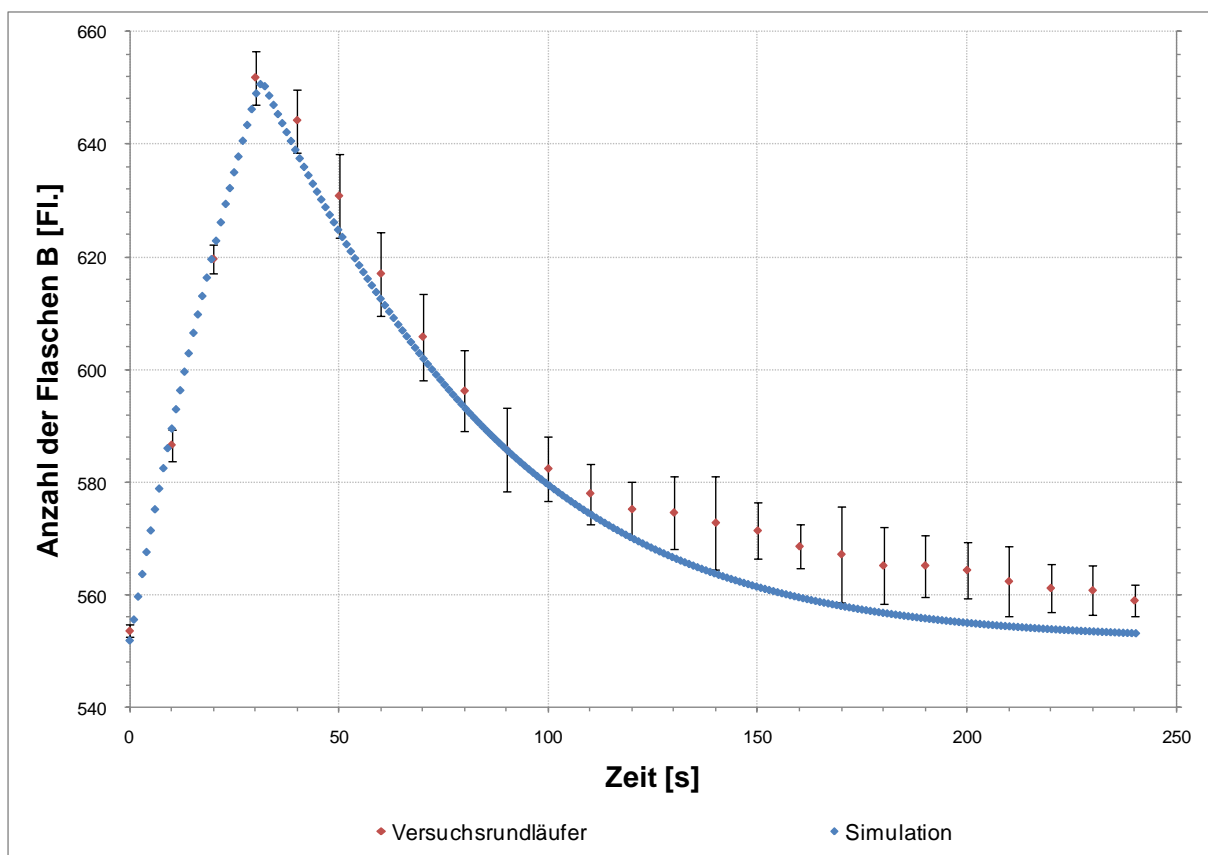


Abbildung 59: Verhalten bei Überschreitung der Sollfüllung (550 Fl.) durch eine 30-sekündige Störung der nachgeschalteten Maschine (Versuche am Versuchsrundläufer $n = 5$; $\alpha = 0,05$)

Als letzter zu validierender Fall ist die Störung der vorgeschalteten Maschine zu erwähnen. Das Verhalten des Systems bei einer 30-sekündigen Störung der vorgeschalteten Maschine ist in Abbildung 60 dargestellt. Auf Grund des Stillstands an der vorgeschalteten Maschine wird die Sollfüllung unterschritten. Die nachgeschaltete Maschine läuft, da sie der Master des Systems ist, mit Einstellausbringung weiter. Die Füllung sinkt bis auf einen Wert von ca. 420 Flaschen ab. Nach Wiederanlauf der vorgeschalteten Maschine werden zwei Ziele verfolgt. Zum einen wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine der reduzierten Füllung entsprechend erhöht, um die Sollfüllung wieder zu erreichen. Zum anderen wird die Lücke im

Behälterstrom entsprechend dem in Kapitel 3.3.5 vorgestellten Algorithmus geschlossen. Die Sollfüllung wird schließlich wieder erreicht. Dabei sind keine signifikanten Unterschiede zwischen simulierten und realen System festzustellen.

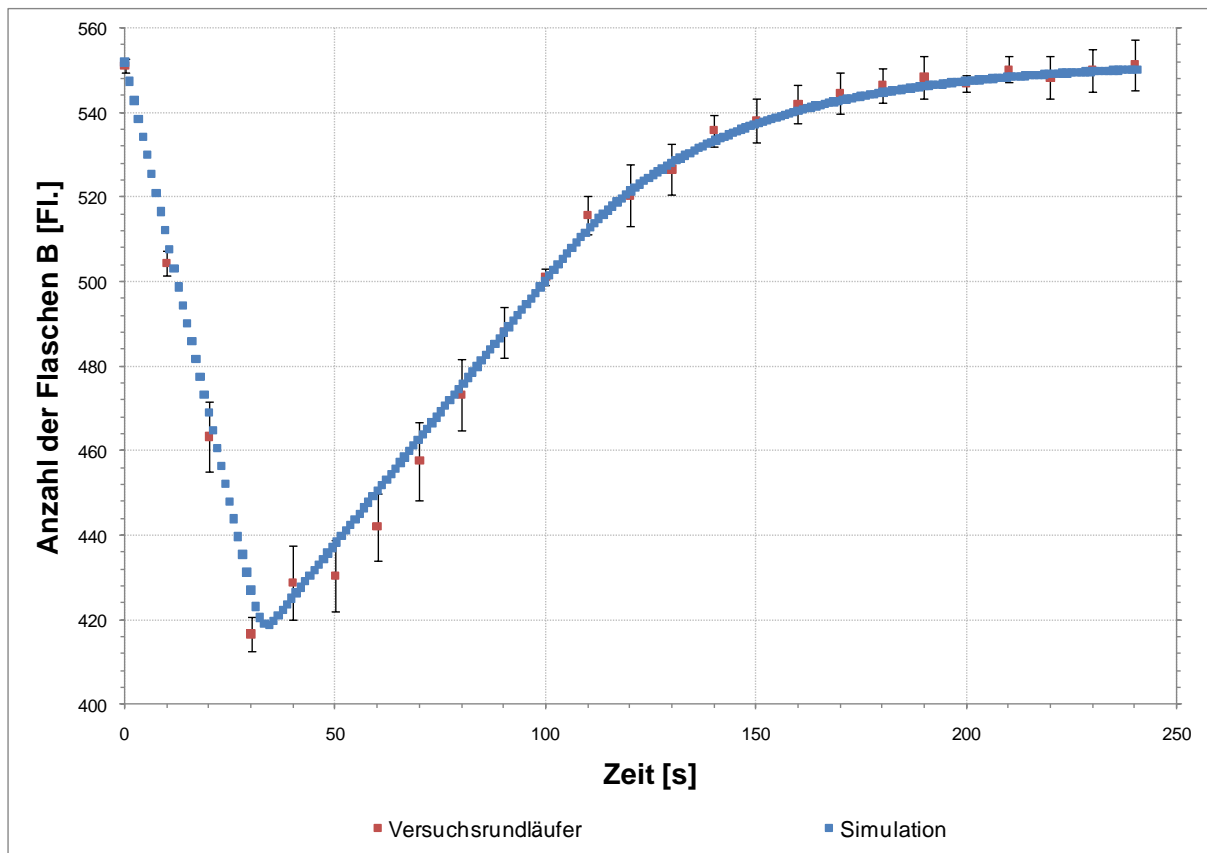


Abbildung 60: Verhalten bei Unterschreitung der Sollfüllung (550 Fl.) durch eine 30-sekündige Störung der vorgeschalteten Maschine (Versuche am Versuchsrundläufer $n = 5$; $\alpha = 0,05$)

4.2.3 Diskussion zu 4.2.2

Durch die in den Abbildungen 59 bis 61 dargestellten Testfälle kann das Verhalten des Versuchsrundläufers mit dem der Simulation verglichen werden. Es wurde gezielt die als Führungsgröße verwendete Füllung des Transporteurs zur Validierung herangezogen. Auf dieser basieren bei der stufenlosen Regelung das Verhalten der Maschinen und die Geschwindigkeit der Transporteure. Das bedeutet, dass bei gleicher Wahl der Parameter (Pufferstreckendimensionierung, Einstellausbringung der Maschinen und maximale Geschwindigkeit der Transporteure) das Verhalten des Systems nur von dessen Füllung abhängt. Die korrekte Wahl der Parameter lässt sich an der identischen Puffertotzeit der Simulation und des Versuchsrundläufers erkennen.

Beim Anfahren der Sollfüllung des Transporteurs (Abbildung 58) kam es zu größeren Abweichungen zwischen Versuchsrundläufer und Simulation. Diese lassen sich durch den Aufbau des Versuchsrundläufers erklären. Es befindet sich am Ende des Transporteurs keine Maschine, die die Flaschen definiert abnimmt. Dadurch verlassen die ersten Flaschen, die das Ende des Transporteurs erreichen, diesen einreihig. Um aber die Sollfüllung anfahren zu

können, muss bei der Versuchsanlage der dritte Transportbandabschnitt auf eine Geschwindigkeit reduziert werden, die mit Hilfe der Formel 3.2 (Kapitel 3.1.1) berechnet wird. Dies hat wiederum zur Folge, dass der Abfluss an Behältern im Vergleich zur Simulation früher einsetzt, aber zum andern nicht der Einstellausbringung der nachgeschalteten Maschine entspricht ($< 15.000 \text{ Fl./h}$). In der Simulation hingegen läuft die nachgeschaltete Maschine erst an, wenn sich ein Behälterpulk vor der nachgeschalteten Maschine gebildet hat. Der Einschaltzeitpunkt der Maschine ist an der verringerten Steigung des blauen Graphen zu erkennen. Ab diesem Zeitpunkt werden dem Transporteur sowohl Behälter zugeführt (19.500 Fl./h) als auch Behälter durch die nachgeschaltete Maschine abgeführt (15.000 Fl./h). Die zweite kontinuierliche Abnahme der Steigung ist durch das Herunterregeln der vorgeschalteten Maschine zu erklären. Letztlich erreichen aber beide Systeme die geforderte Sollfüllung. Die Simulation bildet dabei das Verhalten des Versuchsrundläufers nicht exakt ab, stellt aber das reale Verhalten einer Anlage realistischer dar als der Versuchsrundläufer.

In Abbildung 59 ist das Verhalten nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine dargestellt. Hierbei kommt es in der Phase kurz vor Erreichen der Sollfüllung zu geringen Abweichungen zwischen Simulation und Versuchsrundläufer. Diese Abweichungen sind wiederum auf das Fehlen einer nachgeschalteten Maschine am Versuchsrundläufer zurückzuführen. Die Entnahme von Behältern schwankt daher leicht und entspricht nicht exakt den geforderten 15.000 Fl./h . Hierdurch wird die Sollfüllung am Rundläufer etwas später erreicht.

Bei einer Störung der vorgeschalteten Maschine (Abbildung 60) kann kein signifikanter Unterschied zwischen Simulation und Versuchsrundläufer festgestellt werden. Die Schwankungen des Behälterablaufs spielen hier eine geringere Rolle, da diese durch das Nachregeln der vorgeschalteten Maschine unmittelbar ausgeglichen werden können. Im oben beschriebenen Fall (Störung der nachgeschalteten Maschine) dagegen wird die vorgeschaltete Maschine zwar auch nachgeregelt, die Einstellung der Sollfüllung muss aber durch das Entfernen von Behältern durch die nachgeschalteten Maschine erfolgen. Da diese ihre Ausbringung nicht ändert, dauert das Anfahren der Sollfüllung länger und ist weniger stark durch die vorgeschaltete Maschine zu beeinflussen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit Hilfe der Validierung nachgewiesen werden konnte, dass die Simulation in der Lage ist, das Verhalten einer realen Anlage für die simulierten Testfälle ausreichend genau darzustellen. Abweichungen zwischen Simulation und Versuchsrundläufer sind durch einen nicht optimalen Aufbau des Versuchsrundläufers (Fehlen der nachgeschalteten Maschine) zu erklären. Auf eine Simulation bzw. eine Aufnahme dieser Unzulänglichkeiten in das Simulationsmodell wurde bewusst verzichtet, da sie für die in der Praxis eingesetzten Anlagen keine Rolle spielen (Transportstrecken ohne eine nachgeschaltete Maschine kommen in industriell genutzten Anlagen nicht vor).

4.3 Das Verhalten der Regelungskonzepte

Das unterschiedliche Regelungsverhalten der beiden Konzepte soll hier an Hand der Simulation eines Anti-Starve-Puffers erläutert werden. Verglichen wird das Verhalten der fünfstufigen stauschalterbasierten Regelung mit dem der stufenlosen Regelung. Alle Werte in den unten dargestellten Diagrammen wurden mit Hilfe der in Kapitel 3.6 vorgestellten und in Kapitel 4.2 verifizierten und validierten Simulation erzeugt. Die Einstellungen entsprechen dabei jenen, die in Kapitel 4.4 zur Effizienzanalyse der verschiedenen Konzepte verwendet werden.

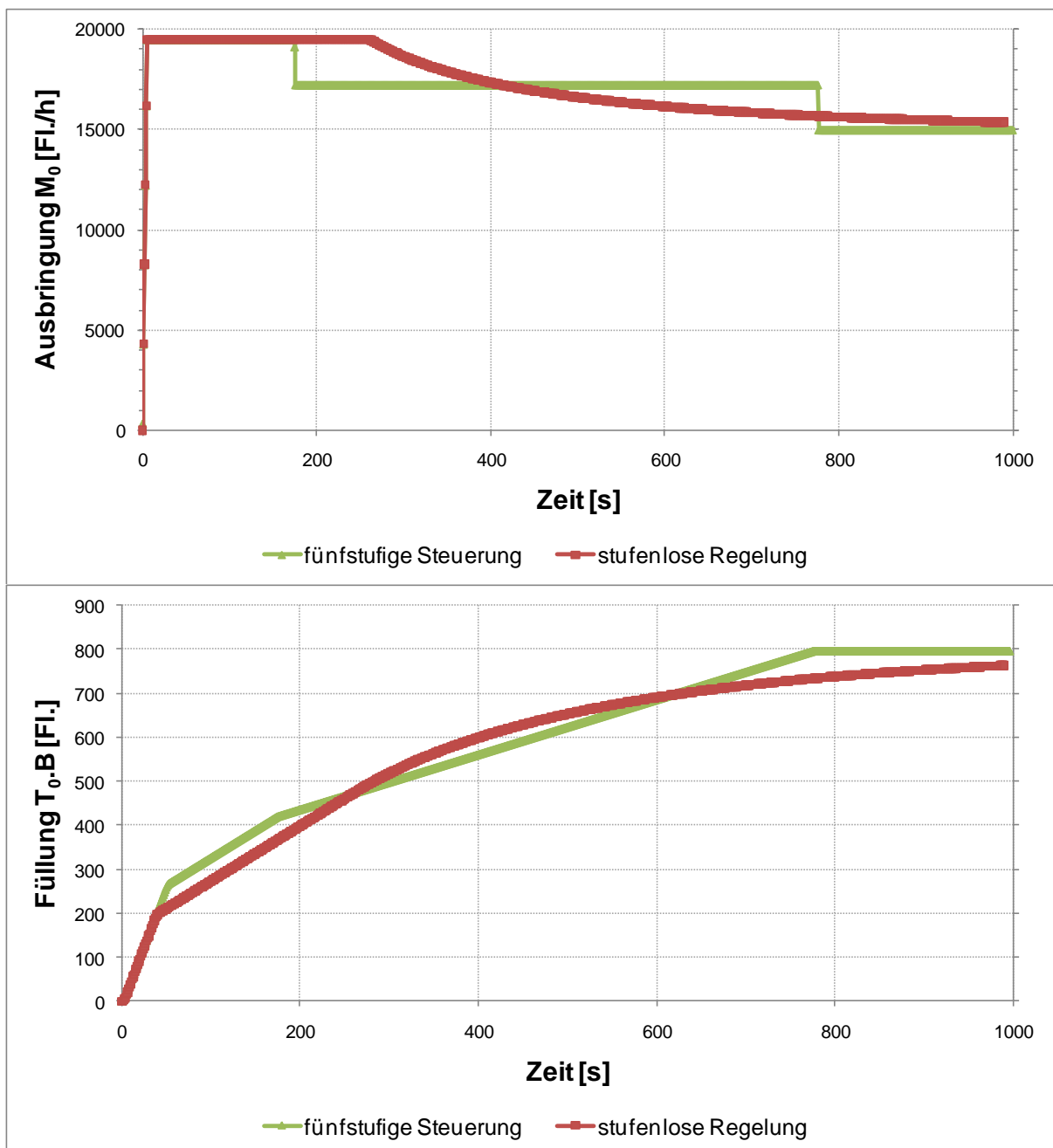


Abbildung 61: Anfahrverhalten der fünfstufigen und der stufenlosen Regelung bei zuvor leerem Transporteur Oben: Ausbringung der Maschine M_0 in Abhängigkeit der Füllung des Transporteurs Unten: Füllung des Transporteurs T_0

In Abbildung 61 ist das Anfahrverhalten der Anlage bei Betrieb mit der fünfstufigen (grün) und der stufenlosen Regelung (rot) dargestellt. Im oberen Diagramm ist die Ausbringung der dem Transporteur T_0 vorgeschalteten Maschine M_0 über die Zeit aufgetragen. Im unteren Diagramm ist die Füllung des Transporteurs $T_0.B$ über die Zeit dargestellt. Auf die Darstellung der Ausbringung des nachgeschalteten Zentralaggregats (M_1) wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Es wird nicht geregelt und erhält nur in Abhängigkeit des Belegungszustands des letzten Transporteurmoduls $T_0.TM_2$ eine Freigabe oder bekommt diese entzogen.

Zu sehen ist, wie sowohl die stufenlose als auch die fünfstufige Regelung die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine auf die Einstellausbringung setzen. Diese Ausbringung wird im Fall der fünfstufigen Regelung beibehalten, bis der Stauschalter Stau_2 belegt ist (siehe Abbildung 20). Nach Ablauf einer Schaltverzögerung von drei Sekunden wird daraufhin die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine vom 1,3-fachen der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine auf das 1,15-fache reduziert. Ist schließlich der Stauschalter Stau_3 belegt, wird wiederum nach einer drei Sekunden dauernden Verzögerungszeit die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine angepasst. In diesem Fall wird sie auf die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine reduziert. Die Füllung des Transporteurs wird dann gehalten, bis durch eine Störung des Systems erneut eingegriffen werden muss.

Die stufenlose Regelung passt die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine kontinuierlich an, indem die Füllung des Transporteurs mit der Sollfüllung verglichen wird und so der Füllungsgrad ($B_{set}/B(t)$), der als Regelgröße dient, errechnet wird. Zu Beginn des Anfahrens der Sollfüllung wird die vorgeschaltete Maschine allerdings noch mit ihrer Einstellausbringung betrieben. Erst nach Überschreiten einer kritischen Füllung beginnt die Maschine M_0 herunter zu regeln und die Einstellausbringung der Maschine M_1 kontinuierlich anzufahren.

Die Geschwindigkeiten der Transporteure werden entsprechend den oben vorgestellten Algorithmen an die Ausbringung der vor- und nachgeschalteten Maschine angepasst.

Die Anpassung der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine wirkt sich auf das Füllungsverhalten des Transporteurs aus. Dies ist im unteren der beiden Diagramme in Abbildung 61 zu erkennen. Im Fall der fünfstufigen Regelung dauert es etwas länger, bis die nachgeschaltete Maschine anläuft, was sich in einer etwas höheren Füllung zu Beginn des Vollfahrvorgangs äußert. Anschließend sind die einzelnen Stufen der Einstellung der Ausbringung im Anstieg der Füllung mit der Zeit zu erkennen. Mit jeder Reduzierung der Ausbringung reduziert sich auch die Steigung der Geraden. Im Fall der stufenlosen Regelung ist nur eine abrupte Änderung der Steigung zu erkennen. Dies ist der Zeitpunkt, zu dem die nachgeschaltete Maschine anläuft. Der übrige Teil der Funktion nähert sich exponentiell an

die Sollfüllung an. Die Sollfüllung des Transporteurs wird schließlich von der fünfstufigen Regelung schneller erreicht, als von der stufenlosen Regelung¹.

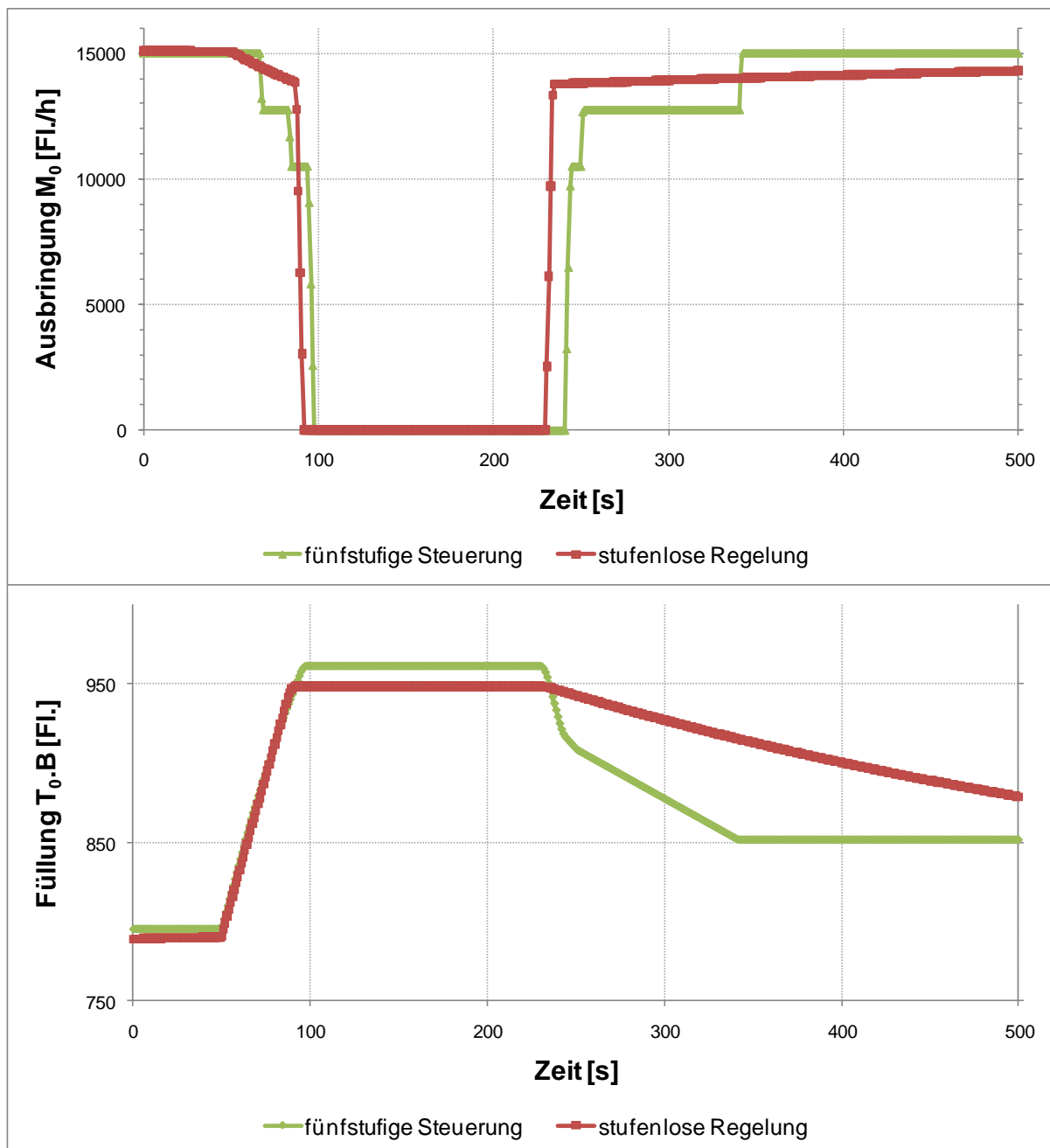


Abbildung 62: Verhalten der fünfstufigen und der stufenlosen Regelung bei einer Störung der nachgeschalteten Maschine M_1 . Oben: Ausbringung der Maschine M_0 in Abhängigkeit der Füllung des Transporteurs Unten: Füllung des Transporteurs T_0

In Abbildung 62 ist das Verhalten der vorgeschalteten Maschine und die Füllung des Transporteurs bei einer Störung der nachgeschalteten Maschine dargestellt. Das System befindet sich bei Versuchsbeginn im Sollzustand. Nach 50 s beginnt die Störung der

¹ Theoretisch wird die Sollfüllung nie erreicht, allerdings kann man ab einer Abweichung von wenigen Flaschen von einem Erreichen der Sollfüllung sprechen.

nachgeschalteten Maschine. Diese dauert 180 s. In den Diagrammen ist wiederum das Verhalten sowohl der fünfstufigen als auch der stufenlosen Regelung dargestellt. Im Fall der fünfstufigen Regelung ist zu erkennen, wie die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine in zwei Stufen reduziert wird, bevor diese schließlich komplett gestoppt wird. Die zeitliche Abstufung ist hier deutlich geringer, da der Transporteur zu Versuchsbeginn bereits sehr stark gefüllt ist. Die Stauschalter Stau_4, Stau_5 und Stau_6 sind daher auf einer kurzen verbleibenden Transportstrecke verbaut. Sie schalten die Geschwindigkeitsabstufungen 0,85-fache und 0,7-fache der Einstellausbringung der nachgeschalteten Maschine bzw. im Fall des Stauschalters Stau_6 den Stillstand der vorgeschalteten Maschine. Nach Wiederanlauf der nachgeschalteten Maschine erhält die vorgeschaltete Maschine eine Freigabe, sobald der Stauschalter Stau_6 nicht mehr belegt und eine Verzögerungszeit von drei Sekunden abgelaufen ist. Genauso wird bei der Einstellung der beiden weiteren Geschwindigkeitsstufen (0,85 und 1) vorgegangen.

Auch die stufenlose Regelung beginnt die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine entsprechend des Füllungsgrades des Transporteurs ($B_{\text{set}}/B(t)$) zu reduzieren, bis diese auf Grund des komplett gefüllten Transporteurs abgeschaltet werden muss. Nach Wiederanlauf der nachgeschalteten Maschine erhält auch die vorgeschaltete Maschine eine Freigabe. Diese wird über die Überwachung des Transporteurauflaufs geschaltet. Die vorgeschaltete Maschine steigert im Anschluss ihre Ausbringung, bis die Sollfüllung des Transporteurs wieder erreicht ist.

4.3.1 Diskussion zu 4.3

In den oben dargestellten exemplarischen Fällen für den Anti-Starve-Puffer werden das Verhalten und die Unterschiede zwischen stauschalterbasierter und der neuen stufenlosen Regelung deutlich. Die stufenlose Regelung ist hierbei in der Lage, auf Abweichungen vom Sollzustand deutlich flexibler zu reagieren. Dies äußert sich zum einen in der stufenlosen Anpassung der Ausbringung der Maschinen und damit auch der Geschwindigkeiten der Transporteure. Zum anderen kann, wie in Kapitel 3.3 beschrieben und in Kapitel 4.2.1 kurz dargestellt, flexibel auf besondere Ereignisse - wie das Auftreten von Lücken - reagiert werden.

Zusammenfassend kann man somit sagen, dass die stufenlose Regelung deutlich bessere Anpassungsmöglichkeiten an vom Sollzustand abweichende Situationen bietet. Welche Auswirkung dies auf die Effizienz der Anlage und die Lärmemission der Transporteure hat, wird in den folgenden Kapiteln dargestellt.

4.4 Effizienzbetrachtung der Regelungskonzepte

Im folgenden Kapitel wird die Auswirkung der Regelungskonzepte auf die Anlageneffizienz untersucht. Dazu wird das in Kapitel 3.6.4 aufgebaute Simulationsmodell genutzt, das einen Ausschnitt aus einer Abfüllanlage darstellt. In erster Linie sollen verschiedene Einflussfaktoren, wie das Störzeitverhalten der Maschinen, die Größe der Transporteure und unterschiedliche Einstellausbringungen der dem Zentralaggregat vor- und nachgeschalteten Maschinen auf die Anlageneffizienz, untersucht werden. Zum Einsatz kommen dazu zwei stauschalterbasierte Regelungskonzepte. Zum einen handelt es sich dabei um die auf vier Stauschaltern basierende dreistufige Regelung, die in Kapitel 3.6.4 erläutert wird. Sie stellt das Referenzmodell dar. Zum anderen kommt die in Kapitel 3.2 vorgestellte, auf sechs Stauschaltern basierende, fünfstufige Regelung zum Einsatz. Diese Regelung steht stellvertretend für die in vielen Anlagen eingesetzte Regelung für Maschinen und Transporteure. Diesen beiden stauschalterbasierten Regelungskonzepten wird die in der Arbeit entwickelte stufenlose Regelung (siehe Kapitel 3.3) gegenübergestellt.

4.4.1 Störzeitverhalten der Maschinen

Das Störzeitverhalten der Maschinen hat entscheidenden Einfluss auf die Effizienz der Anlage. Um den Einfluss der verschiedenen Faktoren untersuchen zu können, wurden diese in den einzelnen Versuchsläufen getrennt betrachtet. Das bedeutet, dass jeweils nur eine der drei Maschinen gestört wurde. Die beiden übrigen Maschinen wurden ohne Störungen betrieben. Sämtliche Effizienzverluste sind somit auf die jeweils betrachtete Maschine zurückzuführen. Außerdem wurde auf eine Störung des Zentralaggregats (M_1) komplett verzichtet, da ein Stillstand unmittelbar zu Effizienzverlusten führen würde und kein Einfluss der Regelungsstrategie zu erwarten ist.

Die Versuchszeit jedes simulierten Versuchslaufs betrug 604.800 s (7*24 Stunden). Zusätzlich wurden mit jeder Einstellung zehn Versuchsläufe mit jeweils unterschiedlichen Startwerten der Zufallsfunktion durchgeführt. Auf diese Weise wird den auf den Pseudozufallszahlen beruhenden Schwankungen des Ausfallverhaltens der Maschinen und der damit verbundenen Variation der Anlageneffizienz bei den einzelnen Simulationsläufen Rechnung getragen.

4.4.1.1 Variation des Störzeitverhaltens der vorgeschalteten Maschine

In den ersten Versuchsläufen wurde der Einfluss des Störzeitverhaltens der dem Zentralaggregat vorgeschalteten Maschine (M_0) untersucht. Dazu wurden die mittlere Dauer der Störzeit (MTBF) und die mittlere Betriebszeit zwischen den Störungen getrennt voneinander variiert. Der jeweils nicht untersuchte Parameter wurde dazu während der Versuchsläufe konstant gehalten.

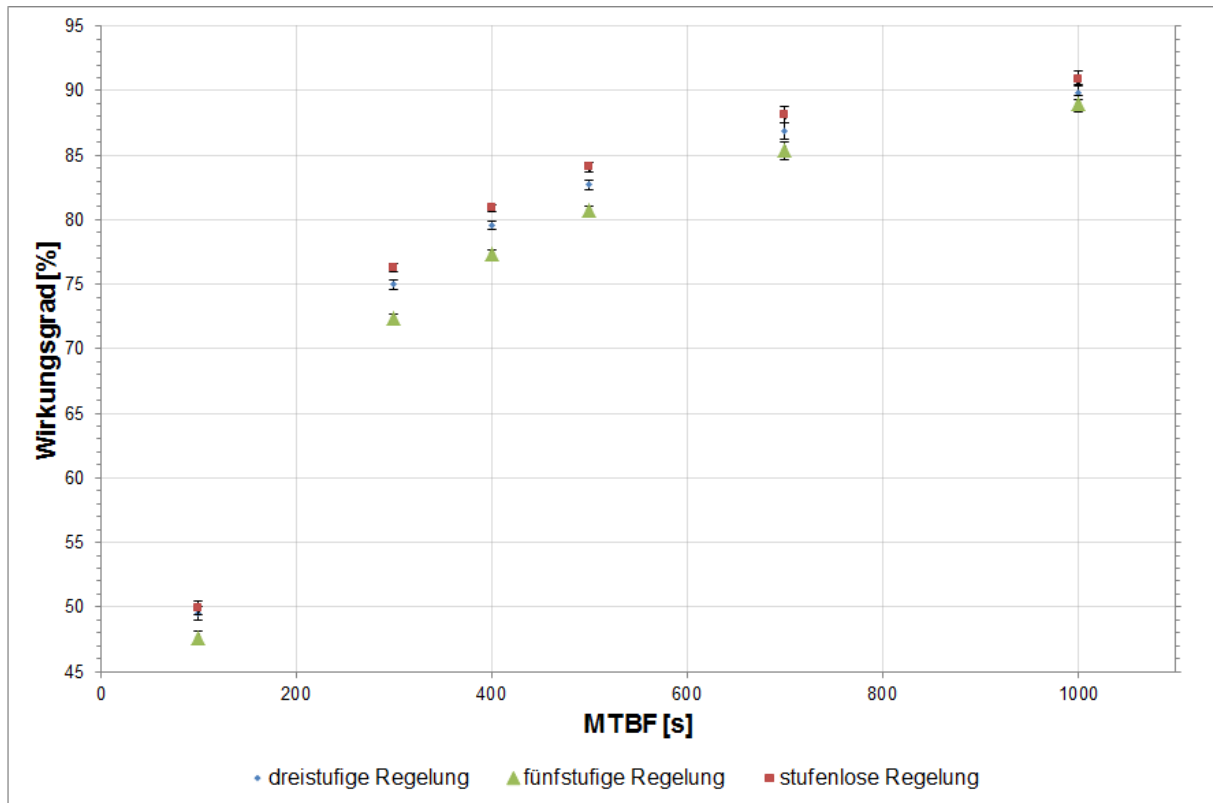


Abbildung 63: Auswirkung der Variation der MTBF der vorgeschalteten Maschine M_0 auf den Wirkungsgrad der Anlage bei den jeweiligen MTBFs und einer MDT von 150 s ($n = 10, \alpha = 0,05$)

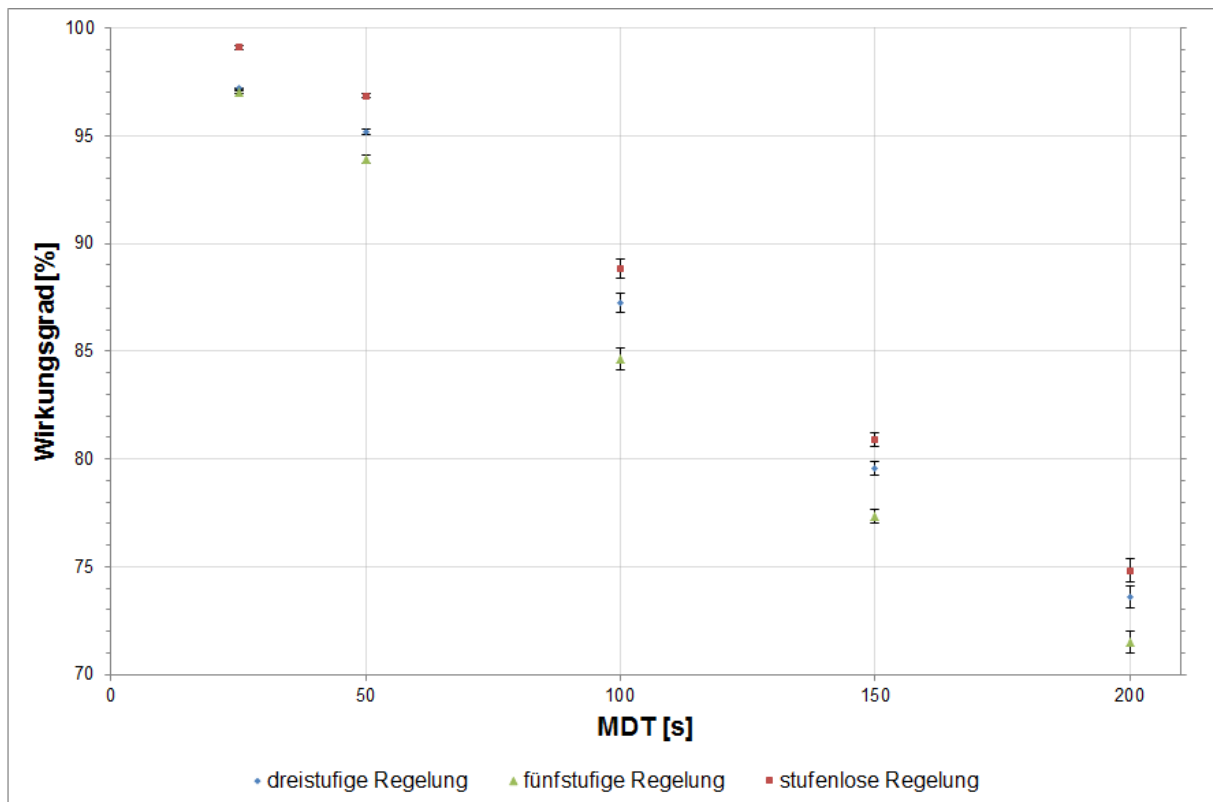


Abbildung 64: Auswirkung der Variation der MDT der vorgeschalteten Maschine M_0 auf den Wirkungsgrad der Anlage bei den jeweiligen MDTs und einer MTBF von 400 s ($n = 10, \alpha = 0,05$)

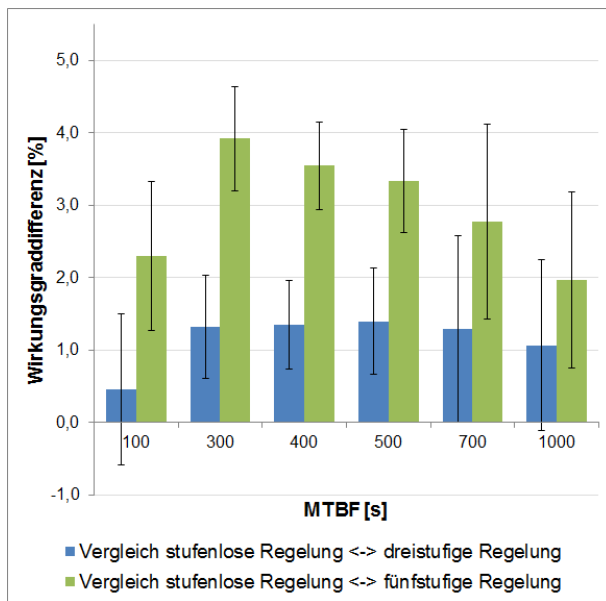


Abbildung 65: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variation der MTBF der Maschine M_0 , bei konstanter MDT von 150 s. ($n = 10$, $\alpha = 0,05$)

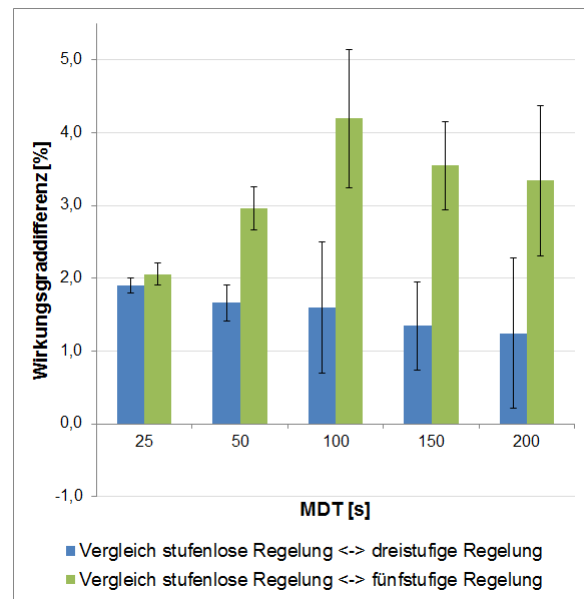


Abbildung 66: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variation der MDT der Maschine M_0 , bei konstanter MTBF von 400 s. ($n = 10$, $\alpha = 0,05$)

In Abbildung 63 ist zu erkennen, wie sich der Wirkungsgrad bei unterschiedlichen MTBFs bei einer konstanten MDT von 150 s verhält. Der Wirkungsgrad nähert sich asymptotisch hundert Prozent an. Die Differenz zwischen stufenloser und den stauschalterbasierten Regelungen ist dabei bei einer MTBF von 300 bis 400 s maximal und nimmt sowohl mit kleineren, als auch mit zunehmenden MTBFs ab (siehe Abbildung 65).

In Abbildung 64 ist der Einfluss auf den Wirkungsgrad der Anlage bei Variation der MDT aufgeführt. Die MTBF wurde konstant bei 400 s gehalten. Bei dieser Versuchskonstellation ist der Zusammenhang zwischen MDT und Wirkungsgrad linear. Mit zunehmender Dauer der Störungsdauer nimmt der Wirkungsgrad ab.

In den Abbildungen 65 und 66 sind zur Verdeutlichung der Differenzen zwischen den Konzepten diese jeweils in Bezug auf die stufenlose Regelung dargestellt. Ausschlaggebend ist hierbei, ob sich zwischen stufenloser Regelung und den stauschalterbasierten Regelungen eine positive oder negative Differenz ergibt. Ist diese negativ, führt die stufenlose Regelung zu einem schlechteren Wirkungsgrad, ist diese positiv, erbringt die stufenlose Regelung einen besseren Wirkungsgrad. Umfasst das Konfidenzintervall den positiven und negativen Wertebereich, ist kein signifikanter Unterschied nachweisbar.

Die Differenz zwischen stufenloser Regelung und dreistufiger Regelung ist bei den kurzen MDTs besonders groß und nimmt mit zunehmender Länge der mittleren Störzeit ab. Wie in Abbildung 66 zu erkennen ist, ist ab einer MDT von 200 s nahezu kein Unterschied mehr zwischen den beiden Konzepten zu erkennen. Wie bereits bei der Variation der MTBF ist auch bei der Variation der MDT die Differenz zwischen dreistufiger und stufenloser Regelung

größer als jener zwischen fünfstufiger und stufenloser Regelung. Die maximale Differenz ergibt sich hier bei einer MDT von 100 s

4.4.1.2 Diskussion zu 4.4.1.1

Zu erkennen ist, dass zunehmende MTBFs einen Anstieg des Wirkungsgrades hervorrufen, unabhängig davon, wie das System betrieben wird. Der asymptotische Verlauf ergibt sich aus der Überlagerung von zwei Effekten. Zum einen nimmt mit höheren MTBFs die störungsfreie Zeit zwischen den Störungen zu und damit die gesamte Störzeit während der Versuchszeit ab, zum anderen hat der Puffer dadurch mehr Zeit sich nach einer Störung zu regenerieren und in seinen Sollzustand zurückzukehren. Die größte Differenz zwischen den drei Regelungskonzepten ergibt sich dabei bei einer MTBF, die im Bereich der „Regenerationszeit“ der stufenlosen Regelung liegt. Dies liegt an zwei Eigenschaften der stufenlosen Regelung. Zum einen können kürzere Störungen, die unterhalb der Pufferzeit liegen, gut ausgeglichen werden, da Lücken im Behälterstrom gezielt geschlossen werden und die nachfolgende Maschine konstant mit Behältern versorgt werden kann. Es wird auf diese Weise die Totzeit des Puffers reduziert. Zum anderen wird die Sollfüllung des Puffers gezielt angefahren. Bei kleinen Abweichungen wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine nur sehr leicht angehoben, bei großen Abweichungen dementsprechend stärker. Für diese Anpassungen fehlen den stauschalterbasierten Regelungen die Daten. Störungen werden erst erkannt, wenn sich der Belegungszustand an den Stauschaltern ändert und damit bereits eine erhebliche Abweichung vom Sollzustand besteht.

Die große Differenz zwischen fünfstufiger und stufenloser Regelung ergibt sich aus der Tatsache, dass die zusätzlichen Stauschalter zur bedarfsgerechten Anpassung der Ausbringung der Maschinen und Geschwindigkeiten der Transporteure zwar eine exaktere Einstellung ermöglichen, aber auch die „Erholungszeit“ der Puffer verlängern. Folgen Störungen kurz hintereinander, ist es wichtig, das System möglichst schnell in den Sollzustand zu versetzen, um möglichst schnell auf die nächste Störung vorbereitet zu sein. Diese Anforderung wird durch die dreistufige Regelung besser erfüllt, da sie auf Abweichungen vom Sollzustand mit einer maximalen Änderung der Maschinenausbringungen und Bändergeschwindigkeiten reagiert. Die stufenlose Regelung reagiert bedarfsgerecht, je nach Situation auf dem Transporteur, und kann auf diese Weise das Niveau der dreistufigen Regelung erreichen und sogar übertreffen.

Die Verkürzung der MDT führt zu höheren Wirkungsgraden. Dabei gilt, je deutlicher die MDT unterhalb der Pufferzeit liegt, desto höher ist der Wirkungsgrad. Der Zusammenhang zwischen MDT und Wirkungsgrad ist hierbei linear. Die Differenz zwischen stufenloser Regelung und dreistufiger Regelung nimmt mit der Zunahme der MDTs ab. Dies liegt an zwei Punkten. Zum einen kann die stufenlose Regelung speziell bei kürzeren Störungen ihre Vorteile umsetzen und durch den gezielten Lückenschluss den Sollzustand des Transporteurs schnell wieder herstellen. Zum anderen kann bei Stillstandszeiten, die oberhalb der Pufferzeit liegen, kein regelungsbasierter Eingriff den für dieses Störzeitverhalten zu klein

dimensionierten Puffer ausgleichen. Die Differenz zwischen fünfstufiger und stufenloser Regelung ist bei einer mittleren Störzeit von 100 s maximal. In diesem Störzeitenbereich fährt die stauschalterbasierte Regelung durch eine Anhebung der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine auf ihre Einstellausbringung den Sollzustand des Transporteurs zwar zunächst schnell an, braucht dann aber relativ lange, bis sie den Sollzustand erreicht hat. Dies liegt in dem langen Zeitraum begründet, in dem die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine zwischen Einstellausbringung des Zentralaggregats und der eigenen Einstellausbringung betrieben wird. In dieser Zeit hat der Puffer noch nicht wieder seine maximale Pufferzeit erreicht und kann somit beim erneuten Auftreten einer Störung diese Zeit nicht überbrücken. Bei längeren Störzeiten wird die Differenz wieder geringer, da Störzeiten, die über die Pufferzeit hinausgehen, erneut nicht abgepuffert werden können. Dies gilt wieder für alle Regelungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die stufenlose Regelung in keinem der getesteten Szenarien schlechtere Wirkungsgrade als die drei- bzw. fünfstufige Regelung erbracht hat. In den meisten Szenarien war sie der dreistufigen und in besonderen Maße der fünfstufigen Regelung deutlich überlegen. Die stufenlose Regelung für Anti-Starve-Puffer kann somit, je nach vorherrschendem Störzeitenverhalten der vorgeschalteten Maschine, den Wirkungsgrad der Anlage signifikant steigern.

4.4.1.3 Variation des Störzeitverhaltens der nachgeschalteten Maschine

Ähnlich wie im Kapitel 4.4.1.1 beschrieben wird in diesem Kapitel das Störzeitverhalten der nachgeschalteten Maschine M_2 variiert. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurden dazu die gleichen Versuchsparameter und Versuchsbedingungen gewählt.

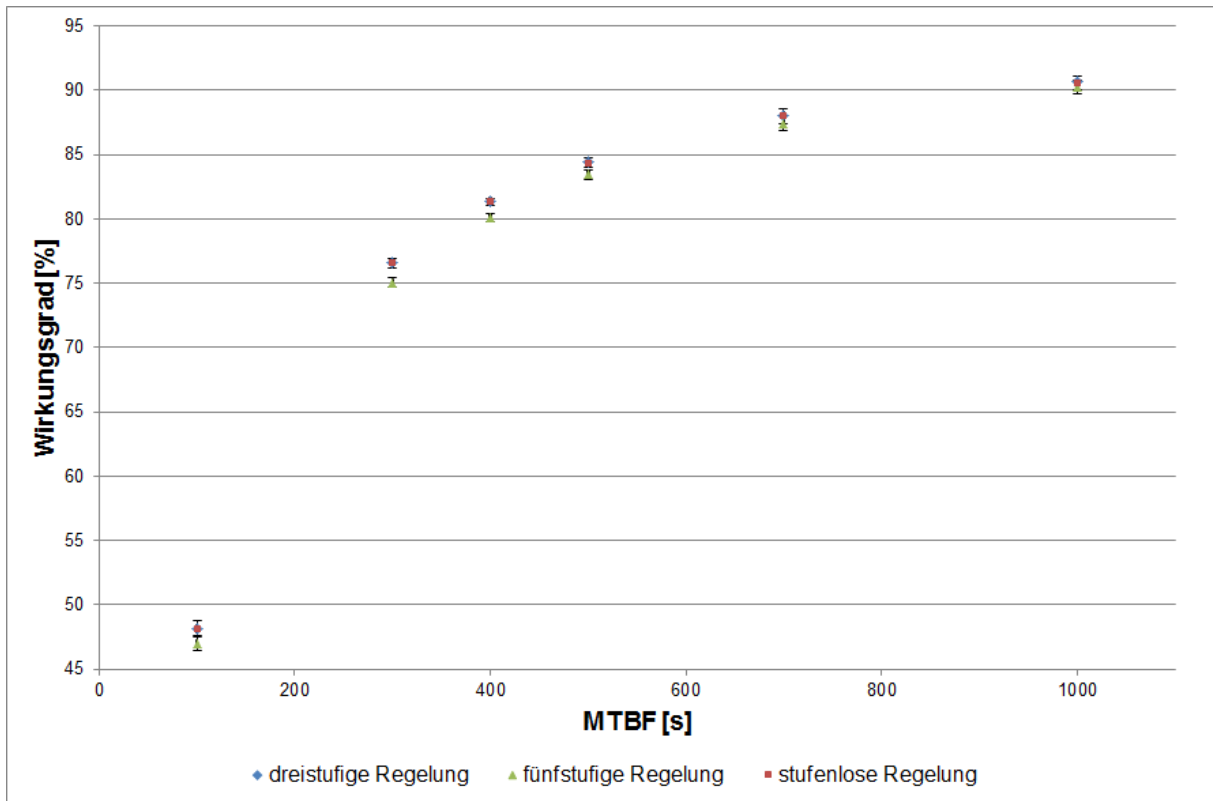


Abbildung 67: Auswirkung der Variation der MTBF der nachgeschalteten Maschine M_2 auf den Wirkungsgrad der Anlage bei den jeweiligen MTBFs und einer MDT von 150 s ($n = 10$, $\alpha = 0,05$)

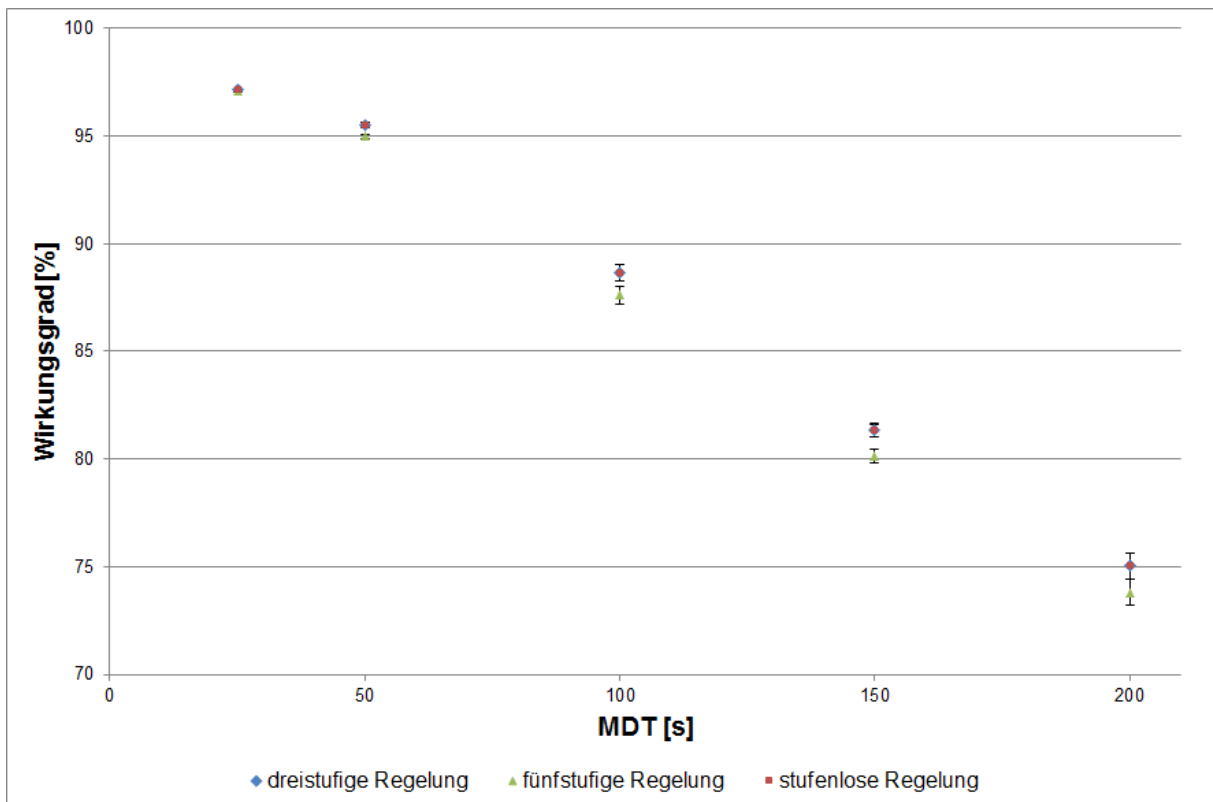


Abbildung 68: Auswirkung der Variation der MDT der nachgeschalteten Maschine M_2 auf den Wirkungsgrad der Anlage bei den jeweiligen MDTs und einer MTBF von 400 s ($n = 10$, $\alpha = 0,05$)

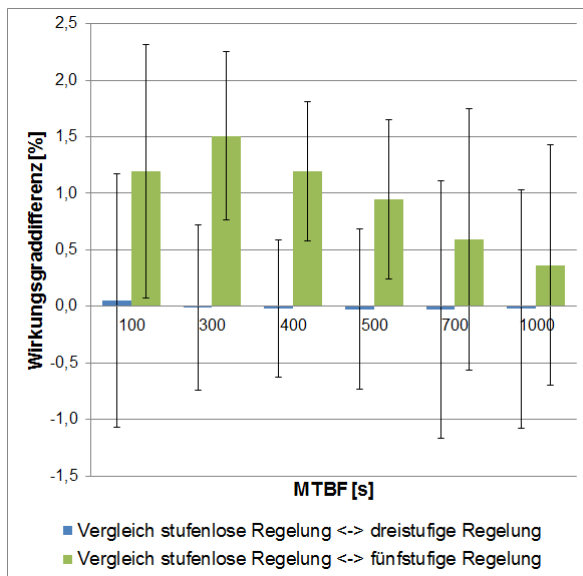


Abbildung 69: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variation der MTBF der Maschine M_2 , bei konstanter MDT von 150 s. ($n = 10$, $\alpha = 0,05$)

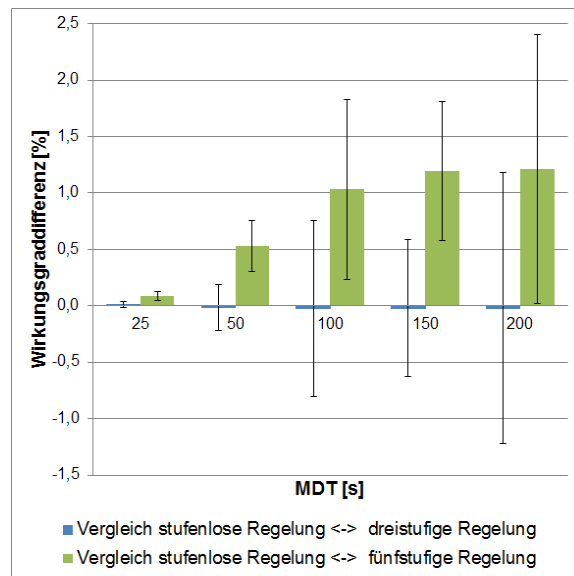


Abbildung 70: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variation der MDT der Maschine M_2 , bei konstanter MTBF von 400 s. ($n = 10$, $\alpha = 0,05$)

In Abbildung 67 ist das Verhalten der Anlage bei Variation der MTBF und konstanter MDT der dem Zentralaggregat nachgeschalteten Maschine M_2 dargestellt. Das Verhalten und die Messwerte ähneln denen der Abbildung 65 aus Kapitel 4.4.1.1. Dies liegt an der gleichen Pufferkonstellation und einer Auslegung auf die gleiche Pufferzeit. Auch in diesem Fall ergibt sich mit zunehmender Dauer der MTBF ein exponentieller Anstieg des Wirkungsgrades der Anlage.

Allerdings sind die in Abbildung 69 dargestellten Differenzen der verschiedenen Regelungskonzepte deutlich geringer oder im Fall des Vergleichs der dreistufigen mit der stufenlosen Regelung über den gesamten Versuchsbereich nicht signifikant. Der Vergleich der fünfstufigen mit der stufenlosen Regelung erbrachte signifikante Unterschiede bei MTBFs von 100 bis 500 s, wobei die deutlichsten Unterschiede im Bereich von 300 bis 400 s auftreten.

In Abbildung 68 ist die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der MDT aufgetragen. Auch dieses Diagramm zeigt den gleichen Verlauf der Werte, wie der Versuch im Kapitel 4.4.1.1 (Abbildung 64). Die Differenzen zwischen dreistufiger und stufenloser Regelung sind in keinem der aufgeführten Punkte signifikant. Die Differenzen zwischen fünfstufiger und stufenloser Regelung weisen zwar in allen Punkten signifikante Unterschiede auf (siehe Abbildung 70), allerdings sind die Differenzen zwischen den Wirkungsgraden mit einem Maximum von 0,58 % (MDT = 150 s) deutlich geringer, als jene der Anti-Starve-Puffer (siehe Abbildung 66).

4.4.1.4 Diskussion zu 4.4.1.3

Das Verhalten der Anlage bei Rückstau durch die nachgeschaltete(n) Maschine(n) entspricht dem im Kapitel 4.4.1.2 diskutierten und erläuterten Verhalten der Anlage bei Mangel durch die vorgeschaltete(n) Maschine(n). In beiden Fällen führt eine Erhöhung der MTBF zu einem exponentiellen Anstieg des Wirkungsgrades der Anlage, der asymptotisch gegen 100 % strebt. Eine Zunahme der MDT führt im untersuchten Bereich zu einer linearen Abnahme des Wirkungsgrades. Der entscheidende Unterschied, der sich ergibt, ist die Möglichkeit, Teile dieses Anlagenverhaltens durch eine geeignete Regelungsstrategie abzufangen. Bei den dem Zentralaggregat vorgeschalteten Transporteuren und Maschinen funktioniert dies gut. Bei den dem Zentralaggregat nachgeschalteten Maschinen und Transporteuren funktioniert dies, wie in Abbildung 69 und 70 verdeutlicht, nur sehr eingeschränkt. Die Art der Regelung hat nur sehr geringen oder gar keinen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Anlage.

Dies ist auf systembedingte Ursachen zurückzuführen. Ein Hauptvorteil der stufenlosen Regelung liegt in der Möglichkeit begründet, Lücken im Behälterfluss durch das Erhöhen der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine und der Transporteurgeschwindigkeiten zuzufahren. Im Bereich der Anti-Block-Puffer ist dies nicht sinnvoll, da es sich bei der vorgeschalteten Maschine um den Master des Systems handelt, den es möglichst lange und gleichmäßig am Laufen zu halten gilt. Somit bietet die stufenlose Regelung in Bezug auf den Anlagenwirkungsgrad nur den Vorteil einer exakten Nachregelung der nachgeschalteten Maschine. Dies bringt im Vergleich zur fünfstufigen Regelung nur geringe Vorteile in Bezug auf den Wirkungsgrad. Im Vergleich zwischen dreistufiger und stufenloser Regelung sind keine signifikanten Unterschiede nachweisbar.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die stufenlose Regelung im Bereich der Anti-Block-Puffer in Bezug auf den Wirkungsgrad der Anlage keine nennenswerten Vorteile gegenüber der stauschalterbasierten Regelung erbringt.

4.4.2 Variation der Einstellausbringungen der Maschinen

Ein weiterer wichtiger Faktor, den es zu beachten gilt, ist die Überausbringung der dem Zentralaggregat vor- und nachgeschalteten Maschinen. Bei den in der Folge dargestellten Versuchen wurde auf das Ausfallverhalten einer realen Anlage zurückgegriffen. Dabei wurde die Störzeitenverteilung, die von Voigt [159] ermittelt wurde, zu Grunde gelegt.

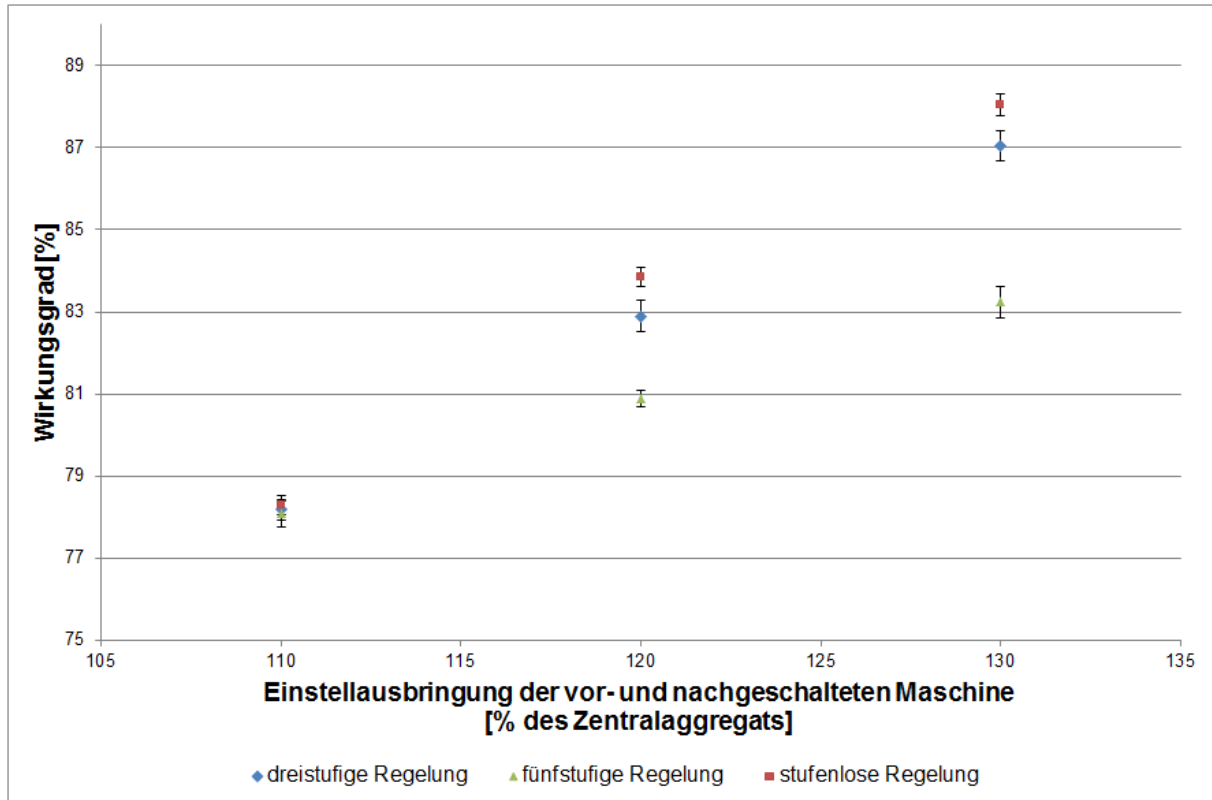


Abbildung 71: Auswirkung der Variation der Einstellausbringung der dem Zentralaggregat vor- bzw. nachgeschalteten Maschinen. (n = 10, $\alpha = 0,05$)

Die Überausbringung der dem Zentralaggregat vor- bzw. nachgeschalteten Maschinen ist notwendig, um nach Störungen die Sollfüllung des Puffers wieder herzustellen (siehe Kapitel 2.1.3.3). Dabei gilt: Je größer die Überausbringung der Maschinen, desto schneller kann die Sollfüllung wieder angefahren werden.

Dies ist auch in Abbildung 71 zu sehen: In den Versuchen wurde die Überausbringung der Maschinen M_0 und M_2 bezogen auf das Zentralaggregat M_1 auf 110, 120 und 130 % gesetzt. Mit der Erhöhung der Ausbringung erhöht sich bei dem gewählten Anlagenmodell der Wirkungsgrad mit jeder Erhöhung der Überausbringung signifikant.

Die Differenz zwischen der stufenlosen Regelung und der dreistufigen sowie zwischen der stufenlosen Regelung und der fünfstufigen Regelung ist in Abbildung 72 dargestellt. Hierbei stiegen bei beiden Vergleichen die Differenzen mit zunehmender

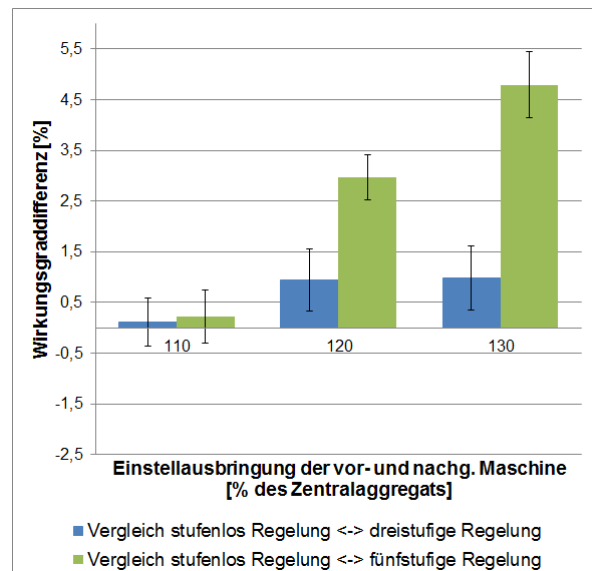


Abbildung 72: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung. Variiert wurde die Einstellausbringung der vor- und nachgeschalteten Maschinen. (n = 10, $\alpha = 0,05$)

Überausbringung. Bei einer Überausbringung von 110 % ist hingegen kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Konzepten feststellbar.

4.4.3 Diskussion zu 4.4.2

Die Überausbringung wirkt sich in dem dargestellten Fall stark auf den Wirkungsgrad aus. Dabei ist bei den drei getesteten Konzepten jeweils ein linearer Anstieg des Wirkungsgrades mit zunehmender Einstellausbringung festzustellen. Allerdings unterscheidet sich die Steigung der Geraden. So sind bei 110 % Überausbringung noch keine signifikanten Differenzen feststellbar. In diesem Bereich profitiert die stufenlose Regelung noch nicht stark genug von dem Vorteil, Lücken im Behälterstrom zufahren zu können und die Ausbringung der Maschinen bedarfsgerechter anpassen zu können. Die Geschwindigkeit der Bänder kann in diesem Fall ebenfalls nur auf 110 % des Ausgangswertes erhöht werden, um keine Lücken in den einlaufenden Behälterpulk zu fahren. Bei den beiden höheren Stufen der Überausbringung hingegen kann die Bändergeschwindigkeit deutlicher erhöht werden und so einer der Vorteile der stufenlosen Regelung genutzt werden. Lücken können schneller geschlossen werden, wie im Fall der 110prozentigen Überausbringung. Darüber hinaus ist der gesamte Regelungsspielraum bei den geringeren Ausbringungen niedriger, so dass auch die Anpassungsmöglichkeiten der stufenlosen Regelung geringer ausfallen.

4.4.4 Variation der Pufferdimensionen

Als letzter zu variierender Parameter, der potentiell Einfluss auf die Effizienz der Regelung haben kann, soll hier die Pufferdimensionierung experimentell überprüft werden. Als zu Grunde liegendes Störzeitverhalten der Maschinen wird wiederum das von Voigt ermittelte Störzeitverhalten verwendet.

Bei diesen Versuchen wurde das Längen-Seiten-Verhältnis der Pufferstrecken verändert. Als Referenz, die in Abbildung 73 mit 100 % bezeichnet wird, gilt die bereits in den zuvor beschriebenen Versuchen genutzte Teststrecke. Diese entspricht den Dimensionen des Versuchsrundläufers (Abbildung 43). Die übrigen Versuche wurden mit Versuchsstrecken mit 70 % bzw. 130 % der Länge der Standardstrecke durchgeführt. Um die Kapazität der Strecken aber konstant zu halten, wurde die 70 %-Strecke breiter und die 130 %-Strecke schmaler dimensioniert als die Standardstrecke. Die Kapazität aller Versuchsstrecken blieb somit gleich.

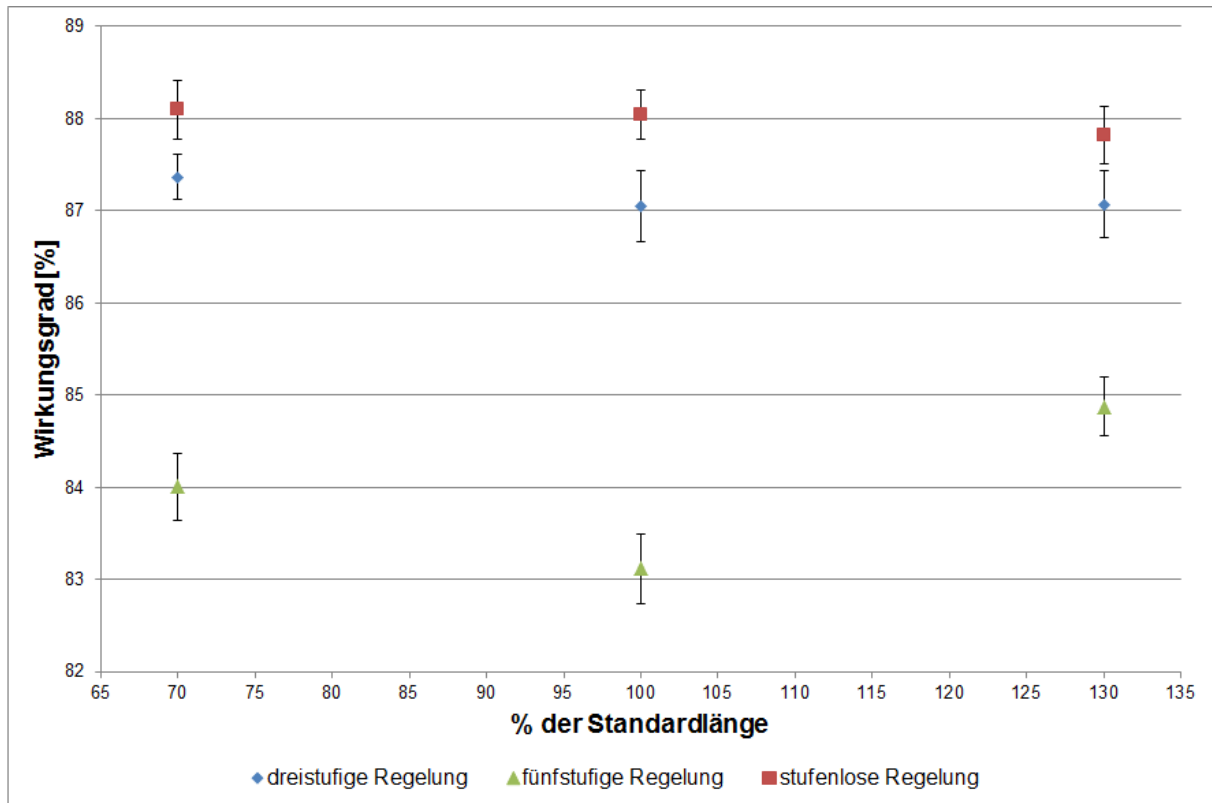


Abbildung 73: Auswirkung der Variation der Dimensionierung der Versuchsstrecken bei konstanter Kapazität. (n = 10, $\alpha = 0,05$)

In Abbildung 72 ist die Auswirkung der Änderung der Standardlänge auf die Anlageneffizienz in Abhängigkeit des eingesetzten Regelungskonzepts dargestellt. Wie zu erkennen ist, variieren die Konzepte nur geringfügig mit der Änderung der Länge des Transporteurs. Dies ist auch in Abbildung 74 zu erkennen, in der die Differenzen zwischen der stufenlosen Regelung und der dreistufigen sowie zwischen der stufenlosen Regelung und der fünfstufigen Regelung dargestellt sind.

4.4.5 Diskussion zu 4.4.4

Die Differenzen, die sich durch die hier gewählten Variationen der Pufferlängen ergeben, sind zu vernachlässigen. Dies liegt an der mit 30 % relativ geringen Veränderung der Längen der einzelnen Module. Die Längenänderung führt zu einer Verkürzung bzw. Verlängerung der 35 s dauernden Puffertotzeit von neun Sekunden. Dieser Zeitraum fällt bei dem gewählten Störzeitverhalten der Maschinen (siehe Anhang) und einer Pufferzeit von ca. 157 s (vorgeschalteter Puffer) und 133 s (nachgeschalteter Puffer) nicht ins Gewicht. Bei einer

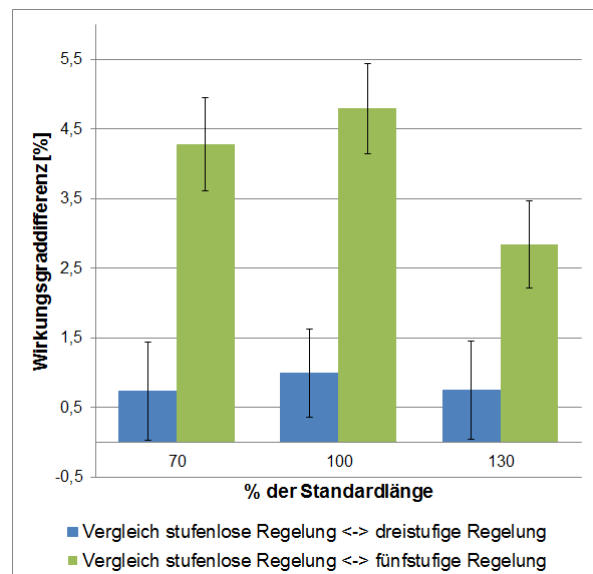


Abbildung 74: Differenzen der Wirkungsgrade zwischen stufenloser und dreistufiger sowie zwischen stufenloser und fünfstufiger Regelung bei Variation der Länge der Versuchsstrecken. (n = 10, $\alpha = 0,05$)

Reduzierung der Pufferkapazität bzw. bei einer deutlicheren Veränderung der Pufferdimensionen (z. B. Verdopplung/Halbierung der Länge) wäre durch die ungünstige Gestaltung der Puffer ein Vorteil zu Gunsten der stufenlosen Regelung zu erwarten. Allerdings wurde auf die Simulation dieser extremen Abmessungen verzichtet, da sie in der Praxis keine Rolle spielen.

4.5 Auswirkungen des Regelungskonzepts auf die Schallemission der Versuchsanlage im realen Betrieb

Neben dem Erhalt oder der Verbesserung der Anlageneffizienz stand die Reduktion des Schalldruckpegels bei der Entwicklung der stufenlosen Regelung im Vordergrund. Diese soll durch die Reduktion der Differenzgeschwindigkeiten der Behälter beim Zusammenstoß erreicht werden. Zur Bestimmung der Schallemissionen der stufenlosen Regelung wurde diese an der im Kapitel 3.5 beschriebenen Versuchsanlage umgesetzt. Zum Vergleich mit dem heutigen Stand der Technik diente die in Kapitel 3.2 vorgestellte fünfstufige stauschalterbasierte Regelung.

In den Versuchsreihen wurden die Schallemissionen der Versuchsanlage bei Auftreten der drei Fälle störungsfreier Betrieb, Störung der nachgeschalteten Maschine und Störung der vorgeschalteten Maschine gemessen. Alle Messungen erfolgten dabei im Anti-Starve-Betrieb der Transportstrecke.

Zur ortsgenauen Bestimmung der Schalldruckpegel wurden dazu die in Abbildung 75 dargestellten Messpunkte definiert. Diese befinden sich an den Überschüben der Transporteure (Messpunkte 1, 2 und 5) sowie im Bereich, in dem sich das aufgestaute Pulkende während der Versuche bewegt (Messpunkte 3 und 4). Die Messpunkte wurden in die Bereiche gelegt, an denen die größten Schallemissionen zu erwarten waren. An den Überschüben kommt es zum einen durch das Umformieren des Flaschenpulks durch die Geländerführungen, zum anderen durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, mit denen die Transporteure betrieben werden, zu erhöhten Lärmemissionen. Im Bereich des Pulkendes ist mit Lärmemissionen zu rechnen, da sich der Behälterpulk langsamer bewegt, als die im freien Transport befindlichen Behälter. Neben den fünf ortsfesten Messungen wurde ein Messpfad zur Bestimmung der Schalldruckpegel im Bereich des Pulkendes angelegt. Auf diesem wurde das Schallpegelmessgerät parallel zur Versuchstrecke im Bereich des Pulkendes bewegt. Auf diese Weise konnte speziell der vom Pulkende ausgehende Schalldruck erfasst werden.

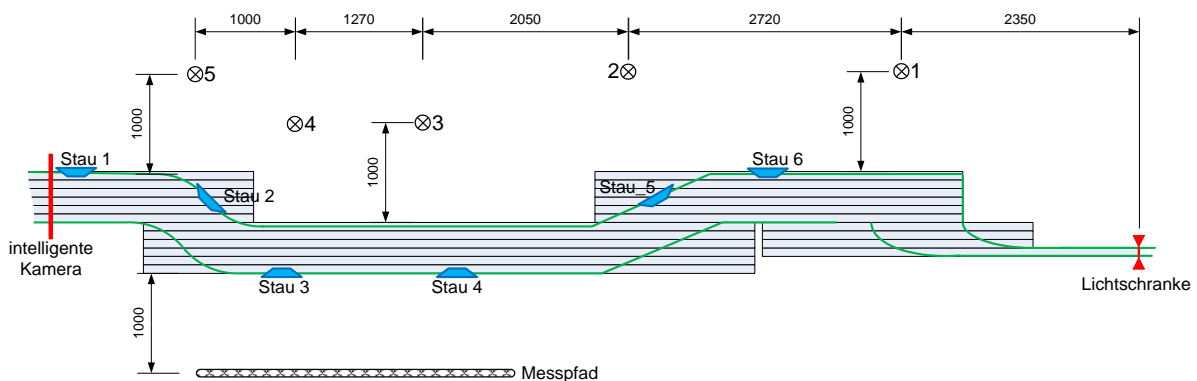


Abbildung 75: Darstellung der Versuchstrecke mit verwendeten Sensoren. Zusätzlich sind die Messpunkte 1 bis 5 eingezeichnet und der Messpfad zur Bestimmung des Schalldruckpegels am Pulkende.

Sämtliche Versuche wurden auf Basis der in DIN EN ISO 11200 vorgeschriebenen Messbedingungen durchgeführt. Zur Bestimmung der Impulshaltigkeit der Lärmemissionen wurden die Messungen sowohl in der Messeinstellung „Fast“, als auch „Impuls“ durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messungen bei den unterschiedlichen Betriebszuständen der Anlage sind in Abbildung 76 bis Abbildung 78 dargestellt. Im linken Diagramm sind jeweils die Messwerte in der Einstellung „Fast“ des Messgerätes dargestellt. Dies ist die Standardeinstellung, mit der die meisten Schallmessungen zur Beurteilung des Schalldruckpegels in der Praxis erfolgen (siehe [35]). Das rechte Diagramm stellt die Messungen mit der Messeinstellung „Impuls“ dar, die insbesondere die Impulshaltigkeit von Schallereignissen berücksichtigt (für genauere Erläuterung der Messgeräteeinstellungen siehe Kapitel 2.2.2). Auf der vertikalen Achse der Diagramme ist der Schalldruckpegel in der Einheit dB(A) aufgetragen. Auf der horizontalen Achse sind die Nummern der Messpunkte, die der Nummerierung in Abbildung 75 entsprechen, aufgetragen. Zu jedem Messpunkt wurden sowohl Schallmessungen der fünfstufigen als auch der stufenlosen Regelung durchgeführt. Auf die Vermessung der deutlich lautereren dreistufigen Regelung wurde verzichtet. Die Darstellung basiert auf einer fünffachen Bestimmung im Fall der Einstellung „Fast“ und auf einer dreifachen Bestimmung bei der Einstellung „Impuls“. Alle Werte sind mit einem Konfidenzintervall versehen, das auf Basis eines Vertrauensniveaus von 0,95 berechnet wurde.

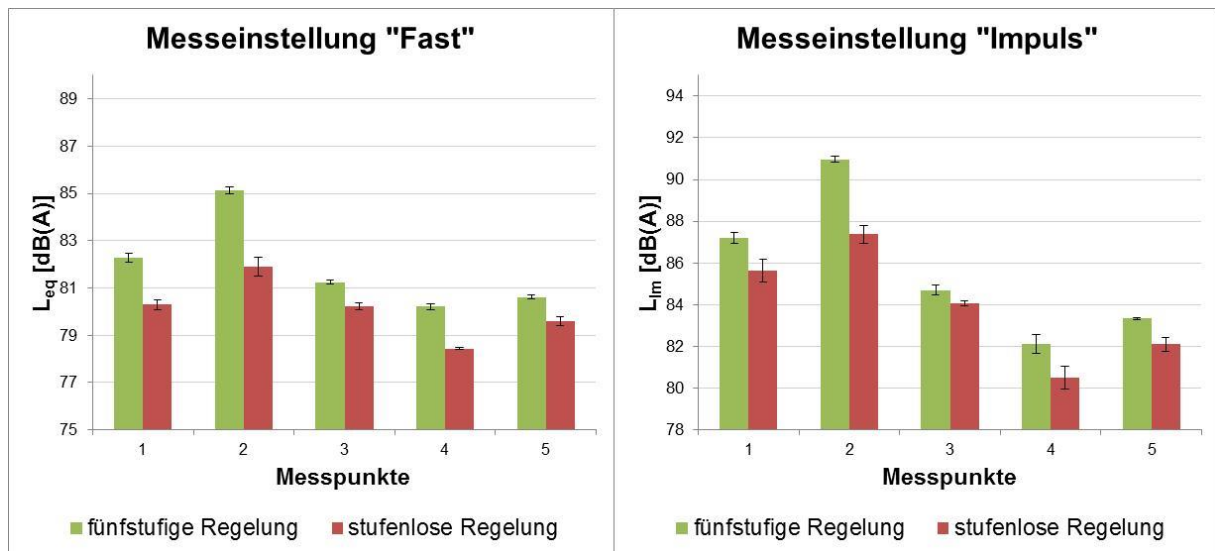


Abbildung 76: Schalldruckpegel, basierend auf den Messungen während des störungsfreien Betriebs der Versuchsanlage. Der Sollzustand des Systems ist erreicht und wird von der stufenlosen bzw. der fünfstufigen Regelung gehalten. (linkes Diagramm: $n = 5$; $\alpha = 0,05$), (rechtes Diagramm: $n = 3$; $\alpha = 0,05$)

In Abbildung 76 ist der Schalldruckpegel an den fünf Messpunkten bei störungsfreiem Betrieb der Anlage dargestellt. Das bedeutet, dass die Sollfüllung von 500 Flaschen angefahren wurde und konstant gehalten wird. Jede der Messungen erfolgt über 60 Sekunden, so dass leichte Schwankungen während der Messung ausgeglichen werden. Wie in dem linken Diagramm zu sehen ist, kommt es in jedem der Messpunkte zu einer Reduzierung des

Schalldruckpegels bei Einsatz der stufenlosen Regelung. Die größte Differenz ergibt sich dabei an den Messpunkten 1 ($\Delta L_{eq} = 1,98 \text{ dB(A)} \pm 0,41 \text{ dB(A)}$), 2 ($\Delta L_{eq} = 3,22 \text{ dB(A)} \pm 0,59 \text{ dB(A)}$) und 4 ($\Delta L_{eq} = 1,78 \text{ dB(A)} \pm 0,17 \text{ dB(A)}$). Das aufgestaute Pulkende liegt bei diesen Versuchen im Bereich zwischen den Messpunkten 3 und 4.

Auch die Impulshaltigkeit der Lärmemissionen konnte signifikant reduziert werden. Besonders stark ist die Abnahme hierbei am Messpunkt 2 ($\Delta L_{im} = 3,60 \text{ dB(A)} \pm 0,58 \text{ dB(A)}$).

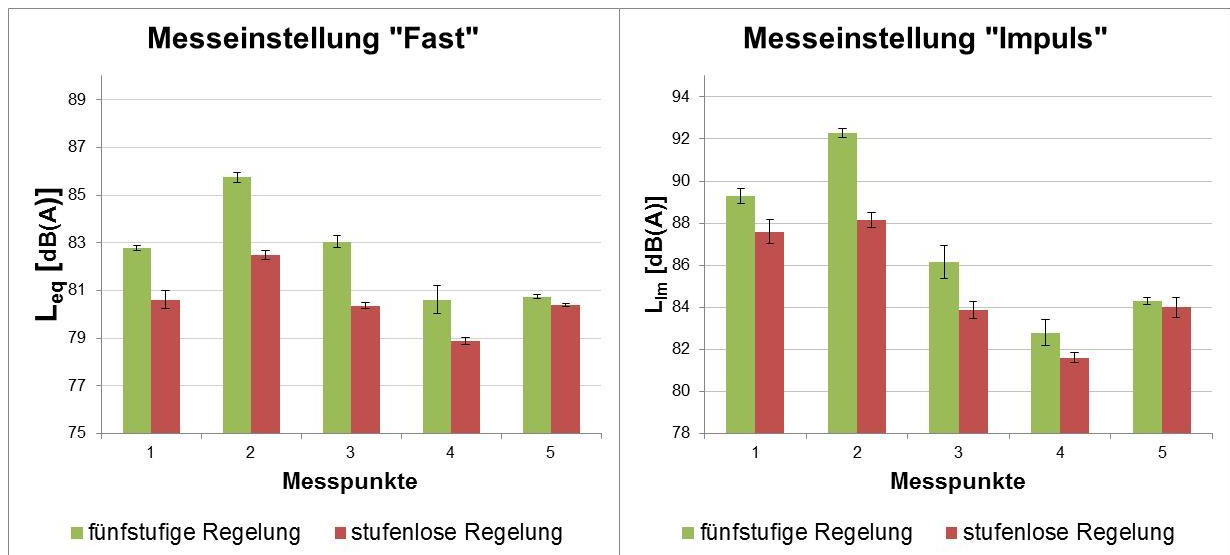


Abbildung 77: Schalldruckpegel, basierend auf den Messungen nach einer 30 s dauernden Störung der nachgeschalteten Maschine. Das System befindet sich nicht im Sollzustand. Dieser wird von der stufenlosen bzw. der fünfstufigen Regelung während der Versuchsdauer angefahren. (linkes Diagramm: $n = 5$; $\alpha = 0,05$), (rechtes Diagramm: $n = 3$; $\alpha = 0,05$)

In den Diagrammen der Abbildung 77 ist die Schallemission der Transportstrecke nach einer 30 s dauernden Störung der nachgeschalteten Maschine dargestellt. Die Schallmessung beginnt bei den dargestellten Versuchsläufen in dem Moment, in dem die nachgeschaltete Maschine wieder anläuft und dauert 150 s. Nach dieser Zeitspanne ist das System in den Sollzustand zurückgekehrt.

In jedem der fünf Messpunkte konnte der Transporteur mit Hilfe der stufenlosen Regelung signifikant leiser betrieben werden als mit der fünfstufigen Regelung. Die größten Differenzen des L_{eq} ergaben sich bei diesem Versuch an den Messpunkten 1 ($\Delta L_{eq} = 2,16 \text{ dB(A)} \pm 0,51 \text{ dB(A)}$), 2 ($\Delta L_{eq} = 3,26 \text{ dB(A)} \pm 0,38 \text{ dB(A)}$), und 3 ($\Delta L_{eq} = 2,68 \text{ dB(A)} \pm 0,37 \text{ dB(A)}$) sowie in geringerem Maße an dem Messpunkt 4 ($\Delta L_{eq} = 1,74 \text{ dB(A)} \pm 0,73 \text{ dB(A)}$). Der Schalldruckpegel am Messpunkt 5 ($\Delta L_{eq} = 0,36 \text{ dB(A)} \pm 0,16 \text{ dB(A)}$) wird, wie bereits bei dem oben dargestellten Versuch, kaum durch die Art der Regelung beeinflusst. Das aufgestaute Pulkende befindet sich auch bei diesem Versuch im Bereich zwischen den Messpunkten 3 und 4. Am Anfang des Versuchs befindet es sich näher an Messpunkt 3 und wandert dann beim Anfahren der Sollfüllung Richtung Messpunkt 4.

Die Differenz der in der Einstellung „Impuls“ gemessenen Werte ist in allen Messpunkten außer dem Messpunkt 5 signifikant. Die größte Differenz zwischen stufenloser und

fünfstufige Regelung ergibt sich wiederum an Messpunkt 2 ($\Delta L_{Im} = 4,10 \text{ dB(A)} \pm 0,56 \text{ dB(A)}$).

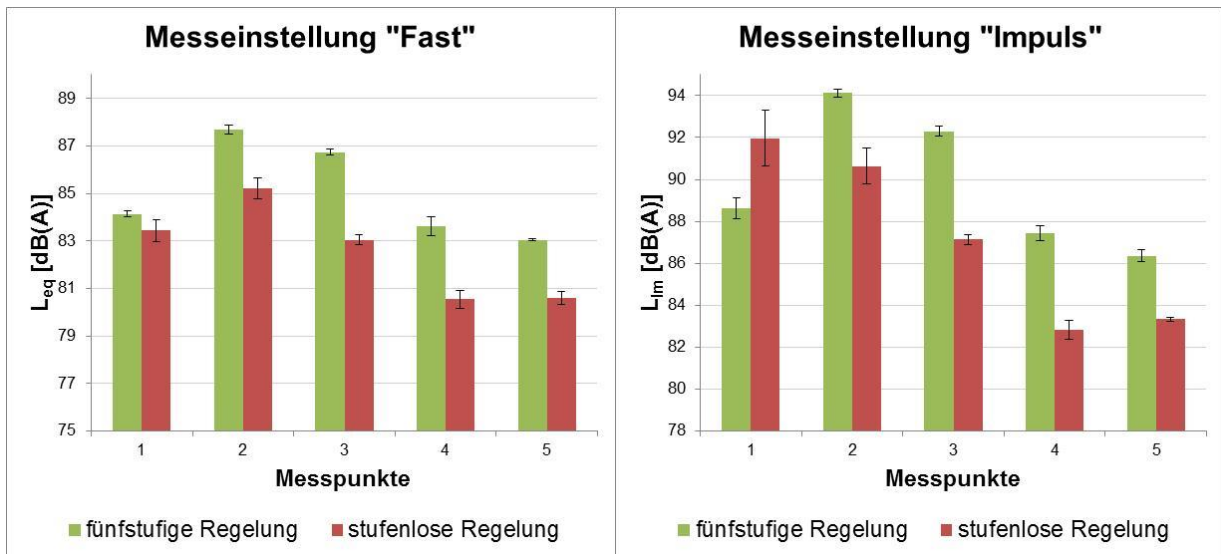


Abbildung 78: Diagramme, basierend auf den Messungen nach einer 30 s dauernden Störung der vorgeschalteten Maschine. Das System befindet sich nicht im Sollzustand. Dieser wird von der stufenlosen bzw. der fünfstufigen Regelung während der Versuchsdauer angefahren. (linkes Diagramm: $n = 5$; $\alpha = 0,05$), (rechtes Diagramm: $n = 3$; $\alpha = 0,05$)

In den Diagrammen der Abbildung 78 sind die Messwerte des dritten Falls, die Schalldruckpegel nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine, dargestellt. Die Störung der vorgeschalteten Maschine dauert 30 s. Jede der Messungen erfolgte über einen Zeitraum von 90 s ab Beginn der Störung. Nach diesem Zeitraum hat die Regelung den Sollzustand des Systems wieder hergestellt.

Die Differenz des Äquivalentsschalldruckpegels L_{eq} ist bei dieser Versuchsreihe an allen Messpunkten signifikant. An den Messpunkten 2 ($\Delta L_{eq} = 2,48 \text{ dB(A)} \pm 0,62 \text{ dB(A)}$), 3 ($\Delta L_{eq} = 3,69 \text{ dB(A)} \pm 0,33 \text{ dB(A)}$), 4 ($\Delta L_{eq} = 3,08 \text{ dB(A)} \pm 0,80 \text{ dB(A)}$) und 5 ($\Delta L_{eq} = 2,44 \text{ dB(A)} \pm 0,31 \text{ dB(A)}$) tritt dabei ein deutlicher Unterschied auf. An diesen Messpunkten ist der Schalldruckpegel der fünfstufigen Regelung um den in Klammern angegebenen Wert höher als jener der stufenlosen Regelung. Am Messpunkt 1 ($\Delta L_{eq} = 0,7 \text{ dB(A)} \pm 0,58 \text{ dB(A)}$) ist nur ein geringer Unterschied messbar.

Bei den Impulsschalldruckpegeln fällt auf, dass die stufenlose Regelung in den Punkten 2 ($\Delta L_{Im} = 3,50 \text{ dB(A)} \pm 1,05 \text{ dB(A)}$), 3 ($\Delta L_{Im} = 5,17 \text{ dB(A)} \pm 0,47 \text{ dB(A)}$), 4 ($\Delta L_{Im} = 4,60 \text{ dB(A)} \pm 0,81 \text{ dB(A)}$) und 5 ($\Delta L_{Im} = 3,04 \text{ dB(A)} \pm 0,39 \text{ dB(A)}$) geringere Impulsschalldruckpegel L_{Im} erzeugt. Jedoch ist der Impulsschalldruckpegel der fünfstufigen Regelung am Messpunkt 1 ($\Delta L_{Im} = -3,34 \text{ dB(A)} \pm 1,84 \text{ dB(A)}$) signifikant niedriger als jener der stufenlosen Regelung.

Tabelle 8: Ergebnisse der Schalldruckpegelmessungen (L_{eq}) im Bereich des Staupunktes des Pulks. Das Schallpegelmessgerät wurde parallel zur Versuchsstrecke auf dem in Abbildung 75 dargestellten Messpfad bewegt. ($n = 5$; $\alpha = 0,05$)

	störungsfreier Betrieb	Lückenschluss nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine	Rückstau nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine
fünfstufige Regelung	83,98 dB(A) ($\pm 0,60$ dB(A))	85,90 dB(A) ($\pm 0,38$ dB(A))	81,52 dB(A) ($\pm 0,84$ dB(A))
stufenlose Regelung	79,24 dB(A) ($\pm 0,12$ dB(A))	80,84 dB(A) ($\pm 0,23$ dB(A))	79,18 dB(A) ($\pm 0,31$ dB(A))
ΔL_{eq}	4,74 dB(A) ($\pm 0,72$ dB(A))	5,06 dB(A) ($\pm 0,61$ dB(A))	2,34 dB(A) ($\pm 1,15$ dB(A))

Tabelle 9: Ergebnisse der Impulsschalldruckpegelmessungen (L_{Im}) im Bereich des Staupunktes des Pulks. Das Schallpegelmessgerät wurde parallel zur Versuchsstrecke auf dem in Abbildung 75 dargestellten Messpfad bewegt. ($n = 3$; $\alpha = 0,05$)

	störungsfreier Betrieb	Lückenschluss nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine	Rückstau nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine
fünfstufige Regelung	89,03 dB(A) ($\pm 0,62$ dB(A))	90,97 dB(A) ($\pm 0,79$ dB(A))	85,93 dB(A) ($\pm 0,43$ dB(A))
stufenlose Regelung	82,67 dB(A) ($\pm 0,56$ dB(A))	84,97 dB(A) ($\pm 0,59$ dB(A))	83,33 dB(A) ($\pm 0,96$ dB(A))
ΔL_{Im}	6,36 dB(A) ($\pm 1,18$ dB(A))	6,00 dB(A) ($\pm 1,38$ dB(A))	2,60 dB(A) ($\pm 1,39$ dB(A))

In den Tabellen 8 und 9 werden die Ergebnisse der Messungen auf dem Messpfad dargestellt. Bei diesen Versuchen wurde das Schallpegelmessgerät parallel zur Versuchsstrecke auf einem Messpfad bewegt. Es wurde so ausgerichtet, dass es sich im Bereich des Staupunktes des Behälterpulses befand. Dadurch wurden die Schallemissionen der auf den aufgestauten Pulk treffenden Flaschen erfasst. Es ist zu erwähnen, dass aus technischen Gründen die Erfassung auf der in Flussrichtung der Behälter gesehen linken Seite des Transporteurs durchgeführt werden musste. Die Messpunkte 1 bis 5 befanden sich aber auf der rechten Seite des Transporteurs. Daher sind die Ergebnisse der beiden Messmethoden nicht direkt miteinander vergleichbar.

In allen Betriebsmodi erreichte die stufenlose Regelung im Vergleich zur fünfstufigen Regelung geringere Schalldruckpegel im Bereich des Staupunktes des Pulks. Dies zeigen die Differenzen der Schalldruckpegel ΔL_{eq} und ΔL_{Im} . Besonders ausgeprägt sind dabei die Unterschiede nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine und im geringeren Maße während des störungsfreien Betriebs.

4.5.1 Diskussion zu 4.5

Im Folgenden werden insbesondere die Ursachen für die unterschiedlichen Schalldruckpegel der beiden Regelungskonzepte erläutert. Jeder der drei oben erwähnten Fälle wird dabei einzeln betrachtet.

Störungsfreier Betrieb: Im störungsfreien Betrieb konnten an den Messpunkten 1, 2 und 4 die Lärmemissionen besonders stark reduziert werden. Die Reduktion an den Punkten 1 und 2 ist auf die bessere Anpassung der Maschinen und Bändergeschwindigkeiten der vorgeschalteten Maschine bzw. der Transportbandabschnitte eins und zwei zurückzuführen. Die stufenlose Regelung kann durch geringfügige Anpassungen Schwankungen in der

Füllung des Transporteurs ausgleichen und jede eingestellte Füllung mit der richtigen Abstimmung der Maschine und Transportbänder betreiben. Die fünfstufige Regelung reagiert mit stärkeren Eingriffen auf Abweichungen, da diese zum Zeitpunkt der Erkennung (durch wechselnde Schaltsignale der Stauschalter) schon ausgeprägter sind. Ein ähnliches Bild zeigt sich im Bereich des Endes des aufgestauten Pulks, das während der Versuche im Bereich des Messpunktes 3 und 4 liegt. Die an dieser Stelle registrierten Reduktionen des Schalldruckpegels sind auf geringere Differenzgeschwindigkeiten zwischen im Pulk geförderten Behältern und den Behältern, die im freien Transport das aufgestaute Pulkende erreichen, zurückzuführen. Auch hier ist eine bessere Anpassung an die aktuelle Füllung als Ursache für die Schalldruckpegelreduktion zu nennen.

Die Reduktion des Impulsschalldruckpegels im Punkt 2 wird durch eine bessere Anpassung der Differenzgeschwindigkeiten am Überschub zwischen dem ersten und zweiten Transportbandabschnitt verursacht. Die Behälter stoßen hier mit geringeren Differenzgeschwindigkeiten zusammen.

Ein weiterer Punkt, der den beiden Diagrammen zu entnehmen ist, ist die Impulshaltigkeit der Schalldruckpegel. Von einer Impulshaltigkeit eines Schallereignisses spricht man nach DIN EN ISO 11201 ab einer Differenz zwischen den Messwerten, gemessen in der Einstellung „Fast“ und „Impuls“, von 2 dB(A). Fallen diese Geräuschquellen bei einer Bestimmung der „Geräuschmissionen am Arbeitsplatz“ nach DIN 45645-2 besonders ins Gewicht, ist als „alleinige Messgröße“ der Impulsschalldruckpegel heranzuziehen bzw. ein Impulzzuschlag von 3 dB bzw. 6 dB (bei Messungen der Genauigkeitsklasse 3) zu dem in der Einstellung „Fast“ gemessenen Wert zu addieren. Dies verschärft die Lärmproblematik zusätzlich, da auf diese Weise die Lärmmission auf den Arbeiter höher ausfällt. Die Impulshaltigkeit der Schallemissionen konnte durch die stufenlose Regelung abgesenkt werden. Dies kann bei einer Ermittlung der Lärmbelastung am Arbeitsplatz Vorteile bringen.

Störung der nachgeschalteten Maschine: Nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine verhalten sich die Schalldruckpegel, die an den verschiedenen Messpunkten der Versuchsstrecke aufgezeichnet wurden, sehr ähnlich, wie in dem oben beschriebenen Fall des störungsfreien Betriebs der Anlage. Dies ist auf die gleichen Ursachen zurückzuführen, da das Regelungsverhalten der beiden Konzepte bei Rückstau durch eine Störung der nachgeschalteten Maschine und störungsfreiem Betrieb ähnlich aufgebaut ist. Der Unterschied, der sich zwischen dem störungsfreien Betrieb und der Störung der nachgeschalteten Maschine ergibt, ist die Reduktion der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine und der Transportbandgeschwindigkeiten auf Grund einer Auslenkung der Führungsgröße (Füllung der Transportstrecke). Durch die Reduktion dieser beiden Werte ist ohnehin mit einer Reduktion des Schalldruckpegels zu rechnen. Diese tritt beim Vergleich der Werte von störungsfreiem Betrieb und dem Betrieb nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine auch ein. Die Differenzen, die nach dieser situationsbedingten Reduzierung der Lärmmission erzielt werden können, sind daher deutlich geringer.

Der auffälligste Unterschied zwischen den beiden Versuchen ist der nach einer Störung höhere Schalldruckpegel an den Messpunkten 3 und 4. Dies ist auf die Position des aufgestauten Pulkendes zurückzuführen. Dieses befindet sich bei Beginn des Versuchslaufs im Bereich des Messpunktes 3 und wandert dann durch den Wiederanlauf der nachgeschalteten Maschine in seine Ausgangslage zwischen Messpunkt 3 und Messpunkt 4 zurück.

Störung der vorgeschalteten Maschine: Im Betrieb während und nach der Störung der vorgeschalteten Maschine fallen die Unterschiede zwischen den beiden Regelungskonzepten am deutlichsten aus. Die deutlich geringeren L_{eq} -Pegel an den Messpunkten 2 bis 5 werden durch die situationsgerechte Anpassung der Geschwindigkeiten verursacht. Während die stauschalterbasierte fünfstufige Regelung die Maschinenausbringung der vorgeschalteten Maschine erhöht und über zwei Stufen der Ausbringung und Transporteurgeschwindigkeit den Sollzustand anfährt, regelt die stufenlose Regelung bedarfsgerecht. Die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine wird an die aktuelle Füllung angepasst und nur bei nicht belegtem Überschub zwischen Abschnitt eins und zwei bzw. beim Lückenschluss zwischen Pulk und Behälterstrom gezielt erhöht. Dieses Regelverhalten vermeidet unnötige Flaschenkollisionen an den Überschüben bzw. am Ende des aufgestauten Flaschenpulks und fährt den Sollzustand darüber hinaus auch schneller an (siehe Kapitel 4.4). Die geringere Differenzgeschwindigkeit der Behälter bei den Stößen drückt sich auch in den Impulsschalldruckpegeln (L_{Im}) der Messpunkte zwei bis fünf aus. Diese sind bei der stufenlosen Regelung deutlich niedriger als jene der fünfstufigen Regelung. Der Impulsschalldruckpegel am Messpunkt eins stellt hier eine Ausnahme dar. An dieser Stelle ist die stufenlose Regelung lauter, als die fünfstufige Regelung. Dies ist auf eine über den abgefahrenen Geschwindigkeitsbereich nicht optimale Anpassung der Einlaufbandgeschwindigkeit zurückzuführen. Speziell beim Hoch- bzw. Herunterregeln kommt es zum Verspringen der einreihig an der Geländerführung geführten Behälterreihe, was zu starken Schallimpulsen führt. Dies ließe sich durch eine bessere Abstimmung der Antriebe abstellen. Allerdings wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, da es sich bei dem an der Versuchsanlage verbauten einbahnigen Einlauf um keine in der Praxis mehr anzutreffende Lösung der Verteilung von Flaschen handelt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die stufenlose Regelung bei den überprüften Fällen in der Lage ist, die Versuchsstrecke signifikant leiser zu betreiben als die stauschalterbasierte fünfstufige Regelung. Besonders ins Auge fällt auch, dass die Messwerte zwischen den verschiedenen Versuchen/Betriebsmodi bei der stufenlosen Regelung deutlich weniger schwanken. So kann der in Tabelle 8 dargestellte Schalldruckpegel am Ende des Pulks bei allen Betriebszuständen in einem Bereich von ca. 80 dB(A) gehalten werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Getränkeabfüllanlagen stellen ein Netzwerk aus einer Vielzahl von Spezialmaschinen dar. Der Materialfluss zwischen diesen Maschinen spielt eine große Rolle beim Betrieb der Anlagen. Er hat sowohl Einfluss auf die Qualität der erzeugten Produkte als auch auf die Effizienz der Anlagen. So gilt es mit Hilfe der Auslegung der Anlage und der Regelung des Materialflusses eine als Zentralaggregat definierte Maschine möglichst während der gesamten Produktionszeit ohne Stillstand zu betreiben. Bei dieser Maschine handelt es sich meist um die Flaschenfüllmaschine. Stopps können negativen Einfluss auf das Produkt haben. Außerdem handelt es sich beim Zentralaggregat um die Engpassmaschine der Anlage. Ihr Stopp führt unmittelbar zu Effizienzverlusten der gesamten Anlage. Daher muss es das Ziel sein, diese Maschine möglichst kontinuierlich mit Flaschen zu versorgen und die abgefüllten Flaschen abzuführen um so alle Stillstände, die nicht durch Eigenstörungen verursacht werden, zu verhindern. Hierzu werden die meisten Transportstrecken in Abfüllanlagen als Puffer ausgelegt, die durch die Fähigkeit Produkte zwischen zu speichern, die einzelnen Maschinen entkoppeln und so gewährleisten, dass die übrige Anlage während eines kurzen Stopps einer einzelnen Maschine weiter produzieren kann.

Allerdings wirft der Einsatz von Puffern neue Fragestellungen auf und bringt Probleme mit sich, die bei dessen Betrieb auftreten. So verursacht der Einsatz von Puffern Kosten, die für die Anschaffung, die zur Aufstellung benötigte Fläche, den Betrieb und die Wartung anfallen. Das Ziel muss es daher sein, die installierten Puffer so effizient wie möglich zu betreiben. Neben dieser wirtschaftlichen Betrachtung müssen die Puffer auch unter Arbeitsschutzgesichtspunkten kritisch betrachtet werden. So gehören sie speziell in Glasmehrwegabfüllanlagen zu den Hauptlärmemittenten. Dies ist besonders kritisch in Bezug auf die neuen europaweit erlassenen Lärmschutzbestimmungen [47] zu sehen, die so oder in ähnlicher Form in fast allen Industrieländern weltweit gelten [58]. Im Vergleich zu den noch vor wenigen Jahren (in Deutschland galten die alten Richtwerte bis 2007) gültigen Lärmexpositionspegeln von Arbeitnehmern sehen diese deutlich strengere Grenzwerte vor, die von vielen Abfüllanlagen kaum einzuhalten sind.

Das Ziel dieser Arbeit war es daher, ein neues Regelungskonzept für bestehende Flaschenpuffersysteme zu entwickeln, das es erlaubt, die als Puffer ausgeführten Transportstrecken sowohl mit reduzierten Lärmemissionen als auch effizienter oder zumindest mit gleichbleibender Effizienz zu betreiben. Hierzu wurde ein Anforderungskatalog für die Regelung erstellt, der sowohl die Zielsetzung als auch die dazu notwendigen Entwicklungsschritte umfasst.

Auf Basis der Anforderungen wurde eine stufenlose Materialflussregelung entwickelt, die jeweils ein System bestehend aus einer Massentransportstrecke und den zwei angeordneten Maschinen regelt. Die stufenlose Regelung erlaubt es, auf Änderungen des Pufferzustandes genauer und zielgerichteter zu reagieren, als dies mit heutigen stauschalterbasierten Regelungen möglich ist. Im Rahmen der stufenlosen Regelung werden die Pufferzustände

nicht durch eine stufenweise Abtastung des Puffers mit Hilfe von Stauschaltern erfasst, sondern durch eine Überwachung des Transporteurein- und auslaufs. Durch eine geeignete Sensorik werden die ein- und auslaufenden Behälter gezählt und als Messgrößen der Regelung zur Verfügung gestellt. Mit dem zusätzlichen Wissen über die Geometrie des Puffers lassen sich dadurch gezielte Eingriffe in die als Regelgröße zur Verfügung stehende Maschinenausbringung und die Transportbandgeschwindigkeiten des Puffers vornehmen. Dabei wird in erster Linie darauf geachtet, dass die dem Zentralaggregat am nächsten gelegene Maschine möglichst kontinuierlich betrieben werden kann. Hierzu wird die Ausbringung der zweiten Maschine des Systems dementsprechend angepasst. Darüber hinaus kann auf Störgrößen, wie das Auftreten von Lücken im Behälterpulk oder Rückstausituationen, gezielt reagiert werden. So ist der Algorithmus in der Lage, Lücken im Behälterpulk gezielt zuzufahren und nach Rückstaus die Sollfüllung stufenlos wieder anzufahren. Neben diesen eher in Richtung einer hohen Effizienz des Puffers zielenden Maßnahmen wird durch eine gezielte Anpassung der Transportbandgeschwindigkeiten gegen die durch Behälterstöße auftretenden Lärmemissionen vorgegangen.

Zusätzlich zur Entwicklung des Algorithmus war es notwendig, eine Sensorik zu entwickeln, die es erlaubt, die Behälter am Pufferein- und -auslauf zu zählen. Hierzu kann bei einsträngigen Ein- oder Ausläufen eine Lichtschranke zum Einsatz kommen. Werden die Behälter aber in mehreren Reihen geführt, wie dies häufig bei Getränkeabfüllanlagen vorkommt, ist diese einfache Art der Zählung nicht mehr möglich. Daher wurde ein Kamerasystem entwickelt, das die Erfassung und Zählung von im Pulk geführten Behältern ermöglicht. Das System ist als intelligente Kamera ausgeführt, das sowohl die Erfassung als auch die direkte Verarbeitung der Bilder ermöglicht und so die gewonnenen Zählwerte z. B. einer speicherprogrammierbaren Steuerung zur Verfügung stellen kann, wie sie bei Getränkeabfüllanlagen zur Regelung von Behältertransporteuren zum Einsatz kommt.

Um die gestellten Anforderungen an die stufenlose Regelung überprüfen zu können, wurden im Rahmen der Arbeit zwei Methoden entwickelt, die einen Vergleich der stufenlosen Regelung mit den heute eingesetzten stauschalterbasierten Regelungen erlauben. So wurde eine Versuchsanlage in Form eines Behälterrundlaufs aufgebaut, um die Regelung und die neu entwickelte Sensorik unter praxisnahen Bedingungen testen zu können. Die Anlage verfügt über einen Massentransportpuffer für Flaschen, der so oder in ähnlicher Form auch in industriell genutzten Anlagen eingesetzt wird. Der Regelungsalgorithmus wurde auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung umgesetzt, die zur Bändersteuerung der Anlage zur Verfügung steht. Neben den Praxistests wurden an dieser Anlage vor allem Versuche zur Schallemission durch die Behälter bei Einsatz verschiedener Regelungsstrategien durchgeführt. Hierzu wurde neben der neu entwickelten stufenlosen Regelung auch eine stauschalterbasierte Regelung umgesetzt, die ebenfalls in der Arbeit beschrieben wird und als Referenzmodell dient.

Neben der Untersuchung auf Praxistauglichkeit und Auswirkungen auf die Schallemissionen sollte auch der Einfluss der Regelung auf die Anlageneffizienz untersucht werden. Dazu

wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, das im Anschluss in der Programmiersprache C++ umgesetzt wurde. Das Modell wurde eigens für die Versuche erstellt und ist in der Arbeit detailliert beschrieben. Es ist modular aufgebaut, so dass jede beliebige lineare Anlagenkonstellation damit umgesetzt werden kann.

Im Rahmen der experimentellen Überprüfung der Regelung wurden auch die intelligente Kamera zur Behälterzählung im Pulk und die Simulation validiert. Die Ergebnisse dieser Validierung zeigten, dass die intelligente Kamera in der Lage ist, im Pulk geführte Behälter mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen und zu zählen. Diese Versuche wurden sowohl an der Versuchsanlage als auch an zwei industriell genutzten Anlagen durchgeführt.

Bei der Validierung der Simulation wurde überprüft, ob diese in der Lage ist, den Materialfluss auf Massentransportpuffern mit vor- und nachgeschalteter Maschine mit ausreichender Genauigkeit abzubilden. Die Ergebnisse der Verifizierung ergaben, dass das abgebildete Materialflussverhalten plausibel ist. Zur Validierung der Simulation wurde der Versuchsrundläufer genutzt. Die Validierungsversuche zeigten, dass die Simulation auch im Vergleich zu einer realen Anlage ein vergleichbares Verhalten zeigt und somit zur Überprüfung von Regelungsstrategien für Massentransportpuffer geeignet ist.

Kern der experimentellen Überprüfung war die Gegenüberstellung der stufenlosen Regelung zu einer stauschalterbasierten Regelung in Bezug auf die entstehende Lärmemission und die zu erreichende Anlageneffizienz.

Die akustischen Untersuchungen an der Versuchsanlage zeigten, dass die Schallemissionen unter allen getesteten Versuchsbedingungen signifikant gesenkt werden konnten. Hierbei konnten in den besonders schallintensiven Bereichen der Versuchsanlage Differenzen von bis zu 6 dB(A) zwischen stufenloser und stauschalterbasierter Regelung gemessen werden. Dies ist auf eine exaktere Regelung der Komponenten (Maschine und Transportbänder) zurückzuführen, wodurch niedrigere Differenzgeschwindigkeiten der Behälter bei Aufprallereignissen und somit niedrigere Schallemissionen erreicht werden können. Außerdem ist die stufenlose Regelung in der Lage, früher auf Veränderungen des Sollzustands zu reagieren und damit mit geringeren Anpassungen diesen wieder anzufahren. Auch dies wirkt sich positiv auf die Schallemissionen aus.

Die Versuche zur Anlageneffizienz mit Hilfe der Simulation ergaben ein sehr differenziertes Bild über die Auswirkungen der stufenlosen Regelung. So zeigte sich, dass Effizienzsteigerungen durch die stufenlose im Vergleich zur stauschalterbasierten Regelung bei dem Zentralaggregat vorgeschalteten Puffern erreicht werden konnten. Bei diesen hing die Effizienzsteigerung von mehreren Faktoren ab. So wirkte sich eine größere Überausbringung der vorgeschalteten Maschinen zu Gunsten der stufenlosen Regelung aus. Auch das Ausfallverhalten der Maschinen selbst hatte einen entscheidenden Einfluss. Daher lässt sich ableiten, dass bei schlechten Wirkungsgraden der einzelnen Maschinen die stufenlose Regelung ihre Vorteile im Vergleich zur stauschalterbasierten Regelung besser ausspielen kann.

Zusammenfassend lässt sich folglich sagen, dass durch die Umsetzung der stufenlosen Regelung an einer industrienahen Versuchsanlage bewiesen werden konnte, dass eine stufenlose Regelung funktioniert und in der Praxis einsetzbar ist. Ihr klarer Vorteil liegt in der deutlichen Reduktion von Schallemissionen der Transporteure. Die Effizienz der Anlagen konnte dabei in jedem Fall erhalten werden, wie die Versuche mit Hilfe der Simulation zeigten. In vielen Fällen konnte die Effizienz der Anlage im Vergleich zur stauschalterbasierten Regelung sogar gesteigert werden. Das Ziel der Schallreduktion bei gleichzeitigem Erhalt bzw. einer Verbesserung der Anlageneffizienz konnte somit erreicht werden.

Neben diesen beiden im Rahmen der Arbeit verfolgten Zielstellungen lassen sich die gewonnenen Ergebnisse für weitere im Bereich der Getränkeabfülltechnik sinnvolle und zum Teil im Einsatz befindliche Anwendungen nutzen. So können durch die exakte Erfassung der Anlagenzustände die Daten der Regelung für die Anlagendiagnose genutzt werden, wie sie Kather in seiner Arbeit beschreibt [74]. Die Regelung birgt darüber hinaus Potential für Energie- und Betriebsmitteleinsparungen (z. B. Bandschmierung), die sich durch eine gezielte Abschaltung von Bandabschnitten verwirklichen lassen.

In einem weiteren Entwicklungsschritt ließe sich das hier als dezentrale Materialflussregelung aufgebaute Konzept in eine übergeordnete Anlagenregelung integrieren, wie sie beispielsweise von Voigt [159] angedacht wurde. Dies hätte den Vorteil, dass sich die Regelung um weitere Funktionalitäten erweitern ließe und so eine gezielte Regelung einer gesamten Anlage möglich wäre.

Neben diesen Ansatzpunkten, die eine Einbindung der in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse in mögliche zukünftige Projekte aufzeigen sollen, ist aber auch eine konkrete industrielle Umsetzung der Regelung geplant. So hat bereits ein Anlagenbauer aus dem Bereich der Abfüll- und Verpackungstechnik Interesse an der Regelung geäußert. Er möchte diese zunächst an einer Versuchsanlage und in einem zweiten Schritt auch an einer industriell genutzten Anlage umsetzen. Auf diese Weise finden die hier gewonnenen Ergebnisse ihren Weg in die Praxisanwendung und können helfen, Abfüllanlagen lärmärmer und damit bedienerfreundlicher zu betreiben. Darüber hinaus stecken auch Potentiale im Hinblick auf eine höhere Anlageneffizienz in der neuen Regelung, wie die durchgeführten Simulationen aufgezeigt haben.

Abschließend lässt sich somit sagen, dass die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse zu einem effizienteren und bedienerfreundlicheren Betrieb von Abfüllanlagen beitragen können und einen Ansatzpunkt für weitergehende Forschungsvorhaben darstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] Abbate, C.; Concetto, G.; Fortunato, M.; Brecciaroli, R.; Tringali, M. A.; Beninato, G.; D'Arrigo, G.; Domenico, G.: Influence of Environmental Factors on the Evolution of Industrial Noise-Induced Hearing Loss. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 2005, S. 351–361
- [2] Arndt, G.: Stand der Flaschenabfüllung – Trockenteil. *Brauwelt*, (2005), S. 1374–1375
- [3] Atlantic, C.: Dynamisches Etagenpuffersystem für PET Flaschen. *Deutsche Milchwirtschaft*, (2004), S. 872–873
- [4] Ahvenainen, R.: *Novel Food Packaging Techniques*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2003
- [5] Ax, H.: Flaschen im Fluß - Anlagenoptimierung durch intelligente Steuerungskonzepte. *Brauindustrie*, (2006), S. 30–33
- [6] Azaron, A.; Brown, K.N.; Tarim, S.A.; Modarres, M.: A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, Vol. 116 (2008), S. 129–138
- [7] Back, W.: Sekundärkontaminationen im Abfüllbereich. *Brauwelt*, Vol. 134, (1994), S. 686-690 u. 692-695
- [8] Berg, F.: Technische Flaschenkeller-Betriebskontrolle. *Brauwelt*, Vol. 108, (1968), S. 833–838
- [9] Berg, F.: Transportsysteme in Flaschenkellereien. *Brauwelt*, Vol. 116, (1976), S. 640–646
- [10] Bernhard Foitzik: *Bottling and Canning Lines for the Beverage Industry - Concepts, technology, and trends*. Landsberg: Verlag Moderne Industrie, 2000
- [11] Berufsgenossenschaft Metall Süd: *Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit - Unfallverhütungsvorschrift Lärm*, 2005
- [12] Bludau, W.: *Halbleiter-Optoelektronik*. München: Hanser Verlag, 1995
- [13] Blüml, S.; Fischer, S.: *Handbuch der Fülltechnik: Grundlagen und Praxis für das Abfüllen flüssiger Produkte*. Hamburg: Behrs Verlag, 2004
- [14] Böcker, H.; Paroth, B.; Scholz, U.: Vorrichtung zur Auseinanderführung eines Behälterstroms, EP 1 424 297 B1, 2003
- [15] Braglia, M.: Designing a belt conveyor controller in a bottling plant using fuzzy logic and genetic algorithms. *Packaging Technology and Science*, Vol. 14, (2001), S. 231–248,
- [16] Braglia, M.; Frosolini, M.; Montanari, R.: Fuzzy logic controller in a packaging plant. *Packaging Technology and Science*, Vol. 16, (2003), S. 21–35
- [17] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: *Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung - Teil: Allgemeines*, 2010
- [18] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: *Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung - Teil 1: Beurteilung der Gefährdung durch Lärm*, 2010

-
- [19] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung - Teil 3: Lärmschutzmaßnahmen, 2010
- [20] Burns, W.; Robinson, D. W.: Hearing and Noise in Industry, Health and Safety Executive. London: Her Majesty's Stationery Office, (1978)
- [21] Buzacott, J.: Automatic Transfer Lines with Buffer Stocks. International Journal of Production Research, Vol. 5, (1967), S. 183 - 200
- [22] Buzacott, J. A.; Shanthikumar, J. G.: Design of manufacturing systems using queuing models. Queuing Systems, Vol. 12, (1992), S. 135–214
- [23] Cooke, R. M.; Bosma, A.; Härte, F.: A practical model of Heineken's bottle filling line with dependent failures. European Journal of Operational Research, Vol. 164, (2005), S. 491–504
- [24] Czuchaj, J.; Sliwinski, A.; Srodecki, K.: Noise sources and acoustic properties of workrooms in the plants of food-processing and pharmaceutical industry. Applied Acoustics, Vol. 62, (2001), S. 1141–1156
- [25] Dallery, Y.: Manufacturing flow line systems: - a review of models and analytical results. Queuing Systems, Vol. 12, (1992), S. 3–94
- [26] Dance, S. M.: Minimal input models for sound level prediction in fitted enclosed spaces. Applied Acoustics, Vol. 63, (2002), S. 359–372
- [27] Davies, H.; Shoveller, J.; Winters, M. : A Multidisciplinary Study of Factors Influencing Hazard Reduction Strategies, Using Noise Exposure and Hearing Loss as a Model. Richmond, B.C.: WorkSafeBC, 2009
- [28] DIN 45635-1: Geräuschemessung an Maschinen Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren, Rahmenverfahren für 3 Genauigkeitsklassen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (April 1984)
- [29] DIN 8782: Begriffe für Abfüllanlagen und einzelne Aggregate, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Mai 1984)
- [30] DIN 8782: Getränke-Abfülltechnik - Begriffe für Abfüllanlagen und einzelne Aggregate, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Mai 1984)
- [31] DIN 8783: Getränke-Abfülltechnik Untersuchungen an getränkeabfülltechnischen Anlagen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Juli 1986)
- [32] DIN 40041: Zuverlässigkeit Begriffe, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Dezember 1990)
- [33] DIN 8784: Getränke-Abfülltechnik Mindestangaben und auftragsbezogene Angaben, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (November 1993)
- [34] DIN 45645-2: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen, Teil 2: Geräuschmission am Arbeitsplatz, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Juli 1997)
- [35] DIN-EN 61672-1: Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (2003)
- [36] DIN 55405: Verpackung - Terminologie - Begriffe, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (November 2006)

-
- [37] DIN EN ISO 9612: Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (September 2009)
- [38] DIN EN ISO 3744: Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (November 2009)
- [39] DIN EN ISO 3746: Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (November 2009)
- [40] DIN EN ISO 3745: Akustik - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (November 2009)
- [41] DIN EN ISO 11201: Akustik – Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten – Messung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (November 2009)
- [42] DIN EN ISO 11202: Akustik – Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten – Messung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten – Verfahren der Genauigkeitsklasse 3 für Messungen unter Einsatzbedingungen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (November 2009)
- [43] DIN EN ISO 11200: Akustik – Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten – Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen zur Bestimmung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Januar 2010)
- [44] DIN EN ISO 11203: DIN EN ISO 11203 Akustik – Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten – Bestimmung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten aus dem Schalleistungspegel, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Januar 2010)
- [45] DIN EN 415-9: Sicherheit von Verpackungsmaschinen – Teil 9: Verfahren zur Geräuschmessung bei Verpackungsmaschinen, Verpackungslinien und Hilfseinrichtungen – Genauigkeitsklassen 2 und 3, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Februar 2010)
- [46] Duffie, N. A.; Vittaldas, V. P.; Kaltjob, P. O.: Closed-Loop Real-Time Cooperative Decision-Making Dynamics in Heterarchical Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 21, (2002), S. 409–418
- [47] Directive 2003/10/EC of the European Parliament and of the Council of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise), European Parliament and Council, (March. 2007)

-
- [48] Evans, W. A.; Ming, H. Y.: Industrial Noise-Induced Hearing Loss in Hong Kong – A Comparative Study. *The Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 25, (1982), S. 63–88
- [49] Filmer, P. J.; Marcondes, J. A.; Johnston, R. E.: Simulation of high-speed packaging lines. *Packaging Technology and Science*, Vol. 7, (1994), S. 123–130,
- [50] Fuhrmann, P.: Lärmreduzierung bei Getränkeanlagen. 15. Flaschenkellerseminar, Freising, 2008
- [51] Gershwin, S. B.; Schor, J. E.: Efficient algorithms for buffer space allocation. *Annals of Operations Research*, Vol. 93, (2000), S. 117–144
- [52] Glänz, R.: Viele Sorten effizient abfüllen - Winzergenossenschaft optimiert Füll- und Rüstzeiten. *Getränkeindustrie*, (2002), S. 29–31
- [53] Glänz, R.: Eliminierung von Mikrostops - Einsatz von Etagenstauförderern erhöht den Wirkungsgrad. *Brauindustrie*, (2003), S. 34–37
- [54] Glebe, W.: Reserven anlegen - Betrachtung der Wirkungsgrade hilft bei der Auslegung von Abfülllinien. *Getränkeindustrie*, (2005), S. 86–90
- [55] Glebe, W.: Richtig automatisch? Automatisch richtig! - Steuerung und Regelung moderner Abfülllinien. *Brauindustrie*, (2007), S. 44–49
- [56] Glebe, W.: Atmende Lungen für dynamische Anlagen - Der neue variable Sidel-Puffertisch AQ-HC. *Brauindustrie*, (2010), S. 28–30
- [57] Glebe, W.: Wie die Flaschen laufen lernen - Regelung von Abfüllanlagen mit optimaler Anlagenleistung. *Getränkeindustrie*, (2011), S. 12–15,
- [58] Goelzer, B.; Hansen, C. H.; Sehrndt, G. A.: Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control, World Health Organization, 2001
- [59] Götz, J.; Fuhrmann, P.; Hierl, A.; Hess, M.; Reiss, H.: Schallminderung im Flaschenkeller (1). *Brauwelt*, (2003), S. 1719–1723
- [60] Götz, J.; Fuhrmann, P.; Hierl, A.; Hess, M.; Reiss, H.: Schallminderung im Flaschenkeller (2). *Brauwelt*, (2004), S. 66–70
- [61] Güntner, W. A.; Kadachi, M.: Simulationsgestützte Planung und Nutzung von Getränke-Abfüllanlagen – Abschlussbericht. AiF Vorhaben 12265-N, Garching, 2001
- [62] Güntner, W. A.; Kadachi, M.: Planung und Simulation - Materialflußsimulation für Getränke-Abfüllanlagen. *Getränkeindustrie*, (2002), S. 8–11
- [63] Haider, M.: Bringen Sie Ihre Abfüllanlage auf Vordermann! - Schwachstellenanalyse an Mehrweg-Glas-Anlagen. *Brauindustrie*, (2008), S. 36-37
- [64] Hamada, M.; Martz, H. F.; Berg, E. C.; Koehler, A. J.: Optimizing the product-based availability of a buffered industrial process. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, (2006), S. 1039–1048
- [65] Heider, W.; Froschauer, R.; Grünbacher, P.; Rabiser, R.; Dhungana, D.: Simulating evolution in model-based product line engineering. *Information and Software Technology*, Vol. 52, (2010), S. 758–769
- [66] Henn, H.: Ingenieurakustik - Grundlagen, Anwendungen, Verfahren. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2001

- [67] Hetu, R.; Parrot, J.: A field of noise-induced temporary threshold shift. *American Industrial Hygiene Association Journal*, Vol. 39, (1978), S. 301–312
- [68] Heuft Systemtechnik GmbH: Bändersteuerung Heuft Synchron, http://www.heuft.com/media/brochures/bev_st_de.pdf, Stand 2011
- [69] Heyse, K.-U. (Hrsg.): *Praxishandbuch der Brauerei*. Hamburg: Behrs Verlag, 2000
- [70] Hüttner, J.; Meindl, T.; Hahn, W.: Vorrichtung zum Verbreitern und Verlangsamen eines Stroms aufrechtstehender Flaschen, *Europäische Patentschrift*, EP 1 359 100 B1, 2003
- [71] Hüttner, J.; Seger, M.; Fleischmann, B.; Dirmeier, E.: Vorrichtung zum Puffern von Gegenständen, *Europäische Patentschrift*, EP 1 807 329 B1, 2005
- [72] Jafari, M. A.; Shanthikumar, J. G.: Determination of Optimal Buffer Storage Capacities and Optimal Allocation in Multistage Automatic Transfer Lines. *IIE Transactions*, Vol. 21, (1989), S. 130 - 135
- [73] Kaiser, A.: A Vision Approaches - The future of beverage bottling lines. *Brewing and Beverage Industrie International*, (2005), S. 18–19
- [74] Kather, A.: Fehlerlokalisierung in verketteten Produktionslinien am Beispiel von Lebensmittelverpackungsanlagen, *Dissertation Technische Universität München*, 2009
- [75] Kay, E.: Buffer stocks in automatic transfer lines. *International Journal of Production Research*, Vol. 10, (1972), S. 155–165
- [76] KHS GmbH: Grundlagen der Pufferberechnung bei Abfüllanlagen. *KHS Journal*, (1995), S. 30–37
- [77] Klotz, F.: Pressureless multi-lane dividing apparatus, *US Patent*, US 6,206,174 B1, 1997
- [78] Knuth, D. E.: *Seminumerical Algorithms 2 - The Art of Computer Programming*, Second Edition, Addison-Wesley, 1981
- [79] Kouikoglou, V. S.: Sensitivity analysis and decomposition of unreliable production lines with blocking. *Annals of Operations Research*, Vol. 93, (2000), S. 245–264
- [80] Kronseder, H.: Increase of Bottle Line Efficiency through Zero Pressure Conveyor and Bloc Systems. *MBAA Technical Quarterly*, Vol. 22, (1985), S. 103–107
- [81] Kronseder, H.; Hinterwimmer, P.: Problems Arising Within a Bottling Line. *MBAA Technical Quarterly*, Vol. 1978, (15), S. 43–52
- [82] Kronseder, H.; Schneider, E.: Apparatus for widening and slowing down a stream of upright bottles, *US Patent*, 4,496,040, 1983
- [83] Kunze, W.: *Technologie Brauer und Mälzer*, 10. Aufl., Berlin: VLB Berlin, 2007
- [84] Lee, S.-D.; Ho, S.-H.: Buffer sizing in manufacturing production systems with complex routings. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 15, (2002), S. 440–452
- [85] Ludwig, M.; Schoen, R.; Elchinger, O.: Pressureless conveyor for bottles or similar items, *US Patent*, 4,880,103, 1987

- [86] Manger, H.-J.: Füllanlagen für Getränke - Kompendium zur Reinigungs-, Füll- und Verpackungstechnik für Einweg- und Mehrwegflaschen, Dosen, Fässer und Kegs. Berlin: VLB Berlin, 2008
- [87] Manning, H.: Computer Modeling of Packaging Lines. MBAA Technical Quarterly, Vol. 17, (1980), S. 177–183
- [88] Meindl, T.: Verfahren und Vorrichtung zum Umformen eines mehrspurigen Behälterstromes in einen einspurigen Behälterstrom, Europäische Patentschrift, EP 0 414 210 B1, 1990
- [89] Meinhardi, E.; Bonfè, M.; Golfieri, M.: Fuzzy Controller for an Air Conveyor Bottling Plant. Control Applications, (2007), S. 1504-1509
- [90] Meinhardt, I.; Marquardt, H.-G.: Offenes Baukastensystem zur effizienten Dimensionierung von Materialflusssystemen - Schlussbericht des aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" (AiF) im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL) geförderten Forschungsvorhabens (AiF-Nr. 14046 BR)
- [91] Meinhardt, I.; Marquardt, H.-G.: Dimensionierung von Entkopplungspuffern in dynamischen Fertigungsprozessen mittels Warteschlangen. Logistics Journal, (2007), S. 1-15
- [92] Mernoe, E.: Computer Control of Bottling Lines at Fredericia Brewery. MBAA Technical Quarterly, Vol. 17, (1980), S. 167–176
- [93] Moselhi, M.; El-Sadik, Y. M.; El-Dakhkhny, A.: A six-year follow up study for evaluation of the 85 dBA safe criterion for noise exposure. American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 40, 1979, S. 424–426
- [94] Möser, M.: Messtechnik der Akustik. Springer Verlag, 2009
- [95] Müller, G.; Möser, M.: Taschenbuch der technischen Akustik. Berlin: Springer, 2004
- [96] Mundt, G.; Paroth, B.: Wellenformierer - Neues System zur Flaschenaueinanderführung erhöht Anlageneffizienz. Brauindustrie, (1999), S. 215
- [97] Mundt, G.; Smusch, G.; Stienen, T.: Niederdruck Speichertisch für Gefäße u. dgl., Europäische Patentschrift, EP 1 380 522 B1, 2003
- [98] Nakajima, S.: Introduction to TPM. Cambridge: Productivity Press, 1988
- [99] Nelson, D. I.; Nelson, R. Y.; Concha-Barrientos, M.; Fingerhut, M.: The global burden of occupational noise-induced hearing loss. American Journal of Industrial Medicine, Vol. 48, (2005), S. 446–458
- [100] Neumann, J.: Lärmmeßpraxis, 4. Aufl., Expert Verlag, 1983
- [101] Noël, S.; Metais, N.; Bonte, S.; Bodart, E.; Peladan, F.; Dupire, S.; Collin, S.: The use of oxygen 18 in appraising the impact of oxidation process during beer storage, Journal of the Institute of Brewing, Vol. 105, (1999), S. 269–274
- [102] o. A.: Move it... - Bandregelungs-Prozessoren ermöglichen Wirkungsgraderhöhung von Abfüllanlagen. Brauindustrie, (2008), S. 23–25
- [103] o. A.: Sanfter Lückenschluss - Weniger Lärm durch harmonischen Behältertransport. Getränkeindustrie, (2009), S. 32–34

- [104] Okamura, K.; Yamashina, H.: Analysis of the Effect of Buffer Storage Capacity in Transfer Line Systems. IIE Transactions, Vol. 9, (1977), S. 127 - 135
- [105] Osipov, P.: Akustische Kamera - Praxisbericht zu Erfahrungen aus Messungen an Getriebemotoren - Ein innovatives Messsystem für Geräuschanalyse. VDI-Bericht 1963, 2006
- [106] Papadopoulos, H.T.; Heavey, C.: Queuing theory in manufacturing systems analysis and design: - A classification of models for production and transfer lines. European Journal of Operational Research, Vol. 92, (1996), S. 1–27
- [107] Paroth, B.; Scholz, U.; Strohn, G.; Mundt, G.: Vorrichtung zum Auseinanderführen eines einreihig ankommenden Gefäßstromes, Europäische Patentschrift, EP 0 873 951 B1, 1998
- [108] Petersen, H.: Brauereianlagen - Planung, Energieversorgung, Energiewirtschaft, Betriebstechnik, Kontrolle, Kennzahlen. Verlag Hans Carl, 1993
- [109] Petrovic, Z.: Low pressure dynamic accumulation table, US Patent, US 6,168,005 B1, 1999
- [110] Petrovic, Z.: Conveyor unit with accumulation of receptacles such as bottles, US Patent, US 2005/0178640 A1, 2003
- [111] Probst, W.: Geräuschemission von Getränkeabfüllanlagen und Maßnahmen zur Lärminderung, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1977
- [112] Probst, W.: Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Handlungsanleitung für die Praxis Lärminderung - Getränkeabfüllung - Lärmarme Flaschentransportsysteme, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1979
- [113] Probst, W.: Planung lärmarmen Transportsysteme für Flaschen und Gläser, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1982
- [114] Probst, W.: Schallabsorbierende Bauteile - Anforderungen und Prüfverfahren, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1984
- [115] Probst, W.: Physikalische Modellvorstellungen und Bausteine zur numerischen Beschreibung der Schallausbreitung, Dissertation, Technische Universität München, 1987
- [116] Probst, W.: Schallabstrahlung und Schallausbreitung - Berechnungsmodelle u. Schalleistungsbestimmung, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1988
- [117] Probst, W.: Schallausbreitung in Arbeitsräumen/ [1], Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1990
- [118] Probst, W.: Schallausbreitung in Arbeitsräumen/ [2], Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1993
- [119] Probst, W.: Schallausbreitung in Arbeitsräumen/ [3] - Einbeziehung von Richtwirkung, Abschirmung, großen Maschinen und gekoppelten Räumen, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1999
- [120] Probst, W.: Geräuschemissionswerte von ausgewählten Maschinengruppen, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2003
- [121] Pugh, A. G.; Fortier, F. G.: The Planning and Start-up Of a High Speed Bottling Line. MBAA Technical Quarterly, Vol. 9, S. 215–217

- [122] Rädler, T.: Modellierung und Simulation von Abfülllinien, Dissertation, Technische Universität München, 1999
- [123] Rädler, T.; Weisser, H.: Stochastic Modeling of Filling Lines. Chemical Engineering and Technology, Vol. 24, (2001), S. 466–470
- [124] Rädler, T.; Weisser, H.: Effect of reliability of machinery on layout of filling plants. Brauwelt International, (2001), S. 274–278
- [125] Rädler, T.; Weisser, H.: Standfest? - Das Fördern von Kunststoffflaschen – Physikalische Rahmenbedingungen und Scuffing. Getränkeindustrie, (1998), S. 307–312
- [126] Richards, E. J. Lenzi A.; Cuchieri, J.: On the prediction of impact noise - VI: Distribution of acceleration noise with frequency with application to bottle impacts. Journal of Sound and Vibration, Vol. 90, (1983), S. 59–80
- [127] Robertson, G. L.: Food Packaging – Principles and Practice, 2. Aufl., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2005
- [128] Scherer, H.-J.: Vorrichtung zum Umformen eines schmalen einspurigen Behälterstromes in einen breiten Behälterstrom, Europäische Patentschrift, 0 626 327 A1, 1994
- [129] Schiessl, H.: Method and device for signaling of a back-up on a container conveyor, US Patent, 4,898,271, 1985
- [130] Schiessl, H.: Verfahren und Vorrichtung zum Melden eines Staus auf einem Gefässförderer, Europäische Patentschrift, 0 178 636 B1, 1985
- [131] Schneider, E.: Method and apparatus for transferring bottles arriving in upright position in laterally adjacent rows on a feed conveyor into a single row of bottles on a downstream conveyor, US Patent, 4,489,820, 1983
- [132] Schneider, E.: Verfahren und Vorrichtung zum Umformen eines mehrspurigen Gefässstroms in einen einspurigen Gefässstrom, EP 0 574 750 B1, 1993
- [133] Schneider, E.: Vorrichtung zum Überleiten eines in einer Reihe einspurig zulaufenden Gefässstromes auf mehrere abführende Förderspuren, Europäische Patentschrift EP 0 585 685 B1, 1993
- [134] Schoen, P.: Pressureless apparatus for aligning various objects, notably bottles, US Patent, 4,974,720, 1989
- [135] Seger, M.; Dirmeier, E.; Reil, J.: Device for spreading objects apart, US Patent, US 2010/0000841 A1, 2009
- [136] Senior, D.; Dege, N.: Technology of Bottled Water, 2. Aufl., Blackwell Publishing, 2005
- [137] Siegfriedt, Marc; Millet, Pierre; Schoen, Robert; Aubertin, Francois: Aligner sans pression d'objets, notamment de récipients, et son dispositif de regulation, Europäisches Patentamt, EP 0190090, 1985
- [138] Sivak, R.F.: Noise Control Design for Packaging, Vol. 19, (1982), S. 115–121
- [139] Sörensen, K.; Janssens, G. K.: Buffer allocation and required availability in a transfer line with unreliable machines. International Journal of Production Economics, Vol. 74, (2001), S. 163–173

- [140] Sorgatz, A.: Entwicklung eines neuen Sensorsystems zum Behälterzählen im Pulk, 14. Flaschenkellerseminar, 2007, Freising, Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstetchnik
- [141] Sorgatz, A.; Voigt, T.: Weniger Lärm – Stufenlose Regelung von Behältertransporteuren. *Getränkeindustrie*, Vol. 66, (6/2012), S. 28-33
- [142] Sorgatz, A.: Bestimmung des Pufferfüllungsgrades mit einer intelligenten (FPGA) Kamera, 15. Flaschenkellerseminar, 2008, Freising, Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstetchnik
- [143] Sorgatz, A.: Ein neuartiges Sensorsystem zum Behälterzählen im Pulk, 4. ITL Symposium, 2009, Freising, Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstetchnik
- [144] Sorgatz, A.; Gabler, F.; Voigt, T.; Langowski, H.-C.: Stepless control of multi-lane conveyors, 2nd International Symposium of Young Scientists, 2010, Freising
- [145] Sorgatz, A.; Langowski, H.-C.; Voigt, T.; Kather, A.: Development of a new sensor to control bottle conveyors, World Brewing Congress, 2008, Honolulu
- [146] Sorgatz, A.; Voigt, T.; Langowski, H.-C.: A new approach to control bottle conveyors, 32nd European Brewery Convention Congress, 2009, Hamburg
- [147] Sorgatz, A.; Voigt, T.; Nophut, W.: Entwicklung eines Sensorsystems zur Behälterzählung im Pulk. *Brauwelt*, (2009), S. 692–695
- [148] 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
- [149] Struss, P.; Kather, A.; Schneider, D.; Voigt, T.: Qualitative Modeling for Diagnosis of Machines Transporting Rigid Objects, Proceedings of the 22nd International Workshop on Qualitative Reasoning, Boulder, CO, USA
- [150] Treiber, K.: Flaschentransporteure und Anlagenausbringungen – Teil 1. *Brauwelt*, Vol. 143, (2003), S. 1626–1631
- [151] Treiber, K.: Flaschentransporteure und Anlagenausbringungen – Teil 2. *Brauwelt*, Vol. 143, (2003), S. 1665–1670
- [152] Tsarouhas, P. H.; Arvanitoyannis, I. S.: Assessment of operation management for beer packaging line based on field failure data: A case study. *Journal of Food Engineering*, Vol. 98, (2010), S. 51–59
- [153] Tsarouhas, P. H.; Arvanitoyannis, I. S.; Ampatzis, Z. D.: A case study of investigating reliability and maintainability in a Greek juice bottling medium size enterprise (MSE). *Journal of Food Engineering*, Vol. 95, (2009), S. 479–488
- [154] Veit, I.: Technische Akustik, Vogel Business Media, Würzburg, 2005
- [155] VDI Richtlinie 3633: Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen, Verein Deutscher Ingenieure, (2000)
- [156] Bundesgesetzblatt Teil 1; Nr. 8, Verordnung zur Umsetzung der EG-Richtlinie 2002/44/EG und 2003/10/EG zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen, (Mrz. 2007)
- [157] Vogelpohl, Heinrich: Ergebnisse und Erfahrungen aus Abnahmeversuchen, 12. Flaschenkellerseminar, 2005, Freising

- [158] Vogelpohl, H.; Grabrucker, R.: Auslegung und Planung von Getränkeabfüllanlagen, 13. Flaschenkellerseminar, 2006, Freising
- [159] Voigt, T.: Neue Methoden für den Einsatz der Informationstechnologie bei Getränkeabfüllanlagen. Dissertation, Technische Universität München, 2004
- [160] Williams, J. H.; Geller, E. S.: Behavior-Based Intervention for Occupational Safety: Critical Impact of Social Comparison Feedback. *Journal of Safety Research*, Vol. 31, (2000), S. 135–142
- [161] Wood, R.; Hill, J.: Noise Control in Breweries. *MBAA Technical Quarterly*, Vol. 15, (1978), S. 232–235
- [162] Ziegler, M.: Transport Unit for piece goods, Internationales Patent, WO 02/090218 A1, 2002

Anhang

Versuchsbedingungen der im Kapitel 4.2.1.1 beschriebenen Versuche zur Verifizierung des Materialtransports

Variable	Anlaufverhalten (Abbildung 50)		Störung der nach- geschalteten Maschine (Abbildung 51)		Störung der vor- geschalteten Maschine (Abbildung 52)		
	Wert	Einheit	Wert	Einheit	Wert	Einheit	
B_{set}	600	Fl.	600	Fl.	600	Fl.	
C	1000	Fl.	1000	Fl.	1000	Fl.	
l_0	3,670	m	3,670	m	3,670	m	
l_1	4,500	m	4,500	m	4,500	m	
l_2	0,900	m	0,900	m	0,900	m	
b_0	0,460	m	0,460	m	0,460	m	
b_1	0,415	m	0,415	m	0,415	m	
b_2	0,500	m	0,500	m	0,500	m	
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h	19.500	Fl./h	19.500	Fl./h	
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h	15.000	Fl./h	15.000	Fl./h	
Pufferzustand zu Versuchsbeginn	0	Fl.	300	Fl.	300	Fl.	
Störungs- dauer	M_0	0	s	0	s	20	s
	M_1	0	s	180	s	0	s
Versuchszeit	90	s	200	s	50	s	

Versuchsbedingungen der im Kapitel 4.2.1.3 beschriebenen Versuche zur Verifizierung des Anlagenverhaltens

Variable	Anlaufverhalten (Abbildung 53)		Störung der vor- geschalteten Maschine (Abbildung 54)		Störung der nach- geschalteten Maschine (Abbildung 55)		
	Wert	Einheit	Wert	Einheit	Wert	Einheit	
$B_{\text{set } T_0}$	600	Fl.	600	Fl.	600	Fl.	
$C T_0$	1.000	Fl.	1.000	Fl.	1.000	Fl.	
$B_{\text{set } T_1}$	250	m	250	m	250	m	
$C T_1$	1.000	m	1.000	m	1.000	m	
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m	3,670	m	3,670	m	
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m	4,500	m	4,500	m	
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m	0,900	m	0,900	m	
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m	0,460	m	0,460	m	
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m	0,415	m	0,415	m	
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m	0,500	m	0,500	m	
$q_{\text{max } M_0}$	19.500	Fl./h	19.500	Fl./h	19.500	Fl./h	
$q_{\text{max } M_1}$	15.000	Fl./h	15.000	Fl./h	15.000	Fl./h	
$q_{\text{max } M_2}$	19.500	Fl./h	19.500	Fl./h	19.500	Fl./h	
Pufferzustand zu Versuchsbeginn	T_0	0	Fl.	600	Fl.	600	Fl.
	T_1	0	Fl.	250	Fl.	250	Fl.
Störungsdauer	M_0	0	s	180	s	0	s
	M_1	0	s	0	s	0	s
	M_2	0	s	0	s	180	s
Versuchszeit	600	s	650	s	900	s	

Versuchsbedingungen der im Kapitel 4.3 beschriebenen Simulationsversuche

Variable	Anlaufverhalten (Abbildung 61)		Störung der nachgeschalteten Maschine (Abbildung 62)		
	Wert	Einheit	Wert	Einheit	
B_{set}	800	Fl.	800	Fl.	
C	1.000	Fl.	1.000	Fl.	
l_0	3,670	m	3,670	m	
l_1	4,500	m	4,500	m	
l_2	0,900	m	0,900	m	
b_0	0,460	m	0,460	m	
b_1	0,415	m	0,415	m	
b_2	0,500	m	0,500	m	
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h	19.500	Fl./h	
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h	15.000	Fl./h	
Pufferzustand zu Versuchsbeginn	0	Fl.	800	Fl.	
Störungsdauer	M_0	0	s	0	s
	M_1	0	s	180	s
Versuchszeit	1000	s	500	s	

Versuchsbedingungen der im Kapitel 4.4.1.1 beschriebenen Simulationsversuche

Variation der MTBF der M_0

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	variabel	s
MDT M_0	150	s
MTBF M_1	∞	s
MDT M_1	0	s
MTBF M_2	∞	s
MDT M_2	0	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\text{max}} M_2$	19.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

Variation der MDT der M_0

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	400	s
MDT M_0	variabel	s
MTBF M_1	∞	s
MDT M_1	0	s
MTBF M_2	∞	s
MDT M_2	0	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\text{max}} M_2$	19.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

Versuchsbedingungen der im Kapitel 4.4.1.3 beschriebenen Simulationsversuche

Variation der MTBF der M_2

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	∞	s
MDT M_0	0	s
MTBF M_1	∞	s
MDT M_1	0	s
MTBF M_2	variabel	s
MDT M_2	150	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\text{max}} M_2$	19.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

Variation der MDT der M_2

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	∞	s
MDT M_0	0	s
MTBF M_1	∞	s
MDT M_1	0	s
MTBF M_2	400	s
MDT M_2	variabel	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\text{max}} M_2$	19.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

Versuchsbedingungen der im Kapitel 4.4.1.3 beschriebenen Simulationsversuche

$$q_{\max}(M_0, M_2) = 1,1 * q_{\max}(M_1)$$

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	120,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_0	0,96	s
MDT M_0	29,30	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_0	0,98	s
MTBF M_1	1334,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_1	0,68	s
MDT M_1	57,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_1	0,80	s
MTBF M_2	371,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_2	0,76	s
MDT M_2	22,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_2	0,75	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m
$q_{\max} M_0$	16.500	Fl./h
$q_{\max} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\max} M_2$	16.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

$$q_{\max}(M_0, M_2) = 1,2 * q_{\max}(M_1)$$

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	120,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_0	0,96	s
MDT M_0	29,30	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_0	0,98	s
MTBF M_1	1334,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_1	0,68	s
MDT M_1	57,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_1	0,80	s
MTBF M_2	371,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_2	0,76	s
MDT M_2	22,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_2	0,75	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m
$q_{\max} M_0$	18.000	Fl./h
$q_{\max} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\max} M_2$	18.000	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

$$q_{\max}(M_0, M_2) = 1,3 * q_{\max}(M_1)$$

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	120,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_0	0,96	s
MDT M_0	29,30	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_0	0,98	s
MTBF M_1	1334,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_1	0,68	s
MDT M_1	57,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_1	0,80	s
MTBF M_2	371,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_2	0,76	s
MDT M_2	22,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_2	0,75	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m
$q_{\max} M_0$	19.500	Fl./h
$q_{\max} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\max} M_2$	19.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

Versuchsbedingungen der im Kapitel 4.4.1.3 beschriebenen Simulationsversuche

70 % der Referenzlänge

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	120,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_0	0,96	s
MDT M_0	29,30	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_0	0,98	s
MTBF M_1	1334,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_1	0,68	s
MDT M_1	57,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_1	0,80	s
MTBF M_2	371,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_2	0,76	s
MDT M_2	22,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_2	0,75	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	2,570	m
$l_1 T_0$ und T_1	3,150	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,630	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,657	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,592	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,715	m
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\text{max}} M_2$	19.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

100 % der Referenzlänge

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	120,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_0	0,96	s
MDT M_0	29,30	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_0	0,98	s
MTBF M_1	1334,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_1	0,68	s
MDT M_1	57,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_1	0,80	s
MTBF M_2	371,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_2	0,76	s
MDT M_2	22,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_2	0,75	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	3,670	m
$l_1 T_0$ und T_1	4,500	m
$l_2 T_0$ und T_1	0,900	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,460	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,415	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,500	m
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\text{max}} M_2$	19.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s

130 % der Referenzlänge

Variable	Wert	Einheit
MTBF M_0	120,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_0	0,96	s
MDT M_0	29,30	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_0	0,98	s
MTBF M_1	1334,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_1	0,68	s
MDT M_1	57,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_1	0,80	s
MTBF M_2	371,20	s
α -Wert der Weibullverteilung für MTBF M_2	0,76	s
MDT M_2	22,40	s
α -Wert der Weibullverteilung für MDT M_2	0,75	s
$B_{\text{set}} T_0$	800	Fl.
$C T_0$	1.000	Fl.
$B_{\text{set}} T_1$	300	Fl.
$C T_1$	1.000	Fl.
$l_0 T_0$ und T_1	4,770	m
$l_1 T_0$ und T_1	5,850	m
$l_2 T_0$ und T_1	1,170	m
$b_0 T_0$ und T_1	0,354	m
$b_1 T_0$ und T_1	0,319	m
$b_2 T_0$ und T_1	0,385	m
$q_{\text{max}} M_0$	19.500	Fl./h
$q_{\text{max}} M_1$	15.000	Fl./h
$q_{\text{max}} M_2$	19.500	Fl./h
Versuchszeit	604.800	s