

**DISSERTATION**



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN**

**VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY**

# **Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes von Materialflusselementen mittels diskreter Simulation**

**ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der technischen Wissenschaften**

**unter der Leitung von**

**O. Univ. Prof. Dipl. - Ing. Dr. techn. Bruno Grösel**

**am Institut für**

**Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik (E 307)**

**eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

**von**

**Dipl.- Ing. Klaus Decker**

**Matrikelnummer: 9826297**

**Marbach am Walde 14, 3911 Rappottenstein**

**Wien, im August 2006**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Klaus Decker', positioned above a horizontal dotted line.

**Diese Dissertation haben begutachtet:**

Two handwritten signatures in black ink, positioned above horizontal dotted lines, representing the reviewers of the dissertation.

# **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik der Technischen Universität Wien.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinem Dissertationsbetreuer, Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bruno Grösel, recht herzlich für die hilfreichen Diskussionen und die fachliche Unterstützung bedanken.

Herrn Hon.Prof. Dr.phil. Wolfgang Katzenberger danke ich für die Übernahme der Zweitbegutachtung.

Mein Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.-Ing. habil. Karl Heinz Weigl für die Hilfestellungen und Anregungen bei der Entwicklung der Arena-Module.

Ein ganz besonderes Dankeschön geht an meine Eltern für die Unterstützung während meiner gesamten Ausbildungszeit.

## Kurzfassung

Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich mit Durchsatzuntersuchungen von Materialflusssystemen.

Ziel ist es, ein auf der diskreten Simulationstechnik basierendes Planungswerkzeug zu entwickeln, mit dem der technische Durchsatz, für den die Elemente eines Materialflusssystems ausgelegt sein müssen, bestimmt werden kann, damit an der Senke ein geforderter Durchsatz ankommt.

Dieses Planungsinstrument wird durch den interaktiven Einsatz der drei Softwareprogramme ARENA, Visual Basic for Applications und Microsoft Excel realisiert. Dabei wird der erforderliche technische Durchsatz iterativ ermittelt.

Mit dem entwickelten Simulationswerkzeug können aber auch „klassische“ Simulationsläufe durchgeführt werden, bei denen der Anlagendurchsatz für eine bestimmte Systemkonfiguration ermittelt wird.

In beiden Anwendungsfällen ist es möglich, nicht nur Störungen der Materialflusskomponenten und Puffer mit beschränkten Kapazitäten, sondern auch redundant ausgeführte Transportmittel, bzw. Bedienstationen zu berücksichtigen.

In Hinblick auf eine möglichst rasche und benutzerfreundliche Erstellung der Simulationsmodelle werden im Rahmen der Arbeit Module entwickelt, die in einer Bibliothek abgelegt werden können und somit immer wieder verwendbar sind. Die Eingabe der Parameterwerte erfolgt in übersichtlich gestalteten Dialogboxen.

Nach einer umfangreichen Validationsphase der Module wird die Leistungsfähigkeit des Planungsinstruments an einigen Beispielen demonstriert. Dabei werden die Simulationsergebnisse den Ergebnissen einfacher Berechnungsverfahren gegenübergestellt, wobei diese nur sehr begrenzt anwendbar sind.

Anhand dieser Beispiele kann sehr anschaulich gezeigt werden, dass der erforderliche technische Durchsatz von Anlagenkomponenten wesentlich vom Störungsverhalten der Materialflusselemente, von den Pufferkapazitäten und der Anordnung der Puffer in der Anlage, sowie von den Verteilungsfunktionen der Prozesszeiten und der Systemstruktur selbst (mit/ohne Redundanzen) beeinflusst wird.

# **Abstract**

This thesis deals with the investigation of the throughput of material flow systems. The aim is the development of a planning tool which is based on discrete-event system simulation.

This tool should make it possible to determine the necessary technical throughput of material flow elements. Thereby a demanded throughput of the system should be achieved.

This simulation tool is realized by the interactive employment of the three software packages ARENA, Visual Basic for Applications und Microsoft Excel. The necessary technical throughput is determined by use of an iteration loop.

On the other hand the developed planning tool can also be used for common simulation runs. In this case the throughput will be examined for a certain system configuration.

In both applications it is possible to consider failures of the elements, buffer with limited capacities and redundancies of means of transport and working stations.

In order to be able to provide the simulation models rapidly and user friendly, modules are developed in the course of this paper. These modules are archived in a library, so that they can arbitrarily often be used. The input of the parameter values takes place in clearly arranged dialogue boxes.

After an extensive validation of the modules the efficiency of the planning instrument is demonstrated by some examples. The simulation results are compared with the results of analytical methods. The disadvantage of these methods is, that they can only be used if certain conditions are fulfilled.

By means of these examples it can be shown that the necessary technical throughput of the material flow elements is affected substantially by the failure behaviour of the elements, by the buffer capacities and the locations of the buffers in the plant, as well as by the distribution functions of the process times and the system structure (with/without redundancies).

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>IV</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>X</b>
<b>FORMELZEICHEN</b>	<b>XI</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 BEGRIFFSDEFINITIONEN</b>	<b>3</b>
<b>3 EINFLUSSGRÖßEN AUF DEN DURCHSATZ</b>	<b>6</b>
3.1 Allgemeines	6
3.2 Unterbrechungen im Materialfluss	9
3.2.1 Definitionen	9
3.2.2 Systembedingte Wartezeiten	9
3.2.3 Störungen	14
3.2.4 Wirkungslose Puffer	19
3.3 Auslastungsgrade der Materialflusskomponenten	21
3.4 Systemstruktur des Materialflusssystems	21
3.4.1 Linienstruktur	21
3.4.2 Parallelstruktur	22
<b>4 ANALYTISCHE BESTIMMUNG DES ERFORDERLICHEN TECHNISCHEN DURCHSATZES</b>	<b>26</b>
4.1 Allgemeines	26
4.2 Analytische Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes von Taktprozessen	26
4.2.1 Reihenschaltung ohne Puffer	26
4.2.2 Reihenschaltung mit Puffer	27
4.3 Auswirkung stochastischer Prozesse auf den erforderlichen technischen Durchsatz	37
4.3.1 Reihenschaltung mit stochastischem Prozess ohne Puffer	37
4.3.2 Reihenschaltung mit stochastischem Prozess und Puffer	39
4.4 Zusammenfassung	43
<b>5 DISKRETE SIMULATION</b>	<b>44</b>
5.1 Begriffsdefinition	44
5.2 Anwendung der diskreten Simulation	48
5.3 Ablauf einer Simulationsstudie	49
5.3.1 Allgemeines	49
5.3.2 Verifikation und Validation	50
5.3.3 Aufbereitung und Interpretation der Ergebnisse	50
5.4 Simulationswerkzeuge	54

<b>6</b>	<b>SIMULATIONSSYSTEM ARENA</b>	<b>57</b>
6.1	Entwicklungsumgebung	57
6.2	Simulationssprache SIMAN	59
6.3	Benutzerdefinierte Module	63
6.4	VBA (Visual Basic for Applications) in Arena	69
<b>7</b>	<b>MODULWELT</b>	<b>72</b>
7.1	Überblick	72
7.2	Bibliothek A	74
7.2.1	Quellenmodul	74
7.2.2	Zwischenmodul	76
7.2.3	Senkenmodul	78
7.3	Bibliothek B	80
7.3.1	Vereinfachter Quellenmodul	80
7.3.2	Vereinfachter Quellenmodul mit kalter Redundanz (kR)	80
7.3.3	Vereinfachter Quellenmodul mit warmer Redundanz (wR)	83
7.3.4	Vereinfachter Quellenmodul mit Verzweigung	85
7.3.5	Vereinfachter Zwischenmodul	87
7.3.6	Vereinfachter Zwischenmodul mit Verzweigung	87
7.3.7	Vereinfachter Zwischenmodul mit Zusammenführung	89
7.3.8	Vereinfachter Zwischenmodul mit kalter Redundanz (kR)	91
7.3.9	Vereinfachter Zwischenmodul mit Zusammenführung und kalter Redundanz (kR)	94
7.3.10	Vereinfachter Zwischenmodul mit warmer Redundanz	96
7.3.11	Vereinfachter Zwischenmodul mit Zusammenführung und warmer Redundanz (wR)	98
7.3.12	Vereinfachter Zwischenmodul mit Zusammenführung und Verzweigung	100
7.3.13	Vereinfachter Senkenmodul	102
7.3.14	Vereinfachter Senkenmodul mit Zusammenführung	103
7.4	Einplanung von Störungen	105
7.4.1	Allgemeines	105
7.4.2	Störungen eines Elements	105
7.4.3	Störungen zweier parallel geschalteter Elemente	106
7.4.4	Störungen zweier Elemente in kalter Redundanz mit Rückschaltbetrieb	107
7.4.5	Störungen zweier Elemente in kalter Redundanz mit Umschaltbetrieb	108
7.4.6	Störungen zweier Elemente in warmer Redundanz	109
<b>8</b>	<b>VALIDATION DER SIMULATIONSMODULE</b>	<b>111</b>
8.1	Allgemeines	111
8.2	Validation von Einzelementen	111
8.2.1	Validation von Einzelementen ohne Störungen	111
8.2.2	Validation von Einzelementen mit Störungen	116
8.3	Validation von Redundanzschaltungen	117
8.3.1	Kalte Redundanz - Rückschaltbetrieb	117
8.3.2	Warme Redundanz	118
8.4	Validation von verketteten Elementen	118
8.4.1	Allgemeines	118
8.4.2	Reihenschaltung von 6 Elementen ohne Puffer und ohne Redundanz (Simulationsexperiment 1)	119
8.4.3	Reihenschaltung von 6 Elementen ohne Puffer mit kaltem Redundanzelement (Simulationsexperiment 2)	120
8.4.4	Reihenschaltung von 6 Elementen ohne Puffer mit warmem Redundanzelement (Simulationsexperiment 3)	121
8.4.5	Reihenschaltung von 6 Elementen mit ausreichend großem Puffer zwischen den beiden Anlagenteilen (Simulationsexperiment 4)	122
8.4.6	Reihenschaltung von 6 Elementen mit beschränkter Kapazität des Puffers zwischen den beiden Anlagenteilen (Simulationsexperiment 5)	124

8.4.7 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	126
8.5 Bestimmung weiterer Einflussgrößen	131
<b>9 PLANUNG VON SIMULATIONSEXPERIMENTEN</b>	<b>135</b>
9.1 Allgemeines	135
9.2 Iterative Parametervariation	136
<b>10 DURCHGEFÜHRTE SIMULATIONSEXPERIMENTE</b>	<b>138</b>
10.1 Kategorie A – klassische Simulation	138
10.1.1 Simulationsbeispiel Taktprozess	138
10.1.2 Simulationsbeispiel stochastischer Prozess	139
10.2 Kategorie B – Parametervariation	140
10.2.1 Aufgabenstellung	140
10.2.2 Durchgeführt Untersuchungen	141
10.2.3 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	160
<b>11 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>165</b>
<b>12 LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>168</b>
 <b>ANHANG A – Illustrationsbeispiel</b>	 <b>170</b>
 <b>ANHANG B – SIMAN-Submodelle</b>	 <b>175</b>
 <b>ANHANG C – VBA-Code iterative Parametervariation</b>	 <b>189</b>

---

**LEBENSLAUF**

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Durchsatzverhältnis $\varphi$ eines Materialflusssystems	5
Abbildung 2: Validation mit Hilfe des Durchsatzverhältnisses $\varphi$	5
Abbildung 3: Einflussgrößen auf den Durchsatz	8
Abbildung 4: Einfaches Bedienungssystem [16]	10
Abbildung 5: Verfügbarkeit über der Zeit	16
Abbildung 6: Zustandsgraph eines binären Systems [16]	17
Abbildung 7: Verfügbarkeitsfunktion über der Zeit für $\gamma = 1$	18
Abbildung 8: Pufferwirkung bei Störung von Element 1 [18]	19
Abbildung 9: Pufferwirkung bei Störung von Element 2 [18]	20
Abbildung 10: Pufferwirkung eines doppelt wirkenden Puffers [18]	20
Abbildung 11: Markoff-Graph und Differentialgleichungen – heiße Redundanz	24
Abbildung 12: Markoff-Graph und Differentialgleichungen – warme Redundanz	24
Abbildung 13: Markoff-Graph und Differentialgleichungen – kalte Redundanz	25
Abbildung 14: Reihenschaltung ohne Puffer	26
Abbildung 15: Reihenschaltung mit Puffer (Zuordnung zu Anlagenteil I)	27
Abbildung 16: Reihenschaltung mit Puffer (Zuordnung zu Anlagenteil II)	29
Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Stördauer [18]	31
Abbildung 18: Dichtefunktion $f(t)$ der Exponentialverteilung	32
Abbildung 19: Verteilungsfunktion $F(t)$ der Exponentialverteilung	32
Abbildung 20: Anlagenkonfiguration Taktprozess	34
Abbildung 21: Überbrückbare Störzeit $f$ in % für die Exponentialverteilung	35
Abbildung 22: Technischer Durchsatz in Abhängigkeit von der Pufferkapazität	35
Abbildung 23: Graphische Nullstellenbestimmung	36
Abbildung 24: Taktprozess / stochastischer Prozess ohne Puffer	37
Abbildung 25: Dichtefunktion $f(t)$	38
Abbildung 26: Verteilungsfunktion $F(t)$	38
Abbildung 27: Taktprozess / stochastischer Prozess mit Puffer	39
Abbildung 28: Überbrückungsanteile	39
Abbildung 29: Anlagenkonfiguration stochastischer Prozess	41
Abbildung 30: Verfügbarkeit $\eta_0$ in Abhängigkeit von $\kappa$	42
Abbildung 31: Überbrückungsanteil $f$	42
Abbildung 32: Erforderlicher technischer Durchsatz	42
Abbildung 33: Möglichkeiten zur Untersuchung von Realsystemen [5]	45
Abbildung 34: Klassifikation von Simulationsmodellen nach 3 Kriterien [7] [4]	46
Abbildung 35: Diskrete Simulation [8]	46
Abbildung 36: Kontinuierliche Simulation [8]	46
Abbildung 37: Möglichkeiten des Experimentierens mit dem Modell [4]	48
Abbildung 38: Struktur einer Simulationsstudie [10]	49
Abbildung 39: Verifikation und Validation eines Simulationsmodells	50



Abbildung 40: t-Verteilungen [22]	53
Abbildung 41: Klassifikation von Simulationswerkzeugen	54
Abbildung 42: Geschichtliche Entwicklung der Simulationssoftware [8]	54
Abbildung 43: Einordnung der Simulationswerkzeuge	55
Abbildung 44: Auswahlkriterien für Simulationswerkzeuge [4]	56
Abbildung 45: Hierarchische Struktur [7]	57
Abbildung 46: Benutzeroberfläche – SERVER-Modul	58
Abbildung 47: Struktur eines SIMAN-Simulationsmodells [10]	59
Abbildung 48: Beispiel eines einfachen SIMAN-Modells	62
Abbildung 49: Moduldefinition – Entwicklungsfenster	63
Abbildung 50: Modellkonzept Palettierereinrichtung	65
Abbildung 51: Operand Window Palettierereinrichtung	66
Abbildung 52: Logic Window Palettierereinrichtung	66
Abbildung 53: User View Window Palettierereinrichtung	67
Abbildung 54: Panel Icon Window Palettierereinrichtung	67
Abbildung 55: Modul Palettierereinrichtung	68
Abbildung 56: VBA-Editor	69
Abbildung 57: VBA-Ereignisse während eines Simulationslaufes [7]	70
Abbildung 58: Überblick Modulwelt	72
Abbildung 59: Modellkonzept Quellenmodul	74
Abbildung 60: Computermodell Quellenmodul	74
Abbildung 61: Dialogbox Quellenmodul	75
Abbildung 62: Animationselemente Quellenmodul	75
Abbildung 63: Modellkonzept Zwischenmodul	76
Abbildung 64: Computermodell Zwischenmodul	76
Abbildung 65: Dialogbox Zwischenmodul	77
Abbildung 66: Animationselemente Zwischenmodul	77
Abbildung 67: Modellkonzept Senkenmodul	78
Abbildung 68: Computermodell Senkenmodul	78
Abbildung 69: Dialogbox Senkenmodul	79
Abbildung 70: Animationselemente Senkenmodul	79
Abbildung 71: Animationselemente vereinfachter Quellenmodul	80
Abbildung 72: Modellkonzept vereinfachter Quellenmodul kR	80
Abbildung 73: Computermodell vereinfachter Quellenmodul kR	81
Abbildung 74: Dialogbox vereinfachter Quellenmodul kR	81
Abbildung 75: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Quellenmodul kR	82
Abbildung 76: Animationselemente vereinfachter Quellenmodul kR	82
Abbildung 77: Modellkonzept vereinfachter Quellenmodul wR	83
Abbildung 78: Computermodell vereinfachter Quellenmodul wR	83
Abbildung 79: Dialogbox vereinfachter Quellenmodul wR	84

Abbildung 80: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Quellenmodul wR	84
Abbildung 81: Modellkonzept vereinfachter Quellenmodul Verzweigung	85
Abbildung 82: Computermodell vereinfachter Quellenmodul Verzweigung	85
Abbildung 83: Dialogbox vereinfachter Quellenmodul Verzweigung	86
Abbildung 84: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Quellenmodul Verzweigung	86
Abbildung 85: Animationselemente vereinfachter Zwischenmodul	87
Abbildung 86: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Verzweigung	87
Abbildung 87: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Verzweigung	88
Abbildung 88: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Verzweigung	88
Abbildung 89: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul Verzweigung	89
Abbildung 90: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung	89
Abbildung 91: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung	90
Abbildung 92: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung	90
Abbildung 93: Animationselemente vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung	91
Abbildung 94: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul kR	91
Abbildung 95: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul kR	92
Abbildung 96: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul kR	92
Abbildung 97: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul kR	93
Abbildung 98: Animationselemente vereinfachter Zwischenmodul kR	93
Abbildung 99: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR	94
Abbildung 100: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR	94
Abbildung 101: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR	95
Abbildung 102: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR	95
Abbildung 103: Animationselemente vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR	96
Abbildung 104: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul wR	96
Abbildung 105: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul wR	97
Abbildung 106: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul wR	97
Abbildung 107: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul wR	98
Abbildung 108: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung wR	98
Abbildung 109: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung wR	99
Abbildung 110: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung wR	99
Abbildung 111: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung wR	100
Abbildung 112: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung-Verzweigung	100

Abbildung 113: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung-Verzweigung	101
Abbildung 114: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung-Verzweigung	101
Abbildung 115: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung-Verzweigung	102
Abbildung 116: Animationselemente vereinfachter Senkenmodul	102
Abbildung 117: Modellkonzept vereinfachter Senkenmodul Zusammenführung	103
Abbildung 118: Computermodell vereinfachter Senkenmodul Zusammenführung	103
Abbildung 119: Dialogbox vereinfachter Senkenmodul Zusammenführung	104
Abbildung 120: Animationselemente vereinfachter Senkenmodul Zusammenführung	104
Abbildung 121: Störungsfestlegung eines Elements	105
Abbildung 122: Störungsverhalten eines Einzelelements	106
Abbildung 123: Störungsfestlegung zweier parallel geschalteter Elemente	106
Abbildung 124: Störungsverhalten zweier parallel geschalteter Elemente	106
Abbildung 125: Störungsfestlegung zweier Elemente in kalter Redundanz - RSB	107
Abbildung 126: Störungsverhalten zweier Elemente in kalter Redundanz - RSB	107
Abbildung 127: Störungsfestlegung zweier Elemente in kalter Redundanz - USB	108
Abbildung 128: Störungsverhalten zweier Elemente in kalter Redundanz - USB	108
Abbildung 129: Störungsfestlegung zweier Elemente in warmer Redundanz	109
Abbildung 130: Störungsverhalten zweier Elemente in warmer Redundanz	109
Abbildung 131: Ausfallverhalten einer warmen Redundanzschaltung	110
Abbildung 132: Gegenüberstellung Simulation – Warteschlangentheorie, Diagramm 1	114
Abbildung 133: Gegenüberstellung Simulation – Warteschlangentheorie, Diagramm 2	115
Abbildung 134: Störung der Bedienstation (MTBF=50 – Exponentialverteilung)	116
Abbildung 135: Störung des Transportmittels (MTBF=50 – Exponentialverteilung)	116
Abbildung 136: Störung des Puffers (MTBF=50 – Exponentialverteilung)	117
Abbildung 137: Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in kalter Redundanz	117
Abbildung 138: Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in warmer Redundanz	118
Abbildung 139: 6 Elemente ohne Puffer und ohne Redundanz	119
Abbildung 140: 6 Elemente ohne Puffer mit kaltem Redundanzelement	120
Abbildung 141: 6 Elemente ohne Puffer mit warmem Redundanzelement	121
Abbildung 142: 6 Elemente mit unbeschränktem Puffer	122
Abbildung 143: 6 Elemente mit beschränktem Puffer	124
Abbildung 144: Gegenüberstellung der Ergebnisse verketteter Elemente	126
Abbildung 145: Arbeitsweise analytisches Berechnungsverfahren ohne Bereitstellungsplatz	127
Abbildung 146: Arbeitsweise Realsystem mit Bereitstellungsplatz vor jedem Element (Pufferkapazität = 1)	127
Abbildung 147: Darstellung der Betriebsweise des Realsystems (Simulationsmodells)	128
Abbildung 148: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 1	129
Abbildung 149: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 2	129

Abbildung 150: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 3	129
Abbildung 151: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 4	130
Abbildung 152: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 5	130
Abbildung 153: Variation der Elementanzahl	131
Abbildung 154: Simulationsergebnisse bei Gesamtverfügbarkeit 0,8	132
Abbildung 155: Simulationsergebnisse bei Gesamtverfügbarkeit 0,9	133
Abbildung 156: Empirisch ermittelter Korrekturfaktor	134
Abbildung 157: Simulationsexperimente Kategorie A	135
Abbildung 158: Simulationsexperimente Kategorie B	135
Abbildung 159: Schema der iterativen Parametervariation	136
Abbildung 160: Interaktion der verwendeten Softwareprogramme	137
Abbildung 161: Simulationsergebnisse Taktprozess	138
Abbildung 162: Simulationsergebnisse stochastischer Prozess	139
Abbildung 163: Basissystem und Anlagenkonfigurationen	140
Abbildung 164: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse aller Anlagenkonfigurationen	160
Abbildung 165: Erreichter Anlagendurchsatz für jede Anlagenkonfiguration	160
Abbildung 166: Anlagenkonfiguration 1 / 10	161
Abbildung 167: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 1 / 10	161
Abbildung 168: Anlagenkonfiguration 4 / 13	162
Abbildung 169: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 4 / 13	162
Abbildung 170: Anlagenkonfiguration 7 / 16	162
Abbildung 171: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 7 / 16	162
Abbildung 172: Anlagenkonfigurationen 2 / 11	163
Abbildung 173: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 2 / 11	163
Abbildung 174: Anlagenkonfiguration 5 / 14	163
Abbildung 175: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 5 / 14	163
Abbildung 176: Anlagenkonfiguration 8 / 17	163
Abbildung 177: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 8 / 17	163
Abbildung 178: Anlagenkonfiguration 2	164
Abbildung 179: Ergebnisse Pufferanordnung 2	164
Abbildung 180: Anlagenkonfiguration 11	164
Abbildung 181: Ergebnisse Pufferanordnung 11	164
Abbildung 182: Illustrationsbeispiel – Simulationsergebnisse	174
Abbildung 183: Submodell 1 – Quelle	176
Abbildung 184: Submodell 2 – Conveyor Quellenmodul	176
Abbildung 185: Submodell 3 - Bedienstation	176
Abbildung 186: Submodell 4 – Berechnung Auslastungsgrade	177
Abbildung 187: Submodell 5 – Pufferfüllung	177
Abbildung 188: Submodell 6 – Störungsdefinition Conveyor	177
Abbildung 189: Submodell 7 – Störungsdefinition Bedienstation	178
Abbildung 190: Submodell 8 – Berechnung Zeiten Conveyor	178

Abbildung 191: Submodell 9 – Berechnung Zeiten Bedienstation	178
Abbildung 192: Submodell 10 – Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Conveyor	179
Abbildung 193: Submodell 11 – Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Bedienstation	179
Abbildung 194: Submodell 13 – Berechnung Zeitanteile Puffer leer/voll	179
Abbildung 195: Submodell 13 – Berechnung mittlere Warteschlangenlänge	179
Abbildung 196: Submodell 14 – Conveyor Zwischenmodul	180
Abbildung 197: Submodell 15 – Conveyor Senkenmodul	180
Abbildung 198: Submodell 16 – Berechnung Auslastungsgrad	180
Abbildung 199: Submodell 17 – Senke	181
Abbildung 200: Submodell 18 – Verzweigung kR	181
Abbildung 201: Submodell 19 – Verzweigung wR	182
Abbildung 202: Submodell 20 – Umschaltung Teillast/Vollastbetrieb	183
Abbildung 203: Submodell 21 – Störungsdefinition Conveyor wR A	183
Abbildung 204: Submodell 22 – Störungsdefinition Conveyor wR B	184
Abbildung 205: Submodell 23 – Störungsdefinition Bedienstation wR Fo	184
Abbildung 206: Submodell 24 – Störungsdefinition Bedienstation wR B	185
Abbildung 207: Submodell 25 – Zusammenführung z	185
Abbildung 208: Submodell 26 – Zusammenführung zR	185
Abbildung 209: Submodell 27 – Conveyor Zwischenmodul z	186
Abbildung 210: Submodell 28 – Conveyor Zwischenmodul zR	186
Abbildung 211: Submodell 29 – Zusammenführung Senke	186
Abbildung 212: Submodell 30 – Störungsdefinition Puffer	187
Abbildung 213: Submodell 31 – Berechnung Verfügbarkeit Puffer	187
Abbildung 214: Submodell 32 – Verzweigung	188

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierte Daten der Stördauer [18]	30
Tabelle 2: Ergebnisse des Berechnungsverfahrens für Taktprozesse	34
Tabelle 3: Ergebnisse des Berechnungsverfahrens für stochastischen Prozess	42
Tabelle 4: Beispiele kritischer Werte für die Normalverteilung [22]	52
Tabelle 5: Beispiele kritischer Werte für die t-Verteilung [22]	53
Tabelle 6: Operation-Blöcke	60
Tabelle 7: Transfer-Blöcke	60
Tabelle 8: Hold-Block	60
Tabelle 9: Queue-Block	60
Tabelle 10: Branch-Block	60
Tabelle 11: SIMAN-Elemente	61
Tabelle 12: SIMAN-Variablen	61
Tabelle 13: Eingabeparameter Palettiereinrichtung	65
Tabelle 14: Eingabeparameter für Warteschlangenmodelle	111
Tabelle 15: Eingabeparameter M M 1 - Warteschlangenmodell	112
Tabelle 16: Eingabeparameter M Ek 1 - Warteschlangenmodell	112
Tabelle 17: Eingabeparameter M D 1 - Warteschlangenmodell	113
Tabelle 18: Eingabeparameter G G 1 - Warteschlangenmodell	113
Tabelle 19: Eingabeparameter D D 1 - Warteschlangenmodell	114
Tabelle 20: MTBF und MTTR Simulationsexperiment 1	119
Tabelle 21: MTTR und MTBF Simulationsexperiment 2	120
Tabelle 22: MTBF und MTTR Simulationsexperiment 3	122
Tabelle 23: MTBF und MTTR Simulationsexperiment 4	123
Tabelle 24: MTBF und MTTR Simulationsexperiment 5	125
Tabelle 25: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,8	132
Tabelle 26: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,8 und H=10	132
Tabelle 27: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,8 und H=20	132
Tabelle 28: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,8 und H=30	132
Tabelle 29: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,9	133
Tabelle 30: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,9 und H=10	133
Tabelle 31: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,9 und H=20	133
Tabelle 32: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,9 und H=30	133
Tabelle 33: Zusammenfassung der Parameter der Simulationsexperimente	138
Tabelle 34: Zusammenfassung der Parameter der Simulationsexperimente	139
Tabelle 35: Illustrationsbeispiel - Eingabeparameter Transportmittel	172
Tabelle 36: Illustrationsbeispiel - Eingabeparameter Bedienstationen	172
Tabelle 37: Illustrationsbeispiel - Eingabeparameter Puffer	172
Tabelle 38: Illustrationsbeispiel - Simulationsergebnisse	174

## Formelzeichen

$\phi$	Durchsatz
$\phi_G$	Grenzdurchsatz
$\phi_{\text{tech}}$	technischer Durchsatz
$\varphi$	Durchsatzverhältnis
$\eta$	Verfügbarkeit eines Elements oder eines Systems (im engl. Sprachraum mit "A" ... availability gekennzeichnet)
$\phi_{mA}$	mittlerer Durchsatz am Systemausgang
$\phi_{mE}$	mittlerer Durchsatz am Systemeingang
$T$	Betrachtungszeitraum (Simulationsdauer im eingeschwungenen Zustand)
$A$	Anzahl der aus dem System austretenden Fördereinheiten
$E$	Anzahl der in das System eintretenden Fördereinheiten
$T_O$	organisatorische Ausfallzeit
$T_T$	technische Ausfallzeit
$T_W$	Wartungszeit
$T_N$	Nutzungszeit
$T_B$	Belegungszeit
$A_O$	organisatorische Ausfallrate
$A_T$	technische Ausfallrate
$A_W$	wartungsbedingte Ausfallrate
$N_G$	Gesamtnutzungsgrad
$V_T$	technische Verfügbarkeit des Einzelements (auch mit $\eta$ bezeichnet)
$T_E$	Einsatzzeit

$T_A$	Ausfallzeit
MTBF	mittlere störungsfreie Zeit (Mean Time Between Failures)
MTTR	mittlere Störungsdauer (Mean Time To Repair)
TBF	störungsfreie Zeit (Time Between Failures)
TTR	Störungsdauer (Time To Repair)
$\alpha$	Ausfallrate
$\alpha_{TL}$	Ausfallrate im Teillastbetrieb bei warmer Redundanz
$\alpha_{VL}$	Ausfallrate im Vollastbetrieb bei warmer Redundanz
$\beta$	Reparaturreate
$V(t)$	Verfügbarkeitsfunktion
$W(t)$	Nicht-Verfügbarkeitsfunktion
$\gamma$	Wahrscheinlichkeit der Verfügbarkeit zum Zeitpunkt $t=0$
$t_a$	Zwischenankunftszeit an der Systemgrenze a
$E(t_a)$	Erwartungswert der Zwischenankunftszeit an der Systemgrenze a
$\lambda$	Ankunftsrate
$t_b$	Bedienzeit
$t_t$	Transportzeit
$E(t_b)$	Erwartungswert der Bedienzeit
$E(t_t)$	Erwartungswert der Transportzeit
$\mu_b$	Bedienrate



$\mu_t$	Transportrate
$\rho_b$	Auslastungsgrad des Bediensystems
$\rho_t$	Auslastungsgrad des Transportsystems
$N_s$	mittlere Anzahl der Fördereinheiten im Bedienungssystem (Warteraum und Bedienstation)
$N_w$	mittlere Anzahl der Fördereinheiten im Warteraum
$t_s$	mittlere Verweilzeit der Fördereinheiten im Bedienungssystem (Warteraum und Bedienstation)
$t_w$	mittlere Verweilzeit der Fördereinheiten im Warteraum
$\kappa$	Quotient aus den Erwartungswerten der Bedienzeiten eines stochastischen Prozesses und eines Taktprozesses
$T_t$	Taktzeit
$\text{Var}(t_a)$	Varianz der Zwischenankunftszeit an der Systemgrenze a
$\text{Var}(t_b)$	Varianz der Bediendauer
$v_a$	Variationskoeffizient des Ankunftsprozesses (Einlaufvariabilität)
$v_b$	Variationskoeffizient des Bedienprozesses (Abfertigungsvariabilität)
$f_v$	Variationskennwert
$\delta$	Verhältniswert Ausfallrate zu Bedienrate (bzw. Ausfallrate zu Transportrate)
$V$	Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in Redundanz (auch mit $\eta$ bezeichnet)
$\beta_{TL}$	Winkel der Ausfallgerade im Teillastbetrieb bei warmer Redundanz
$\beta_{VL}$	Winkel der Ausfallgerade im Volllastbetrieb bei warmer Redundanz
$N$	Stichprobenumfang

$n$	Anzahl aller möglichen Stichproben, die aus einer Grundgesamtheit gezogen werden können
$N_p$	Umfang der Grundgesamtheit
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert einer Stichprobe vom Umfang $N$
$s$	Standardabweichung einer Stichprobe vom Umfang $N$
$\mu_{\bar{x}}$	arithmetischer Mittelwert der Stichprobenverteilung der Mittelwerte $\bar{x}_j$
$\sigma_{\bar{x}}$	Standardabweichung der Stichprobenverteilung der Mittelwerte $\bar{x}_j$
$\mu_G$	arithmetischer Mittelwert der Grundgesamtheit
$\sigma_G$	Standardabweichung der Grundgesamtheit
$z_k$	kritischer Wert für die Normalverteilung (abhängig vom Konfidenzniveau)
$t_k$	kritischer Wert für die $t$ -Verteilung (abhängig vom Konfidenzniveau)
$v$	Freiheitsgrad der $t$ -Verteilung
$o$	Anzahl der Materialflusselemente in Reihenschaltung
$p$	Anzahl der Materialflusselemente vor einem Puffer
$f$	Anteil der Stör-, bzw. Bedienzeiten, die durch einen Puffer überbrückt werden
$x$	Pufferkapazität in Zeiteinheiten
$H$	Vielfachheit der mittleren Reparaturdauer (MTTR)
$S$	Störungshäufigkeit (Anzahl der Störungen pro Stunde)
$\varepsilon$	Faktor zur Korrektur des Berechnungsverfahrens

# 1 Einleitung

Durch den steigenden Wettbewerbsdruck am Markt und die dadurch hervorgerufenen kurzen Produktlebenszyklen steht für die Planungsphase eines Materialflusssystems immer weniger Zeit zur Verfügung. Hinzu kommt, dass die Material- und Informationsflüsse immer flexibler und damit komplexer gestaltet werden müssen, um auf Kundenwünsche und Marktgegebenheiten rasch reagieren zu können.

Planungsfehler können drastische Auswirkungen auf die Systemleistung einer Materialflussanlage haben. Beispielsweise können sich Blockierungen durch zu klein dimensionierte Zwischenpuffer ungünstig auf die Kapazitätsauslastung eines Unternehmens auswirken und damit die Kapitalumlaufgeschwindigkeit vermindern.

Die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit eines Betriebes wird somit stark von der Gestaltung und Organisation des Materialflusses beeinflusst.

Viele Vorgänge in Materialflusssystemen sind stochastischer Natur. Als Beispiel seien zufällig auftretende Störungen und stochastische Reparatur- und Bedienprozesse angeführt. Der stationäre Zustand solcher Systeme kann, unter bestimmten Voraussetzung, mit Hilfe der sog. Warteschlangentheorie analytisch untersucht werden. Diese Theorie versagt jedoch, sobald die Systeme komplizierter aufgebaut sind und viele Interaktionen zwischen den Systemelementen aufweisen. Deshalb bedarf es anderer Planungshilfsmittel. Ein Hilfsmittel, das immer häufiger zum Einsatz kommt, ist die rechnergestützte, diskrete Simulation. Diese wird unter anderem dann angewendet, wenn komplexe Zusammenhänge untersucht werden sollen, die die menschliche Vorstellungskraft überfordern. Weiters kann das Verhalten einer Anlage über beliebig lange Zeiträume hinweg untersucht und die Auswirkung zufälliger Ereignisse überprüft werden. Hierfür wird das reale oder zu planende System in abstrahierter Form in einem ComputermodeLL abgebildet und Simulationsexperimente durchgeführt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können dann Rückschlüsse auf das Systemverhalten der Anlage gezogen werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Durchsatzuntersuchungen von Materialflusssystemen.

In der Planungsphase einer Anlage ist man sehr oft damit konfrontiert, die einzelnen Komponenten (z.B. Förderbänder, Bearbeitungsstationen), unter Berücksichtigung von Störungen und Puffern, so zu dimensionieren, dass ein geforderter Durchsatz erreicht wird. Dies kann, unter bestimmten Voraussetzungen, analytisch erfolgen (siehe Kapitel 4).

Ziel der Arbeit ist es, ein auf der diskreten Simulation basierendes Planungstool zu entwickeln, mit dem der technische Durchsatz, für den die Materialflusskomponenten ausgelegt sein müssen, bestimmt werden kann, damit an der Senke ein geforderter Durchsatz ankommt.

Dabei sollen nicht nur Störungen der Materialflusskomponenten (berücksichtigt durch die technische Verfügbarkeit) und Puffer mit beschränkten Kapazitäten, sondern auch redundant ausgeführte Transport<sup>1)</sup>, bzw. Bedienelemente<sup>2)</sup> berücksichtigt werden.

Ein besonderer Wert wird auf eine möglichst rasche und benutzerfreundliche Modellerstellung durch vordefinierte Module und auf die Visualisierung des Materialflusssystems gelegt. Des Weiteren soll die Planung der Simulationsexperimente sowie die Ergebnisaufbereitung und –darstellung möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen.

Arbeitsschwerpunkte:

- Eruierung der wichtigsten Einflussgrößen auf den Durchsatz eines Materialflusssystems
- Untersuchung analytischer Bestimmungsmöglichkeiten des erforderlichen technischen Durchsatzes (Weiterentwicklung bestehender Berechnungsverfahren, Aufzeigen der Grenzen der Berechnungsverfahren)
- Entwicklung von Simulationsmodulen mit dem Simulationssystem ARENA 7.01 PE zur raschen und benutzerfreundlichen Modellerstellung inklusive Animation und Dialogboxen für die Parametereingabe
- Validation der Module durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen analytischer Verfahren (z.B. Warteschlangentheorie)
- Experimentplanung (z. B. mittels der Software Visual Basic for Applications – VBA)
- Durchführung von Simulationsexperimenten und Interpretation der Ergebnisse (Vergleich mit analytischen Ergebnissen)
- Zusammenfassung der aus den Experimenten ableitbaren Aussagen

---

<sup>1)</sup> ... auch als Transportmittel bezeichnet (es findet ein Transport zwischen zwei Stationen statt)

<sup>2)</sup> ... auch als Bedienstation bezeichnet (es findet ein Vorgang in einer Station statt, der eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt)

## 2 Begriffsdefinitionen

**Materialfluss** ... ist die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten, sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Dazu gehören im Einzelnen: Bearbeiten, Handhaben, Transportieren, Prüfen, die Aufenthalte und die Lagerung [1].

Diese Grundfunktionen eines Materialflusssystems können im Wesentlichen mit den Simulationsmodulen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, abgebildet werden (siehe Kapitel 7).

**Rechnergestützte, diskrete Simulation** ... Nachbildung von Systemen in einem experimentierbaren Computermode, wobei sich die Variablen, die den Zustand des Systems vollständig beschreiben, nur zu bestimmten Zeitpunkten (Ereignissen) ändern und nur bestimmte Werte annehmen können (siehe Kapitel 5)

**Durchsatz  $\phi$**  ... ist die pro Zeiteinheit bewegte Menge an Fördergut ( $[\phi] = 1/\text{Zeiteinheit}$ ) [4]

**Grenzdurchsatz  $\phi_G$**  ... die durch die Konstruktion und Ausführung eines Förderers, bzw. einer Bedienstation gesetzte Grenze für den Durchsatz (technisch möglicher Durchsatz) [21]

**Technischer Durchsatz  $\phi_{\text{tech}}$**  ... erforderlicher Durchsatz der Transportmittel, bzw. Bedienstationen, damit an der Senke der Anlage, unter Berücksichtigung von Störungen, Puffern und gegebenenfalls Redundanzelementen, ein gewünschter Solldurchsatz ankommt ( $\phi_{\text{tech}} \leq \phi_G$ )

**Puffer** ... Anlagenbereich zur vorübergehenden Ansammlung von Fördergut. Das Fördergut wartet lediglich auf seine Verwendung [21]

**Pufferkapazität** ... Aufnahmevermögen eines Puffers in Stück [21]

**Verfügbarkeit  $\eta$**  ... ist die Wahrscheinlichkeit, ein Element oder ein System zu einem vorgegebenen Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen [18]  
(siehe Kapitel 3.2.3)

**Redundanzelement** ... zusätzliches („überzähliges“) Element, welches dieselbe Funktion ausführt, wie das ursprüngliche Element; Maßnahme zur Erhöhung der Gesamtverfügbarkeit [19] (siehe Kapitel 3.4.2)

**MTBF** ... mittlere störungsfreie Zeit (Mean time between failures). Begriff aus der Verfügbarkeitsrechnung [21]

(siehe Kapitel 3.2.3)

**MTTR** ... mittlere Reparaturzeit zur Behebung der Störung (Mean time to repair), entspricht der mittleren Ausfallzeit (Stördauer). Begriff aus der Verfügbarkeitsrechnung [21]

(siehe Kapitel 3.2.3)

**Ausfallrate**  $\alpha$  ... entspricht dem Kehrwert der mittleren störungsfreien Zeit =  $1/\text{MTBF}$

(siehe Kapitel 3.2.3)

**Reparaturreate**  $\beta$  ... entspricht dem Kehrwert der mittleren Reparaturzeit =  $1/\text{MTTR}$

(siehe Kapitel 3.2.3)

**Ankunftsrate**  $\lambda$  ... Anzahl der im Mittel pro Zeiteinheit ankommenden Fördereinheiten

(siehe Kapitel 3.2.2)

**Bedienrate**  $\mu$  ... Anzahl der im Mittel pro Zeiteinheit bedienbaren Fördereinheiten

(siehe Kapitel 3.2.2)

**Auslastungsgrad**  $\rho$  ... Quotient aus Ankunfts- und Bedienrate =  $\lambda/\mu$

(siehe Kapitel 3.2.2)

**Quelle** ... Schnittstelle einer Förderanlage zur Umwelt, an der das Fördergut an die Förderanlage übergeben wird [21]

**Senke** ... Schnittstelle einer Förderanlage zur Umwelt, an der das Fördergut die Anlage verlässt [21]

**Durchlaufzeit** ... Zeitspanne von der Aufnahme eines Fördergutes an der Quelle bis zur Abgabe (zum Verlassen des Systems) an der Senke [21]

**Volllast** ... Betriebszustand eines Systems bei der vorgesehenen Höchstbelastung [21]

**Teillast** ... Betriebszustand eines Systems unterhalb der Volllast [21]

**Durchsatzverhältnis  $\varphi$**  ... ist das Verhältnis des mittleren Durchsatzes am Systemausgang  $\phi_{mA}$  zum mittleren Durchsatz am Systemeingang  $\phi_{mE}$  während eines bestimmten Betrachtungszeitraumes  $T$  (Simulationsdauer), wobei das Materialflusssystem nur im eingeschwungenen Zustand betrachtet wird, also weder das Füllen-, noch das Leeren der Anlage berücksichtigt wird. Dieser sog. „Steady State“ wird durch einen Simulationslauf ermittelt, d.h. es wird der Kurvenverlauf der interessierenden Kenngröße über der Zeit betrachtet und der Anfangszeitpunkt für den eingeschwungenen Zustand festgelegt (siehe folgende Abbildung).

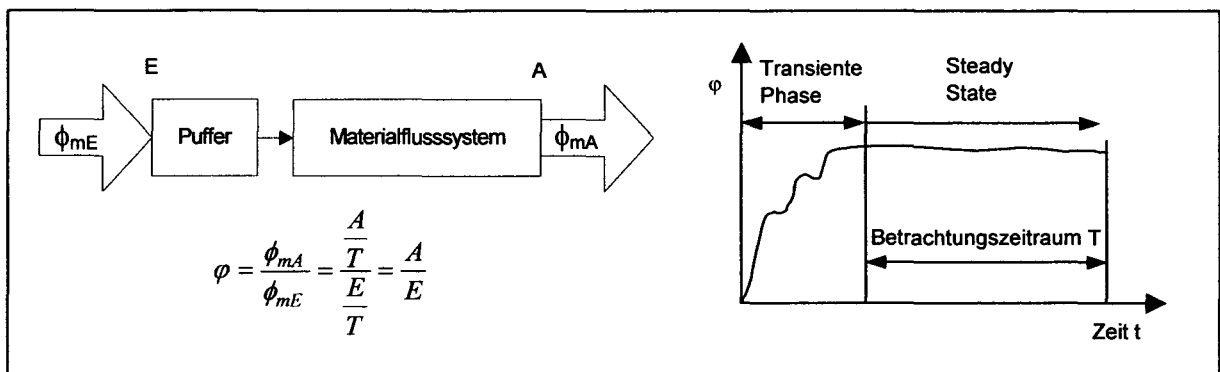


Abbildung 1: Durchsatzverhältnis  $\varphi$  eines Materialflusssystems

Das Durchsatzverhältnis kann vereinfacht auch durch das Verhältnis Anzahl der aus dem System austretenden Fördereinheiten  $A$  zur Anzahl der in das System eintretenden Fördereinheiten  $E$  ausgedrückt werden, wenn für die Berechnung der mittleren Durchsätze am Systemeingang und am Systemausgang jeweils das gleiche Zeitintervall  $T$  betrachtet wird.

Dieser Kennwert kann in der Validationsphase der Simulationsmodelle sehr nützlich sein. Will man beispielsweise überprüfen, ob Störungen im Computermode richtig eingeplant wurden, so ist lediglich das Durchsatzverhältnis  $\varphi$  (Ergebnisgröße der Simulation) mit dem theoretischen Wert der Verfügbarkeit  $\eta$  zu vergleichen.

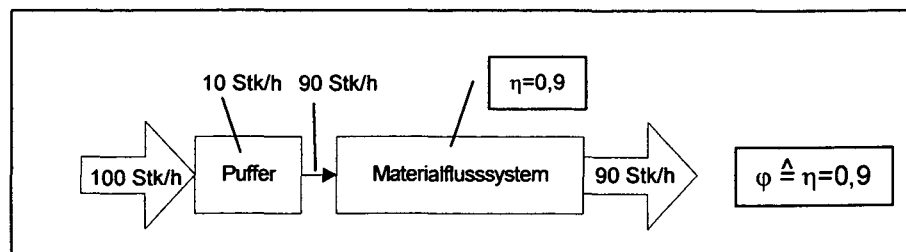


Abbildung 2: Validation mit Hilfe des Durchsatzverhältnisses  $\varphi$

## 3 Einflussgrößen auf den Durchsatz

### 3.1 Allgemeines

Ziel in der Planung des Materialflusses ist es, ein gleichmäßiges Fließen der Objekte mit möglichst kurzen Durchlaufzeiten und kleinen Lagerbeständen im System zu erreichen. Dies ist vergleichbar mit einem Fluss: Es geht darum, dass das Wasser ohne Stausee und ohne Wasserfälle mit möglichst gleich bleibender Geschwindigkeit das Meer erreicht [3].

System- und störungsbedingt kann es jedoch zu Unterbrechungen im Materialfluss kommen, wodurch der Durchsatz der Anlage verringert wird.

Im folgenden Abschnitt werden jene Größen angeführt, die den Durchsatz beeinflussen können:

#### Systembedingte Wartezeiten:

Durch stochastische Ankunfts- und Bedienprozesse kann es zu Unterbrechungen im Materialfluss kommen. Ist beispielsweise die Bediendauer zu einem bestimmten Zeitpunkt zufällig länger als die Zwischenankunftszeit vor der Bedienstation (Bedienvorgang dauert länger), kommt es zu Blockierungen der vorgelagerten Komponenten. Um diese Wartezeiten zu überbrücken, können entsprechend dimensionierte Warteräume (Puffer) vorgeschaltet werden. Sind die Puffer allerdings zu klein dimensioniert, kann es wiederum zum Blockieren kommen.

Wenn die Zwischenankunftszeit vor einer Bedienstation zu einem bestimmten Zeitpunkt zufällig größer sein sollte als die Bediendauer (Transportvorgang dauert länger), so kommt es in dieser Bedienstation zu Leerzeiten, in denen kein Bedienvorgang stattfindet und daher auch kein Durchsatz vorhanden ist. Diese Leerzeiten können wiederum durch Vorschalten entsprechend gefüllter Puffer reduziert werden.

#### Auslastungsgrade:

Der Durchsatz einer Anlage wird auch durch den Auslastungsgrad der einzelnen Systemelemente beeinflusst (Definition siehe Seite 10). Durch schnellere Abfertigung kann beispielsweise versucht werden, vorgelagerte Warteschlangen abzubauen, durch schnellere Bereitstellung von Fördereinheiten können Leerzeiten in nachfolgenden Elementen reduziert werden (siehe auch Seite 21).



**Störungen:**

Durch Störungen der einzelnen Materialflusskomponenten (Transportmittel, Puffer, Bedienstationen) kann es ebenfalls zu Unterbrechungen im Materialfluss kommen.

Diese Störzeiten können wiederum durch entsprechend dimensionierte Puffer überbrückt werden, d.h. fällt eine Komponente aus und befindet sich vor dieser ein Puffer, so können alle vorgelagerten Elemente weiterarbeiten, bis dieser voll ist und es auch zum Blockieren der übrigen Elemente kommt.

Fällt eine Komponente aus und befindet sich nach dieser ein entsprechend gefüllter Puffer, so können die nachfolgenden Elemente aus diesem Puffer herausarbeiten, bis dieser leer ist. Dies würde dann wieder zu Leerzeiten in den nachfolgenden Elementen führen.

**Redundanzen:**

Für Elemente mit besonders schlechter technischer Verfügbarkeit (Definition siehe Kapitel 3.2.3) können Redundanzelemente vorgesehen werden. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der technischen Verfügbarkeit des Gesamtsystems und damit des Durchsatzes.

**Somit sind folgende Einflussgrößen zu beachten:**

- Verteilungsfunktionen der Ankunfts- und Bedienprozesse, sowie der störungsfreien Zeiten (TBF) und der Reparaturzeiten (TTR)
  - Art der Verteilungsfunktionen
  - Parameter der Verteilungsfunktionen
- Pufferkapazitäten
- Systemstruktur (mit und ohne redundanten Transport-, bzw. Bedienelementen)

In der folgenden Abbildung sind alle Größen, die den Durchsatz einer Materialflussanlage beeinflussen können, im Überblick dargestellt.

Im den nachfolgenden Kapiteln werden genaue Definitionen und Erläuterungen zu den einzelnen Einflussgrößen angeführt.

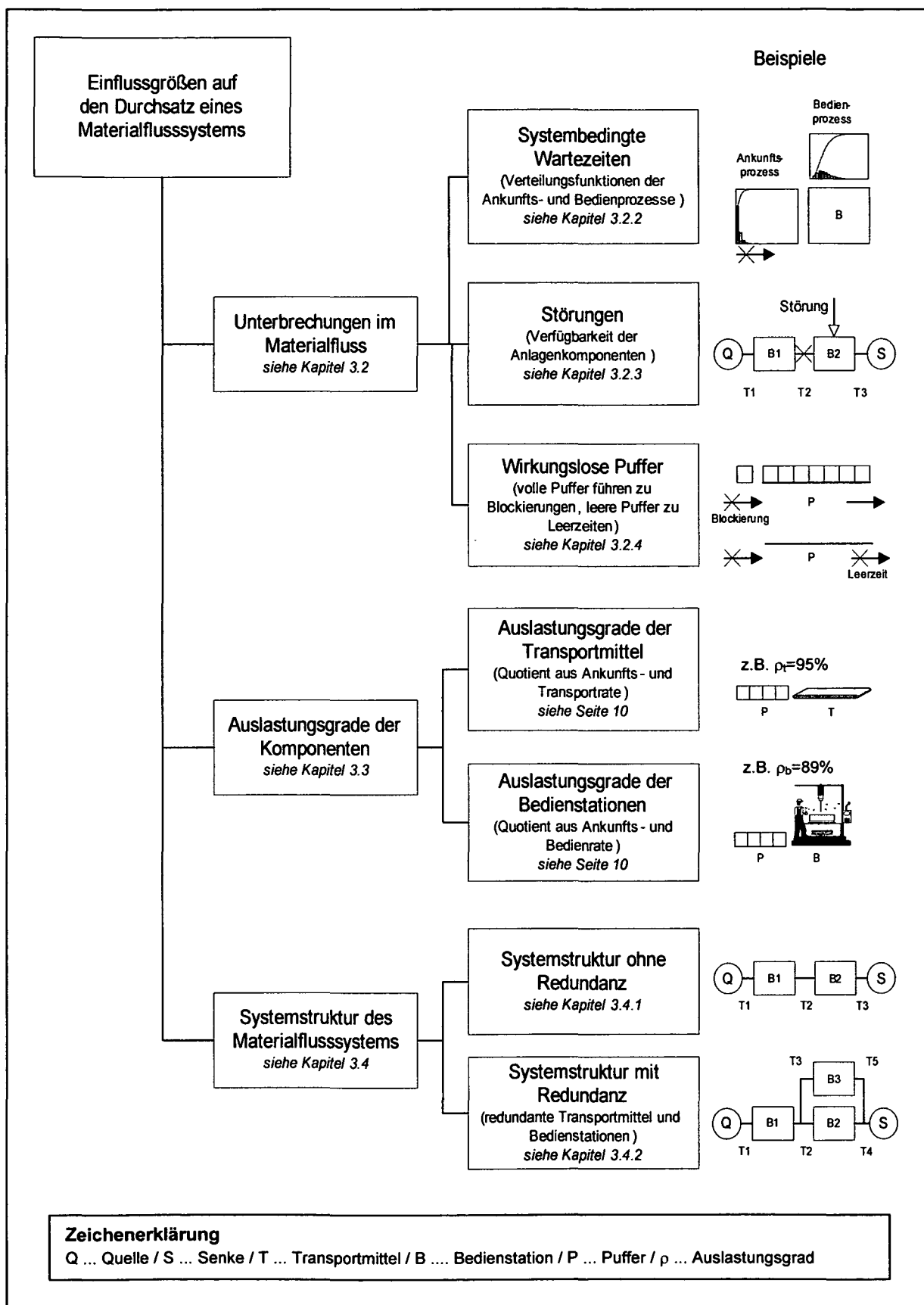


Abbildung 3: Einflussgrößen auf den Durchsatz

## 3.2 Unterbrechungen im Materialfluss

### 3.2.1 Definitionen

<b>Systembedingte Wartezeiten:</b>	Wartezeiten aufgrund stochastischer Ankunfts- und Bedienprozesse (maßgeblich ist die Verteilungsfunktion der Ankunfts- und Bedienzeiten)
<b>Störungen:</b>	Nicht geplante Unterbrechungen des Materialflusses durch Ausfälle der Systemkomponenten (Transportmittel, Bedienstationen und Puffer sind nicht immer verfügbar)
<b>Wirkungslose Puffer:</b>	<b>Blockierungen:</b> Unterbrechungen des Materialflusses in vorgelagerten Komponenten aufgrund voller Zwischenpuffer (beschränkte Pufferkapazitäten) oder nicht vorhandener Zwischenpuffer  <b>Leerzeiten:</b> Unterbrechungen des Materialflusses in nachfolgenden Komponenten aufgrund leerer oder nicht vorhandener Zwischenpuffer

### 3.2.2 Systembedingte Wartezeiten

In Materialflusssystemen können sich aufgrund stochastischer Ankunfts- und Bedienprozesse Wartezeiten ergeben. Deshalb werden Warteräume (Puffer) vorgesehen. Die Warteschlangentheorie liefert Berechnungsformeln, mit denen beispielsweise die mittlere Warteschlangenlänge oder die mittlere Wartezeit berechnet werden können. Da Warteschlangenmodelle für die Validation der entwickelten Simulationsmodule verwendet wurden, soll die zugrunde liegende Theorie kurz beschrieben werden.

#### Theorie der Warteschlangen (Bedienungstheorie)

Einen besonderen Einfluss auf die Entwicklung dieser Theorie hatten die Arbeiten des dänischen Ingenieurs A. K. Erlang (1878-1929), der ein langjähriger Mitarbeiter der Kopenhagener Telefongesellschaft war. Erstes Anwendungsgebiet war somit das Telefonwesen, mit dem Ziel, alle Telefonteilnehmer rechtzeitig zu bedienen.

Es stellte sich bald heraus, dass ähnliche Probleme auch in anderen Bereichen auftraten, wie z.B. im Transport- und Militärwesen oder bei der Produktionsorganisation. Somit entwickelte sich diese Theorie zu einem wichtigen Werkzeug zur Dimensionierung von Bedienungssystemen [14].

Bedienungsmodelle sind mathematische Modelle von Systemen, die der Bedienung von, in zufälligen Abständen auftretenden, Forderungen dienen, wobei die Bedienungszeiten i. a. ebenfalls zufällig sind. Das Verhalten von Bedienungssystemen hängt, außer von ihrer Struktur, im Wesentlichen von der Folge der zufälligen Ankünfte und der Folge der auf den einzelnen Bedienungsapparaten ablaufenden Bedienungen zufälliger Länge ab [15].

In Abbildung 4 ist die einfachste Version eines Bedienungssystems (in der Literatur sind auch die Bezeichnungen Bediensystem, Wartesystem, bzw. Warteschlangensystem gebräuchlich) schematisch dargestellt. Die von der Quelle Q erzeugten Fördereinheiten FE treffen mit zufällig streuenden Zwischenankunftszeiten  $t_a$  an der Systemgrenze a ein [16].

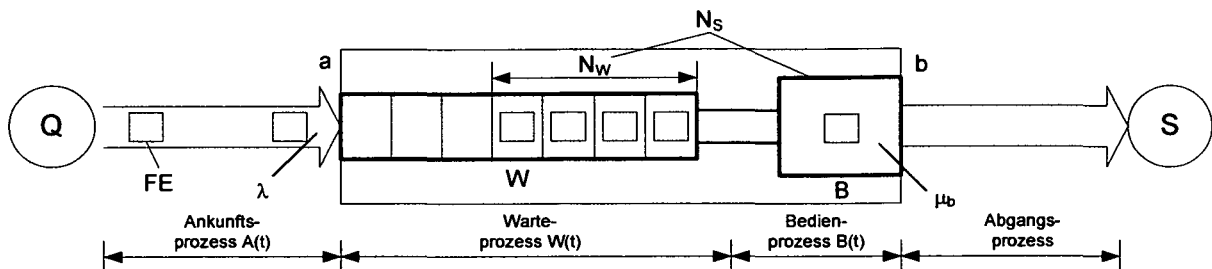


Abbildung 4: Einfaches Bedienungssystem [16]

Mit dem Erwartungswert  $E(t_a)$  dieser Zwischenankunftszeiten lässt sich an der Systemgrenze a die Zahl der ankommenden Fördereinheiten pro Zeiteinheit definieren als

$$\text{Ankunftsrate: } \lambda = \frac{1}{E(t_a)}$$

In der Bedienstation B findet ein produktionstechnischer oder materialflusstechnischer Vorgang statt, dessen Zeitdauer, die Bedienzeit  $t_b$ , im Allgemeinen ebenfalls zufälligen Streuungen unterliegt. Mit dem Erwartungswert  $E(t_b)$  der Bedienzeit lassen sich die pro Zeiteinheit im Mittel bedienbaren und über die Systemgrenze b abfertigten Fördereinheiten definieren als

$$\text{Bedienrate: } \mu_b = \frac{1}{E(t_b)} \quad (\text{analog gilt für die Transportrate: } \mu_t = \frac{1}{E(t_t)})$$

Hinweis: In materialflusstechnischer Hinsicht besteht zwischen einer Bedienstation und einem Transportmittel kein Unterschied. Sie werden allerdings simulationstechnisch unterschiedlich behandelt (Einplanung von Störungen, Animation,...). Darauf wird in den Kapiteln 6, 7 und 8 näher eingegangen.

Der Quotient aus Ankunfts- und Bedienrate wird als Auslastungsgrad  $\rho_b$  bezeichnet:

$$\text{Auslastungsgrad: } \rho_b = \frac{\lambda}{\mu_b} \quad (\text{analog gilt für das Transportsystem: } \rho_t = \frac{\lambda}{\mu_t})$$

Es bildet sich keine Warteschlange, falls der Ankunftsprozess und der Bedienprozess regelmäßige Taktprozesse sind, und falls gilt:

$$t_b < t_a \quad \leftrightarrow \quad \mu > \lambda \quad \leftrightarrow \quad \rho < 1$$

Ist jedoch mindestens einer der beiden Prozesse ein stochastischer Prozess, so können sich auch für Auslastungsgrade  $\rho < 1$  Warteschlangen bilden.

Zur Kennzeichnung verschiedener Warteschlangenmodelle wurde folgende Notation (Kendall-Lee-Notation) eingeführt:

$$A|B|m|W|s$$

- A: Ankunftsprozess  $A(t)$ , der aus der Verteilung der Zwischenankunftszeiten  $t_a$  resultiert  
B: Bedienprozess  $B(t)$ , der aus der Verteilung der Bedienzeiten  $t_b$  resultiert  
m: die Anzahl paralleler und identischer Bedienstationen  
W: Kapazität des Wartesystems  
s: Bedienstrategie, d.h. Entnahmereihenfolge aus dem Warteraum  
(z.B. FIFO ... First-In-First-Out)

Für A und B werden häufig folgende Verteilungen verwendet:

- M: Exponentialverteilung  
 $E_k$ : k-Erlangverteilung  
D: Diracverteilung (für Taktprozesse)  
G: Generelle (allgemeine) Verteilung, deren Verteilungsform nicht bekannt ist, deren Parameter  $E(t)$  und  $\text{Var}(t)$  man aber kennt

Die Warteschlangentheorie liefert für die entsprechenden Warteschlangenmodelle jeweils Berechnungsformeln, mit denen folgende Größen bestimmt werden können:

- $N_s$  ... mittlere Anzahl der im Bedienungssystem befindlichen Fördereinheiten (Warteraum und Bedienstation)
- $N_w$  ... mittlere Anzahl der im Warteraum befindlichen Fördereinheiten, wenn der Warteprozess stationär geworden ist
- $t_s$  ... mittlere Verweilzeit der Fördereinheiten im Bedienungssystem (Warten und Bedienen)
- $t_w$  ... mittlere Wartezeit der Fördereinheiten im Warteraum

Für die Validation der Simulationsmodule wurden verschiedene A|B|1|∞|FIFO Warteschlangenmodelle verwendet. Die entsprechenden Kenngrößen werden im folgenden Abschnitt angegeben (Herleitung siehe Literatur [14, 15, 16]).

Das M|M|1-Modell

$$N_S = \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{\lambda}{\mu-\lambda} \qquad N_W = N_S - \rho = \frac{\rho}{1-\rho} - \rho = \frac{\rho^2}{1-\rho}$$

$$t_s = \frac{N_S}{\lambda} = \frac{1}{\mu-\lambda} \qquad t_w = t_s - E(t_b) = \frac{N_W}{\lambda} = \frac{\rho}{\mu \cdot (1-\rho)}$$

Der erforderliche Auslastungsgrad für  $N_W=1$  kann beispielsweise folgendermaßen berechnet werden (vgl. Seite 115):

$$N_W = \frac{\rho^2}{1-\rho} = 1 \Rightarrow \rho^2 + \rho - 1 = 0$$

$$\rho = -\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + 1} = 0,618 \cong 0,62$$

Die Gleichung  $t_s = N_S \cdot E(t_a) = \frac{N_S}{\lambda}$  wird in der Literatur als „Gesetz von LITTLE“ bezeichnet und gilt allgemein für alle Wartesystem-Modelle. Ihre Gültigkeit ist auch ohne mathematischen Beweis leicht einzusehen, wenn der Erwartungswert der Zwischenankunftszeit fiktiv als streng determinierte Taktzeit  $E(t_a) = T_t$  aufgefasst wird. Dann wird klar, dass jede Fördereinheit nach der Zeitdauer  $t_s = N_S \cdot T_t$  das gesamte System durchlaufen hat [16].

Das M|E<sub>k</sub>|1-Modell

$$N_S = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \left(1 - \rho \frac{k-1}{2k}\right) \qquad N_W = \frac{\lambda^2 / (k\mu^2) + \rho^2}{2(1-\rho)}$$

$$t_s = \frac{N_S}{\lambda} = t_w + \frac{1}{\mu} \qquad t_w = \frac{k+1}{2k} \cdot \frac{\rho}{\mu \cdot (1-\rho)}$$

Das M|D|1-Modell

$$N_S = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{2}\right) \qquad N_W = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$$

$$t_s = \frac{N_S}{\lambda} \qquad t_w = \frac{N_W}{\lambda} = \frac{\rho}{2\mu \cdot (1-\rho)}$$

### Das G|G|1-Modell

Dieses Modell berechnet näherungsweise die Kennwerte für den stationären Warteprozess, wenn von Ankunfts- und Bedienprozess  $A(t)$  und  $B(t)$  nur die statistischen Parameter ihrer zeitlichen Verteilung ( $E(t_a)$ ,  $\text{Var}(t_a)$ ;  $E(t_b)$ ,  $\text{Var}(t_b)$ ) bekannt sind.

GUDEHUS gibt folgendes Näherungsverfahren an [16, 17]:

Man betrachtet Verteilungen, deren Variationskoeffizienten (Einlaufvariabilitäten und Abfertigungsvariabilitäten) zwischen 0 (Dirac-Verteilung) und 1 (Exponentialverteilung) liegen und kombiniert Lösungen für M|G|1- und G|M|1-Systeme.

Hierfür werden folgende Größen definiert:

Variationskoeffizient des Ankunftsprozesses (Einlaufvariabilität):

$$v_a = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_a)}}{E(t_a)} = \lambda \cdot \sigma(t_a)$$

Variationskoeffizient des Bedienprozesses (Abfertigungsvariabilität):

$$v_b = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_b)}}{E(t_b)} = \mu \cdot \sigma(t_b)$$

Variationskennwert  $f_v$ :

$$f_v = 1 - \frac{v_a^2 + v_b^2}{2}$$

Daraus lassen sich folgende Kenngrößen ableiten:

$$N_s \cong \frac{\rho}{1-\rho} \cdot (1 - f_v \cdot \rho)$$

$$N_w \cong N_s - \rho$$

$$t_s \cong \frac{N_s}{\lambda}$$

$$t_w = \frac{N_w}{\lambda} = \frac{\rho \cdot (1 - f_v)}{\mu \cdot (1 - \rho)}$$

### Das D|D|1-Modell

Zwischenankunftszeit  $t_a$  und Bedienzeit  $t_b$  sind gleich bleibende Taktprozesse ( $t_a = T_a =$  konstant,  $t_b = T_b =$  konstant). Man unterscheidet zwei Fälle:

1.)  $T_a \geq T_b$

$$N_s = \rho$$

$$N_w = N_s - \rho = 0$$

$$t_s = \frac{N_s}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda} = \frac{1}{\mu}$$

$$t_w = \frac{N_w}{\lambda} = 0$$

2.)  $T_a < T_b \Rightarrow \rho > 1 \Rightarrow$  es bildet sich eine Warteschlange, deren Länge jedoch ad infinitum zunimmt, d.h. der Prozess ist instationär

### 3.2.3 Störungen

Die Verfügbarkeit stellt die wichtigste Kennziffer für die Beurteilung des Störungsverhaltens einer technischen Anlage dar.

Der Begriff Verfügbarkeit (engl.: availability) besagt, dass ein technisches Erzeugnis, System oder Systemelement unter den zu betrachtenden Bedingungen für eine vorgesehene Aufgabe bei Bedarf tatsächlich eingesetzt werden kann (d.h. funktionsklar ist). Diese Fähigkeit ist quantitativ definiert als

„die Wahrscheinlichkeit, dass an einer Betrachtungseinheit zur Betrachtungszeit keine als maßgeblich geltenden Störungen vorliegen, die unter den vorauszusetzenden Bedingungen die Erfüllung einer Funktion verhindern“ [12].

Definition der Verfügbarkeit gemäß VDI 3423 [13]:

Die verwendeten Begriffe beziehen sich auf Einzelmaschinen bzw. Komponenten eines Systems, die nicht miteinander verbunden sind.

Für die quantitative Definition der Verfügbarkeit muss der Betrachtungszeitraum in einzelne Zeitabschnitte geteilt werden:

- Organisatorische Ausfallzeit  $T_0$   
... Summe aller Ausfallzeiten, die ihre Ursache in einem organisatorischen Mangel haben oder der Vorbereitung von Produktionsvorgängen dienen (z.B. Fehlen von Energie, Fehlen von Werkzeugen, Bedienungsfehler)



- Technische Ausfallzeit  $T_T$   
... Summe aller Ausfallzeiten, die ihre Ursache in Mängeln der Konzeption oder Ausführung einer Maschine/Anlage haben (z.B. Warten auf Ersatzteile, Instandsetzung)
- Wartungszeit  $T_W$   
... alle nach Wartungsplan vorgesehenen Arbeiten
- Nutzungszeit  $T_N$   
... Zeitanteil, in dem die Maschine mit vollem Leistungsvermögen produziert
- Belegungszeit  $T_B$   
... Zeitanteil innerhalb des Betrachtungszeitraums, für den eine Nutzung der Maschine/Anlage geplant ist. Sie bildet die Bezugsgröße für alle hier angeführten Kennzahlen.

Aus diesen Zeitanteilen können folgende Kennzahlen abgeleitet werden:

- Organisatorische Ausfallrate  $A_O$

$$A_O = \frac{T_O}{T_B} \cdot 100\%$$

- Technische Ausfallrate  $A_T$

$$A_T = \frac{T_T}{T_B} \cdot 100\%$$

- Wartungsbedingte Ausfallrate  $A_W$

$$A_W = \frac{T_W}{T_B} \cdot 100\%$$

- Gesamtnutzungsgrad  $N_G$

$$N_G = \frac{T_N}{T_B} = \frac{T_B - T_O - T_T - T_W}{T_B} \cdot 100\%$$

- Technische Verfügbarkeit  $V_T$

$$V_T = 100\% - \left( \frac{T_T}{T_B} \cdot 100\% \right) = \left( 1 - \frac{T_T}{T_B} \right) \cdot 100\% = \left( \frac{T_B - T_T}{T_B} \right) \cdot 100\%$$

oder anders formuliert:

$$V_T = \left( \frac{T_E}{T_E + T_A} \right) \cdot 100\%$$

mit  $T_E = T_B - T_T$  ... Einsatzzeit (nutzbare störungsfreie Betriebszeit)

und  $T_A = T_T$  ... Ausfallzeit (Reparaturzeit)

Treten innerhalb des Betrachtungszeitraums  $T_n$   $n$  Störungen auf, so kann man bezogen auf eine Störung schreiben:

$$V_T = \frac{T_E / n}{T_E / n + T_A / n} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{1}{1 + \frac{MTTR}{MTBF}} = \frac{1}{1 + \delta} \quad \text{mit } \delta = \frac{MTTR}{MTBF} \quad (\text{vgl. Seite 116})$$

MTBF ... Mittlere störungsfreie Zeit (Mean Time Between Failures)

MTTR ... Mittlere Störungsdauer (Mean Time To Repair)

Für  $V_T$  wird auch die Bezeichnung  $\eta$  verwendet.

Die Verfügbarkeit ist somit eine ausschließlich zeitabhängige Kennzahl. Die Störungshäufigkeit bleibt unberücksichtigt. Somit können viele kurze Störungen zum gleichen Verfügbarkeitskennwert führen, wie wenige lange Störungen (Abbildung 5: Verfügbarkeit in beiden Fällen  $V_T = 75\%$ )

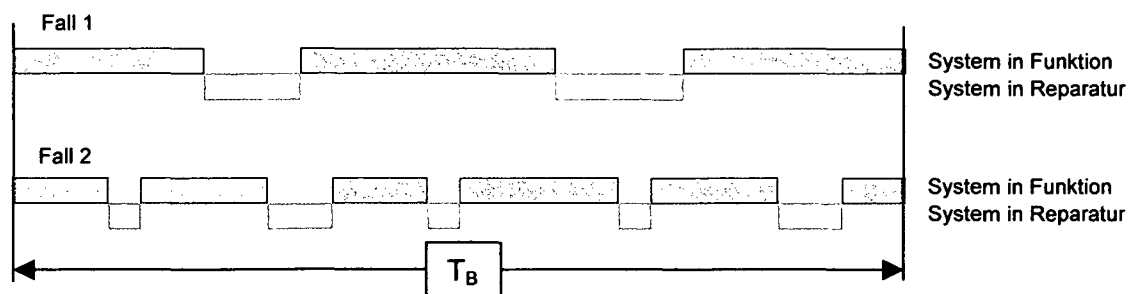


Abbildung 5: Verfügbarkeit über der Zeit

Die Verfügbarkeit muss unter Anwendung der üblichen statistischen Methoden ermittelt werden, d.h. dass mehrere Messungen über längere Zeiträume durchgeführt werden müssen. Je länger der Beobachtungszeitraum gewählt wird, desto genauer wird der beobachtete Verfügbarkeitskennwert mit dem wahren Wert der Materialflussanlage übereinstimmen.

Herleitung der Verfügbarkeitsfunktion [16, 17]:

Die zufällige Folge der Zustände „funktionsfähig“ und „ausgefallen“ kann vereinfacht auch als Markoff-Prozess modelliert und anschaulich als Zustandsgraph dargestellt werden, sofern folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Das System befindet sich zu jedem Zeitpunkt in genau einem seiner möglichen Zustände.
- Die Übergangsraten  $\alpha$  (Ausfallrate) und  $\beta$  (Reparaturrate) zwischen den Zuständen sind konstant.
- Frühere Zustände haben den gegenwärtigen Zustand herbeigeführt und beeinflussen den künftigen Ablauf des Zufallsprozesses nicht mehr.

Diese einschränkenden Voraussetzungen akzeptiert man bei der praktischen Durchführung der meisten Verfügbarkeitsprognosen und –diagnosen, so auch für Materialflusssysteme.

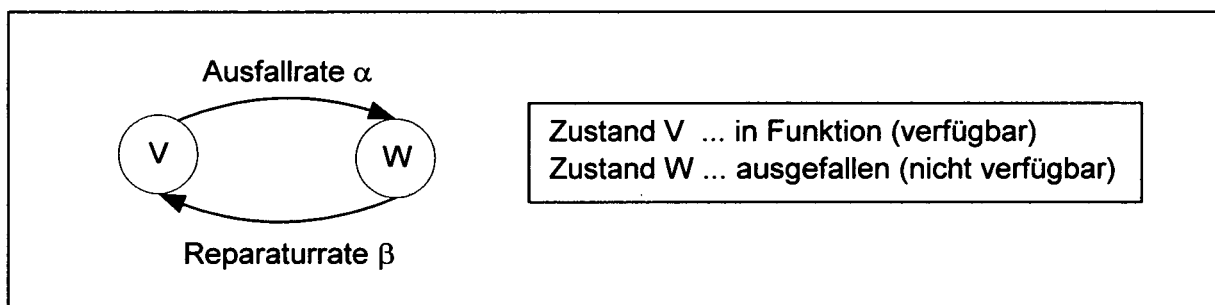


Abbildung 6: Zustandsgraph eines binären Systems [16]

Die Verfügbarkeitsfunktion  $V(t)$  gibt die Wahrscheinlichkeit der Verfügbarkeit als Funktion der Zeit an. Im Gegensatz dazu gibt die Nicht-Verfügbarkeitsfunktion  $W(t)$  die Wahrscheinlichkeit der Nicht-Verfügbarkeit als Funktion der Zeit an.

Die Wahrscheinlichkeit verfügbar zu sein wird durch den Ausfall mit der Ausfallrate  $\alpha$  reduziert und durch eine Reparatur mit der Reparaturrate  $\beta$  erhöht.

$$\frac{dV(t)}{dt} = -\alpha \cdot V(t) + \beta \cdot W(t)$$

Die Wahrscheinlichkeit nicht verfügbar zu sein wird durch den Ausfall mit der Ausfallrate  $\alpha$  erhöht und durch eine Reparatur mit der Reparaturrate  $\beta$  reduziert.

$$\frac{dW(t)}{dt} = +\alpha \cdot V(t) - \beta \cdot W(t)$$

Somit liegt ein System von zwei homogenen Differentialgleichungen vor. Dieses Gleichungssystem kann mit dem Ansatz  $V(t) = c_1 \cdot e^{s \cdot t}$  und  $W(t) = c_2 \cdot e^{s \cdot t}$  gelöst werden. Dies führt, unter der Anfangsbedingung  $V(0) = \gamma$  bzw.  $W(0) = 1 - \gamma$ , zu folgenden Ergebnissen:

$$V(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} + \left( \gamma - \frac{\beta}{\alpha + \beta} \right) \cdot e^{-(\alpha + \beta)t}$$

$$W(t) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} - \left( \gamma - \frac{\beta}{\alpha + \beta} \right) \cdot e^{-(\alpha + \beta)t}$$

Für den eingeschwungenen Zustand, also für  $t \rightarrow \infty$ , erhält man unabhängig von der Anfangsbedingung  $\gamma$ :

$$V(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$$

$$W(t) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$$

Umformung führt zu dem bereits bekannten Ausdruck:

$$V(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \cdot \frac{\frac{1}{\alpha \cdot \beta}}{\frac{1}{\alpha \cdot \beta}} = \frac{\frac{1}{\alpha}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta}} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

In der nachfolgenden Abbildung sind drei verschiedene Verfügbarkeitsfunktionen über der Zeit dargestellt, wobei die Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt  $t=0$  verfügbar zu sein mit  $\gamma = 1$  angenommen wurde. Die Ausfallrate  $\alpha$  beträgt jeweils 0,1 (MTBF=10 Wochen). Die Reparaturrate  $\beta$  wurde variiert (Reihe1:  $\beta=2$  (MTTR=0,5 Wochen); Reihe2:  $\beta=1$  (MTTR=1 Woche); Reihe3:  $\beta=0,5$  (MTTR=2 Wochen)).

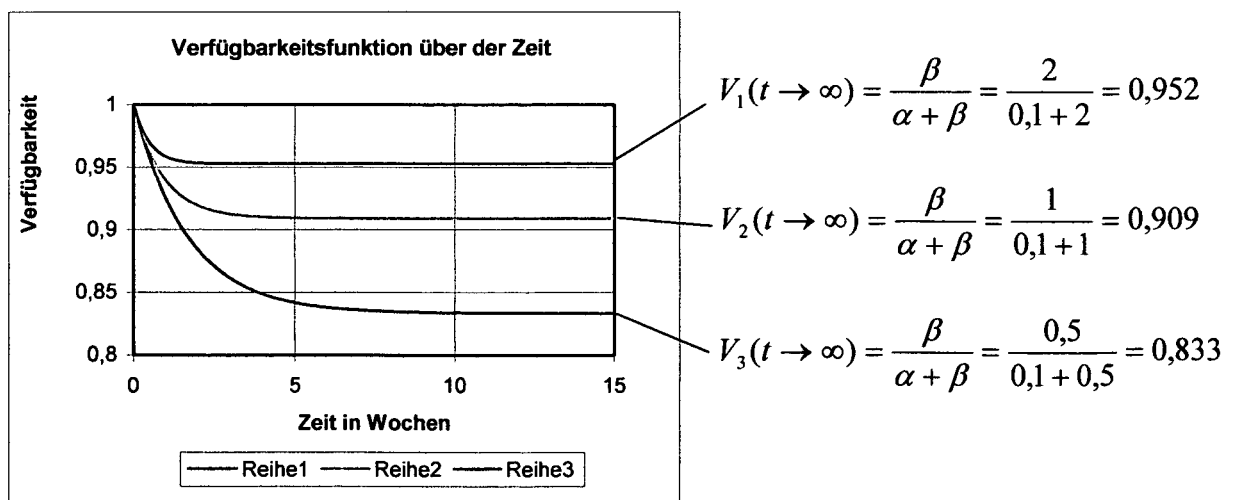


Abbildung 7: Verfügbarkeitsfunktion über der Zeit für  $\gamma = 1$

### 3.2.4 Wirkungslose Puffer

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben wurde, kann es zu Blockierungen einzelner Materialflusskomponenten kommen, wenn die Kapazitäten nachgelagerter Zwischenpuffer nicht mehr ausreichen, um Fördereinheiten aufzunehmen. Dadurch entstehen in diesen Komponenten Folgeausfallzeiten. Zu Leerzeiten kommt es dann, wenn ein Puffer keine Fördereinheiten mehr für den Weitertransport oder für eine nachgelagerte Bedienstation zur Verfügung stellen kann. Dies wirkt sich unmittelbar auf den Durchsatz der Anlage aus.

Ein Puffer kann prinzipiell zwei Funktionen übernehmen:

- Überbrückung von Störungen
- Überbrückung systembedingter Wartezeiten

#### Puffer zur Störzeitüberbrückung [18]

- Einfach wirkender Puffer

Bei Störung von Element 1 ist die Produktion des nachgeschalteten Elements 2 solange abgesichert, bis der Puffer leer ist. Die Anzahl der Fördereinheiten im Puffer vor dem Auftreten der Störung bestimmt die Überbrückungszeit. Somit kann auch nur eine teilweise Überbrückung möglich sein, da es in Element 2 zu Leerzeiten kommen kann (siehe Abbildung 8).

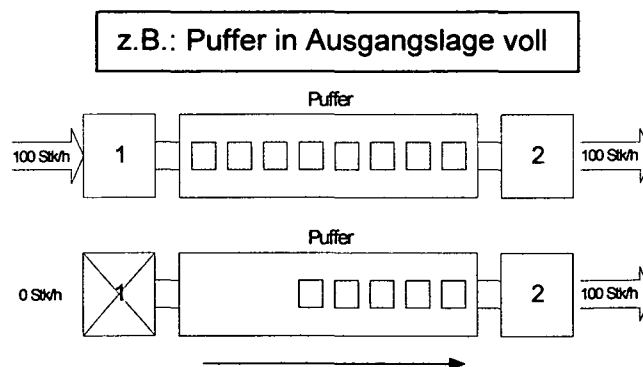


Abbildung 8: Pufferwirkung bei Störung von Element 1 [18]

Bei Störung von Element 2 kann die Produktion von Element 1 bis zur vollständigen Füllung des Puffers ungehindert weiterlaufen, ausschlaggebend für die Überbrückungszeit ist der Füllzustand des Puffers bei Auftreten der Störung und die Pufferkapazität. Ist die Pufferkapazität erreicht, kommt es zum Blockieren von Element 1 (siehe Abbildung 9).

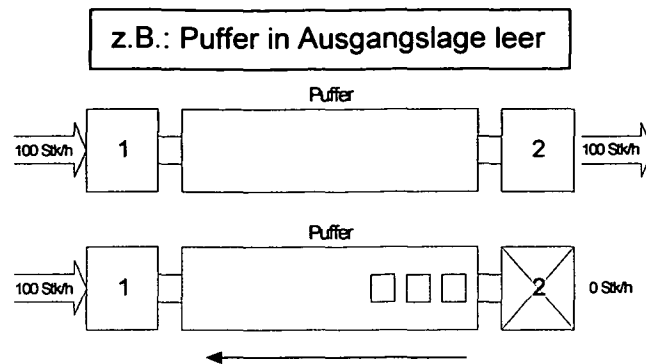


Abbildung 9: Pufferwirkung bei Störung von Element 2 [18]

- Doppelt wirkender Puffer

Der Puffer zwischen Element 1 und 2 hat zwei Funktionen. Eine Störung von Element 1 bewirkt das Leeren der rechten Pufferseite. Ausschlaggebend für die Überbrückungszeit ist der Pufferinhalt der rechten Seite. Auch hier kann es nur zu einer teilweisen Überbrückung der Störzeit kommen, da ein leerer Puffer zu einer Unterbrechung des Materialflusses führt.

Eine Störung von Element 2 bewirkt das Füllen der linken Pufferseite. Ausschlaggebend für die Überbrückungszeit ist der Füllzustand des Puffers bei Auftreten der Störung und die Pufferkapazität der linken Seite. Auch in diesem Fall kommt es bei vollem Puffer zum Blockieren von Element 1.

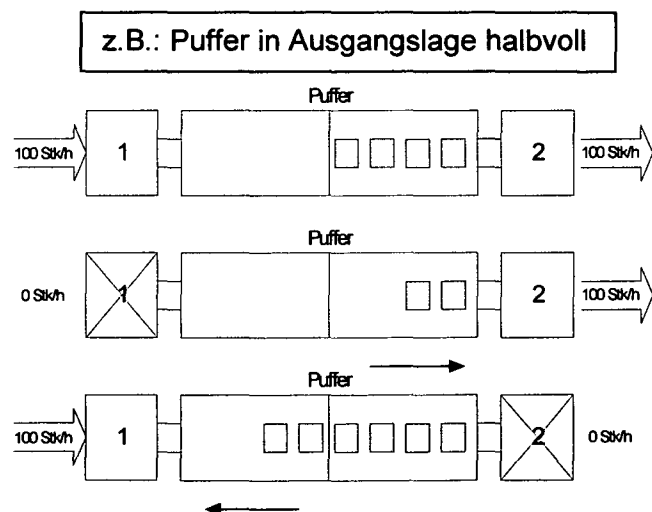


Abbildung 10: Pufferwirkung eines doppelt wirkenden Puffers [18]

### Puffer zur Überbrückung systembedingter Wartezeiten

Auch hier kann zwischen einfach und doppelt wirkenden Puffern unterschieden werden, wobei das Füllen und Leeren der Puffer nicht durch Störungen, sondern durch stochastische Ankunfts- und Bedienprozesse hervorgerufen wird.

### 3.3 Auslastungsgrade der Materialflusskomponenten

In Kapitel 3.2.2 wurde der Auslastungsgrad als Quotient von Ankunft- und Bedienrate, bzw. Ankunfts- und Transportrate definiert.

Durch Verringern der Bediendauer einer Bedienstation können Warteschlangen, die sich vor diesem aufgrund von Störungen oder systembedingten Wartezeiten ergeben haben, wieder abgebaut werden. Dadurch sinkt die Blockierwahrscheinlichkeit der vorgelagerten Elemente bei gleicher Pufferkapazität, da sich aufgrund der schnelleren Abarbeitung die Warteschlangenlängen verkürzen. Dabei muss allerdings sichergestellt sein, dass die nachfolgenden Elemente den höheren Durchsatz auch bewältigen können (es muss ein ungehinderter Abfluss möglich sein).

Durch Verringern der Transportdauer eines Transportmittels können Leerzeiten in nachfolgenden Elementen, die sich durch systembedingte Wartezeiten ergeben haben, reduziert werden, da die Fördereinheiten schneller zur Verfügung gestellt werden können. Auch in diesem Fall ist sicherzustellen, dass der Durchsatz der vorgelagerten Komponenten auf den des Transportmittels abgestimmt ist (es muss eine ungehinderte Zufuhr möglich sein).

Diese Maßnahmen können somit dazu dienen, Engpässe in Materialflusssystemen zu vermeiden und damit den Durchsatz zu erhöhen.

In Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Auslastungsgrade der einzelnen Materialflusskomponenten während eines Simulationslaufes nicht verändert. Sie können allerdings von Lauf zu Lauf variiert werden.

### 3.4 Systemstruktur des Materialflusssystems

#### 3.4.1 Linienstruktur

Diese Systemstruktur zeichnet sich dadurch aus, dass alle Komponenten seriell angeordnet sind. Für die Gesamtverfügbarkeit  $\eta$  von  $o$  Komponenten in Reihenschaltung mit den Einzelverfügbarkeiten  $\eta_1$  bis  $\eta_o$  ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung (allerdings ohne Berücksichtigung von Puffern):

$$\eta = \prod_{i=1}^o \eta_i$$

Diese und die später folgenden Formeln für Redundanzen gelten jedoch nur unter den einschränkenden Voraussetzungen der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Diese sind [20]:

- Die statistische Unabhängigkeit der Elemente, die nur dann gegeben ist, wenn Wechselwirkungen zwischen den Elementen eindeutig ausgeschlossen werden können.

- Die Einflussgrößen müssen Zufallsvariablen sein, d.h. aufeinander folgende Ereignisse müssen voneinander unabhängig sein.
- Es müssen statistisch ausreichend viele Vorgänge betrachtet werden.

### 3.4.2 Parallelstruktur

Im Rahmen dieser Arbeit werden redundante Materialflusskomponenten in Simulationsmodellen abgebildet. Die Validation der Module erfolgt durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen der analytischen Berechnung der Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in Redundanzschaltung. Die dabei verwendeten Berechnungsformeln werden im folgenden Abschnitt angegeben.

#### Verfügbarkeit bei Parallelschaltung zweier Komponenten (Redundanz) [19]

In Materialflusssystemen kommen üblicherweise nur zwei Elemente in Redundanzschaltung zum Einsatz. Redundanz (lat. redundare ... im Überfluss vorhanden sein) entsteht durch das Einführen eines zusätzlichen Elements, welches dieselbe Funktion wie das andere Element ausführt und dadurch die Verfügbarkeit und somit den Durchsatz des Systems erhöht.

Ganz allgemein kann man in technischen Systemen zwischen den folgenden drei Redundanzarten unterscheiden:

- **Heiße (aktive) Redundanz:**

Es handelt sich hierbei um zwei Elemente, die im störungsfreien Zustand jeweils unter Volllast arbeiten, wobei ein Element ausreichend wäre. Sind die Komponenten völlig baugleich, so unterliegen beide der gleichen Ausfallrate  $\alpha$ . Fällt ein Element aus, arbeitet das zweite wie bisher weiter und das System ist noch verfügbar. Das noch arbeitende Element unterliegt wiederum der Ausfallrate  $\alpha$ . Erst der gleichzeitige Ausfall beider Elemente führt zur Nicht-Verfügbarkeit. Nicht baugleiche Komponenten, die allerdings die gleiche Funktion erfüllen müssen, können auch unterschiedliche Ausfallraten haben. (Hinweis: in Materialflusssystemen können heiße Redundanzen nicht sinnvoll eingesetzt werden, vgl. Seite 25).

- **Warme (aktive) Redundanz:**

Hierbei handelt es sich um zwei Elemente, die im Normalbetrieb unter Teillast arbeiten. Fällt ein Element aus, übernimmt das verfügbare Element die Gesamtlast (oder falls die Kapazität nicht ausreicht, nur einen bestimmten Teil davon – diese Möglichkeit wurde bei der Entwicklung der Simulationsmodule berücksichtigt, sie wird in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht weiter verfolgt, vgl. Seite 25). Dabei ist damit zu rechnen, dass die Ausfallrate im Teillastbetrieb  $\alpha_{TL}$  kleiner sein wird, als die Ausfallrate im Volllastbetrieb  $\alpha_{VL}$ .



- **Kalte (passive) Redundanz (Standby-Redundanz):**

Es handelt sich um zwei Elemente, wobei immer nur ein Element arbeitet und das zweite nicht funktionsbeteiligt in Bereitschaft steht. Erst bei Ausfall eines Elements übernimmt das andere die Funktion.

Prinzipiell kann man, je nachdem wie zwischen den beiden Elementen umgeschaltet wird, unterscheiden zwischen:

- Rückschaltbetrieb und
- Umschaltbetrieb

Der Rückschaltbetrieb ist dadurch gekennzeichnet, dass nach Ausfall des arbeitenden Elements auf das Bereitschaftselement umgeschaltet und nach erfolgter Reparatur gleich wieder auf das ursprünglich in Funktion stehende Element zurückgeschaltet wird. Hingegen wird beim Umschaltbetrieb nach erfolgter Reparatur des ausgefallenen Elements nicht gleich wieder auf dieses zurückgeschaltet, sondern erst, wenn das ursprüngliche Bereitschaftselement ausgefallen ist.

#### Berechnung der Gesamtverfügbarkeit bei Parallelschaltung zweier Komponenten [19]

Für die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in Redundanz werden folgende Größen definiert:

Ausfallrate ...  $\alpha$  (bzw.  $\alpha_{TL}$ ,  $\alpha_{VL}$ )

Reparaturrate ...  $\beta$

Verhältniswert  $\delta = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{MTTR}{MTBF}$  (bzw.  $\delta_{TL}$ ,  $\delta_{VL}$ )

Zur Aufstellung der Differentialgleichungen werden die einzelnen Systemzustände in einem sog. Markoff -Graphen dargestellt. Dabei bedeutet

Zustand X: beide Komponenten intakt

Zustand Y: eine Komponenten intakt, eine Komponente ausgefallen

Zustand Z: beide Komponenten ausgefallen

Verfügbarkeit ist somit im Zustand X und Y gegeben  $\Rightarrow V = X+Y$

- Gesamtverfügbarkeit zweier Komponenten in heißer Redundanz

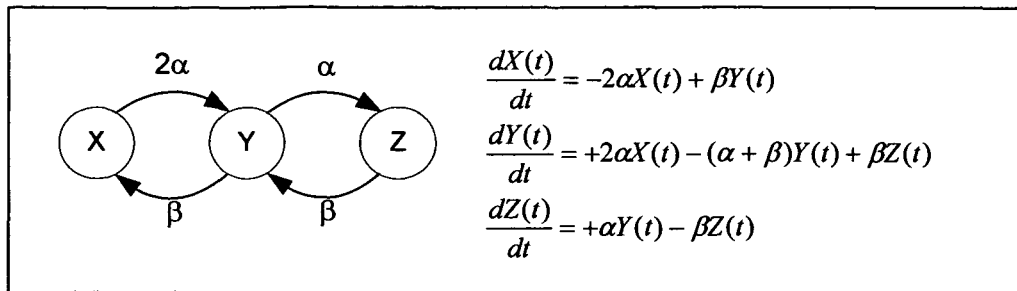


Abbildung 11: Markoff-Graph und Differentialgleichungen – heiße Redundanz

Für den stationären Zustand und  $V = X + Y$  ergibt sich:

$$V = \frac{1 + 2\delta}{1 + 2\delta + 2\delta^2}$$

- Gesamtverfügbarkeit zweier Komponenten in warmer Redundanz

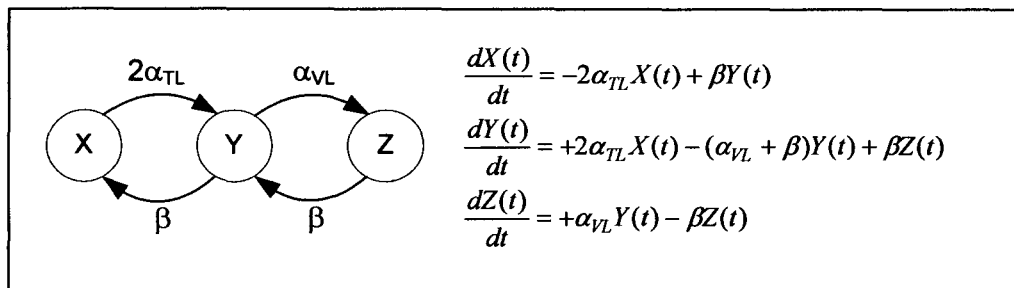


Abbildung 12: Markoff-Graph und Differentialgleichungen – warme Redundanz

Für den stationären Zustand und  $V = X + Y$  ergibt sich:

$$V = \frac{1 + 2 \cdot \frac{\alpha_{TL}}{\beta}}{1 + 2 \cdot \frac{\alpha_{TL}}{\beta} + 2 \cdot \frac{\alpha_{TL}\alpha_{VL}}{\beta^2}}$$

oder mit dem Verhältniswert  $\delta_i$ :

$$V = \frac{1 + 2\delta_{TL}}{1 + 2\delta_{TL} + 2\delta_{TL}\delta_{VL}}$$

mit

$$\begin{aligned}\delta_{TL} &= \frac{\alpha_{TL}}{\beta} = \frac{MTTR}{MTBF_{TL}} \\ \delta_{VL} &= \frac{\alpha_{VL}}{\beta} = \frac{MTTR}{MTBF_{VL}}\end{aligned}$$

- Gesamtverfügbarkeit zweier Komponenten in kalter Redundanz

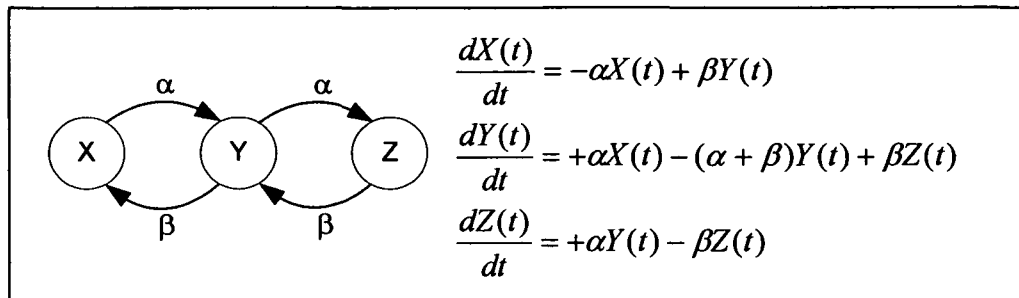


Abbildung 13: Markoff-Graph und Differentialgleichungen – kalte Redundanz

Für den stationären Zustand und  $V = X + Y$  ergibt sich:

$$V = \frac{1 + \delta}{1 + \delta + \delta^2}$$

#### Redundanzarten in Materialflusssystemen:

In Materialflusssystemen ist nur der Einsatz von kalten und warmen Redundanzen möglich. Heiße Redundanzen lassen sich nicht realisieren, da, wenn beide Elemente unter Volllast (also mit maximaler Kapazität) arbeiten und ein Element ausfällt, das noch arbeitende Element wie bisher weiterarbeiten würde und dadurch auch nicht die Fördereinheiten des ausgefallenen Elements übernommen werden könnten. Somit wäre, wie es die Definition vorsieht, in den Zuständen X (beide Elemente arbeiten) und Y (ein Element arbeitet, ein Element ausgefallen) zwar Verfügbarkeit gegeben, im Zustand Y wäre aber nicht der volle Durchsatz möglich. In diesem Fall würde er nur die Hälfte betragen. Entsprechend der Definition müsste der volle Durchsatz auch von einem Element alleine bewältigt werden können (vgl. Seite 22).

Bei der Parallelschaltung zweier Komponenten in warmer Redundanz wird angenommen, dass üblicherweise in Materialflusssystemen beide Elemente unter Halblast arbeiten. Fällt eine Komponente aus, übernimmt die andere die volle Last (vgl. Seite 22).

## 4 Analytische Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes

### 4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden einfache Berechnungsverfahren vorgestellt, mit denen der erforderliche technische Durchsatz von Materialflusselementen bestimmt werden kann, damit an der Senke ein gewisser Solldurchsatz ankommt. Zunächst sollen Systeme betrachtet werden, bei denen alle Prozesse als Taktprozesse ausgeführt sind. Schließlich soll die Frage beantwortet werden, wie sich ein stochastischer Prozess auf den erforderlichen technischen Durchsatz auswirkt.

Diese Berechnungsverfahren werden unter anderem bei der Validation verketteter Elemente eingesetzt. Hierbei soll überprüft werden, ob die in Serie geschalteten Elemente im Simulationsmodell richtig interagieren (siehe Kapitel 8.4).

### 4.2 Analytische Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes von Taktprozessen

Im folgenden Abschnitt wird, in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3649 [18] und 3978 [21], ein einfaches Berechnungsverfahren für Taktprozesse beschrieben. Dabei können Störungen, Puffer und Redundanzelemente berücksichtigt werden.

#### 4.2.1 Reihenschaltung ohne Puffer

Es soll ein Materialflusssystem betrachtet werden, bei dem alle Elemente in Serie angeordnet und keine Puffer vorhanden sind. Jedem Element wird eine Verfügbarkeit  $\eta_i$  zugeordnet.

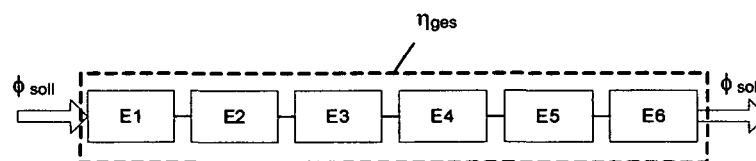


Abbildung 14: Reihenschaltung ohne Puffer

Als Gesamtverfügbarkeit ergibt sich:

$$\eta_{ges} = \prod_{i=1}^o \eta_i$$

o...Anzahl der Elemente

Der erforderliche technische Durchsatz beträgt dann:

$$\phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}}$$

Bei dieser Berechnung des erforderlichen technischen Durchsatzes können natürlich auch Redundanzen berücksichtigt werden, indem die entsprechende Einzelverfügbarkeit  $\eta_i$  durch die Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in warmer, bzw. kalter Redundanz ersetzt wird (siehe Seite 24 und 25). Dies gilt natürlich auch für die im Anschluss durchgeführten Berechnungen von Reihenschaltungen mit Puffern.

#### 4.2.2 Reihenschaltung mit Puffer

Es soll ein Materialflusssystem betrachtet werden, bei dem alle Elemente in Serie angeordnet sind und ein Puffer zur Störzeitüberbrückung vorgesehen ist. Jedem Element wird eine Verfügbarkeit  $\eta_i$  zugeordnet. Störungen des Puffers selbst sollen ebenfalls berücksichtigt werden (Verfügbarkeit des Puffers  $\eta_P$ ).

Der Puffer nimmt Teile auf, wenn die nachfolgenden Elemente gestört sind. Er gibt Teile ab, wenn die vorgeschalteten Elemente stillstehen. Deshalb wird der Puffer für die Berechnung des erforderlichen technischen Durchsatzes einmal dem vorgelagerten Anlagenteil (Anlagenteil I) und einmal dem nachfolgenden Anlagenteil (Anlagenteil II) zugeordnet.

**Pufferzuordnung zu Anlagenteil I** (vorgeschalteter Puffer für Anlagenteil II)  
Ausgangslage: Puffer voll

Kommt es in Anlagenteil I zu einer störungsbedingten Unterbrechung des Materialflusses, so können die Elemente des Anlagenteiles II noch solange arbeiten, bis der Puffer leer ist. Der Puffer bewirkt somit eine Erhöhung der Verfügbarkeit des Anlagenteiles I.

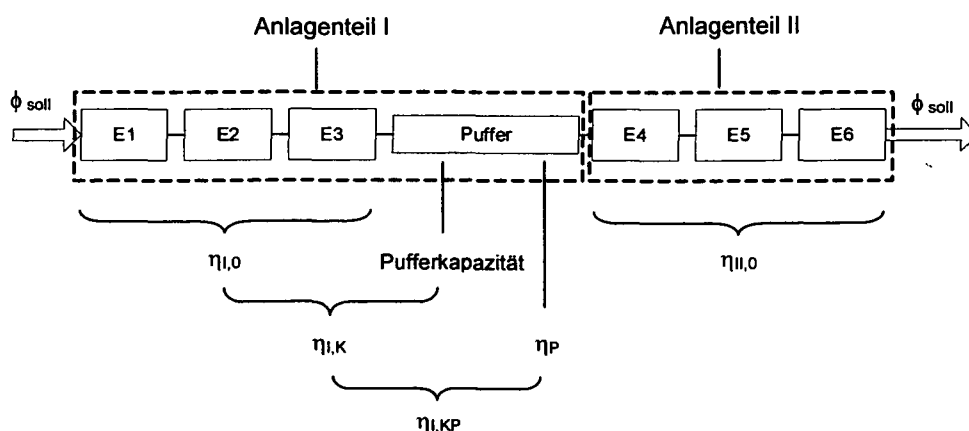


Abbildung 15: Reihenschaltung mit Puffer (Zuordnung zu Anlagenteil I)

Die Gesamtverfügbarkeiten der Anlagenteile I und II ohne Puffer betragen:

$$\eta_{I,0} = \prod_{i=1}^p \eta_i$$

p...Anzahl der Elemente  
vor dem Puffer

$$\eta_{II,0} = \prod_{i=p+1}^o \eta_i$$

o...Anzahl aller Elemente

Die Verfügbarkeit des Anlagenteiles I ohne Puffer kann auch folgendermaßen ausgedrückt werden (siehe Seite 15):

$$\eta_{I,0} = \frac{T_B - T_T}{T_B} = 1 - \frac{T_T}{T_B}$$

$T_B$ ...Belegungszeit

$T_T$ ...technische Ausfallzeit

Durch den Puffer wird ein Anteil f der Störzeiten im Anlagenteil I abgedeckt. Um diese Störzeit ist daher  $T_T$  zu reduzieren:

$$\eta_{I,K} = \frac{T_B - (T_T - f \cdot T_T)}{T_B} = \frac{T_B - T_T}{T_B} + f \cdot \frac{T_T}{T_B}$$

Für die Verfügbarkeit des Anlagenteiles I mit Berücksichtigung der Pufferkapazität ergibt sich somit:

$$\eta_{I,K} = \eta_{I,0} + f(1 - \eta_{I,0})$$

f...Anteil der Störzeit, die bei einer bestimmten  
Pufferkapazität überbrückt werden kann

Soll auch die Verfügbarkeit des Puffers berücksichtigt werden, muss dieser Wert noch mit  $\eta_P$  multipliziert werden:

$$\eta_{I,KP} = \eta_{I,K} \cdot \eta_P$$

Der erforderliche technische Durchsatz beträgt dann:

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,KP} \cdot \eta_{II,0}}$$

Die Pufferkapazität kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$K_{II} = x \cdot \phi_{II,tech} = x \cdot \frac{\phi_{soll}}{[\eta_{I,0} + f(1 - \eta_{I,0})] \eta_P \cdot \eta_{II,0}}$$

x...Pufferkapazität in Zeiteinheiten

Der Zusammenhang zwischen x und f wird auf den Seiten 30 bis 33 erläutert.

**Pufferzuordnung zu Anlagenteil II (nachgeschalteter Puffer für Anlagenteil I)**

Ausgangslage: Puffer leer

Kommt es in Anlagenteil II zu einer störungsbedingten Unterbrechung des Materialflusses, so können die Elemente des Anlagenteiles I noch solange arbeiten, bis der Puffer voll ist. Der Puffer bewirkt somit eine Erhöhung der Verfügbarkeit des Anlagenteiles II.

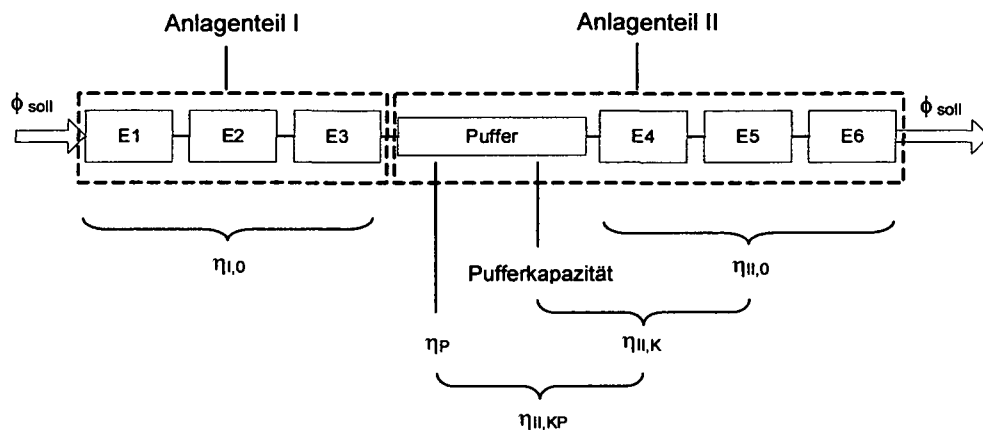


Abbildung 16: Reihenschaltung mit Puffer (Zuordnung zu Anlagenteil II)

In diesem Fall ergibt sich für die Verfügbarkeit des Anlagenteiles II mit Berücksichtigung der Pufferkapazität:

$$\eta_{II,K} = \eta_{II,0} + f(1 - \eta_{II,0})$$

Mit Berücksichtigung der Pufferverfügbarkeit erhält man:

$$\eta_{II,KP} = \eta_{II,K} \cdot \eta_P$$

Der erforderliche technische Durchsatz beträgt dann:

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{II,KP}}$$

Die Pufferkapazität kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$K_I = x \cdot \phi_{I,tech} = x \cdot \frac{\phi_{soll}}{[\eta_{II,0} + f(1 - \eta_{II,0})] \eta_P \cdot \eta_{I,0}}$$

Soll ein doppelwirkender Puffer installiert werden, so ist folgende Pufferkapazität erforderlich:

$$K_{ges} = K_I + K_{II}$$

Im Ausgangszustand muss  $K_I$  leer und  $K_{II}$  voll sein.

Wird ein Puffer mit ausreichender Kapazität installiert, sodass alle Störungen abgedeckt werden können, führt dies zu einer vollständigen Entkopplung der beiden Anlagenteile. Der erforderliche technische Durchsatz beträgt somit bei  $f = 1$ :

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_P}$$

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{II,0} \cdot \eta_P}$$

In der Praxis ist die Kapazität allerdings häufig begrenzt. Für die Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes muss bekannt sein, welcher Anteil  $f$  der Störungen bei einer bestimmten Pufferkapazität  $x$  in Zeiteinheiten (z.B. Minuten) abgedeckt wird. Hierfür muss entweder eine empirische Häufigkeitsverteilung der Störzeiten oder eine entsprechende stetige Verteilungsfunktion bekannt sein.

#### Bestimmung von $f$ bei empirischen Häufigkeitsverteilungen:

Aus einer empirisch ermittelten Häufigkeitsverteilung kann direkt abgelesen werden, welche Pufferkapazität in Minuten welchen Störzeitanteil abdeckt.

Dies soll anhand einer typischen Störzeitverteilung aus der Praxis verdeutlicht werden:

Klasse (min)	Anzahl der Störungen	Gesamte Stördauer in dieser Klasse (min)
2-<4	56	168
4-<6	13	65
6-<8	7	49
8-<10	9	81
10-<12	0	0
12-<14	0	0
14-<16	7	104
16-<18	0	0
18-<20	3	54
20-<22	0	0
22-<24	2	46
24-<26	0	0
26-<28	1	27
28-<30	0	0
30-<32	0	0
32-<34	0	0
34-<36	0	0
36-<38	1	37
38-<40	0	0
40-<42	0	0
42-<44	0	0
44-<46	0	0
46-<48	1	46
Summe	100	677

Tabelle 1: Klassifizierte Daten der Stördauer [18]



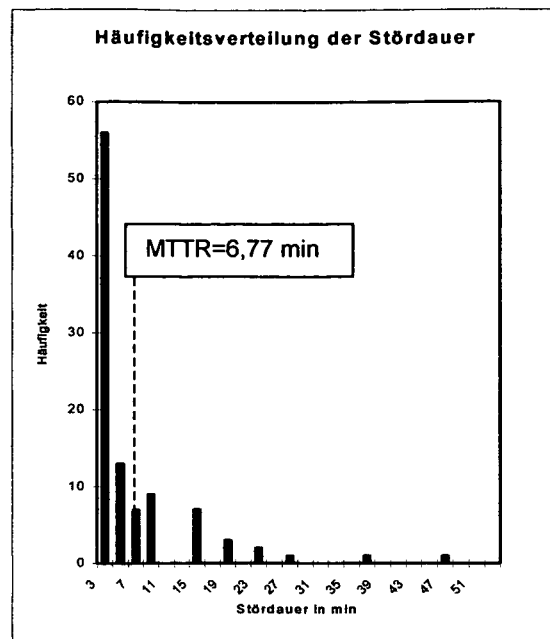


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Stördauer [18]

Wird eine Pufferkapazität  $x$  der Größe MTTR gewählt, werden alle

Störungen kleiner MTTR voll abgedeckt:  $168 + 65 = 233 \text{ min}$

Zusätzlich wird von den Störungen, die größer sind als MTTR,

jeweils der Zeitanteil MTTR abgedeckt:  $31 \cdot 6,77 = 210 \text{ min}$

Von allen Störungen (677 min) wird also folgender Anteil abgedeckt:  $443 \text{ min}$

Bei einer Pufferkapazität der Größe MTTR ( $x = 6,77 \text{ min}$ ) und einer Störzeitverteilung nach Abbildung 17 werden also ca. 2/3 aller Störzeiten abgedeckt ( $f = 443/677 = 0,65 \sim 2/3$ ).

Dieses Beispiel wurde aus der VDI-Richtlinie 3649 entnommen. In dieser werden allerdings keine Hinweise gegeben, wie der Überbrückungsanteil  $f$  bei stetigen Verteilungsfunktionen ermittelt werden kann. Diese Fragestellung soll im nächsten Abschnitt anhand der Exponentialverteilung beantwortet werden.

Bestimmung von f bei stetigen Verteilungsfunktionen:

Wird angenommen, dass die Störzeiten aus einer stetigen Verteilungsfunktion stammen, kann der Anteil f der Störzeitüberbrückung analytisch bestimmt werden.

Die Vorgangsweise wird anhand einer sehr typischen Verteilungsfunktion von Störzeiten, nämlich der Exponentialverteilung erläutert.

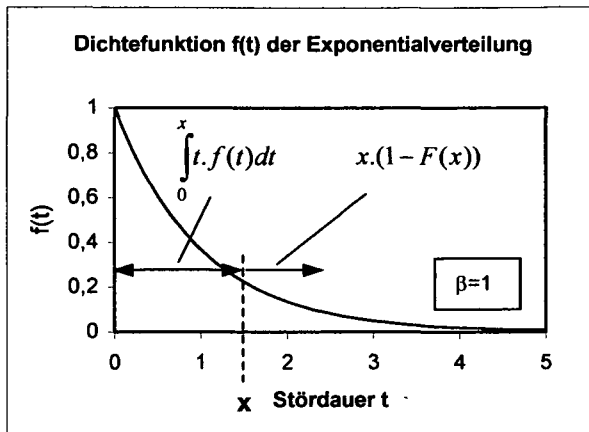


Abbildung 18: Dichtefunktion f(t) der Exponentialverteilung

Die Dichtefunktion f(t) der Exponentialverteilung mit konstantem Parameter  $\beta > 0$  ist folgendermaßen definiert:

$$f(t) = \beta \cdot e^{-\beta \cdot t}$$

$$\beta = \frac{1}{E(t)} = \frac{1}{MTTR}$$

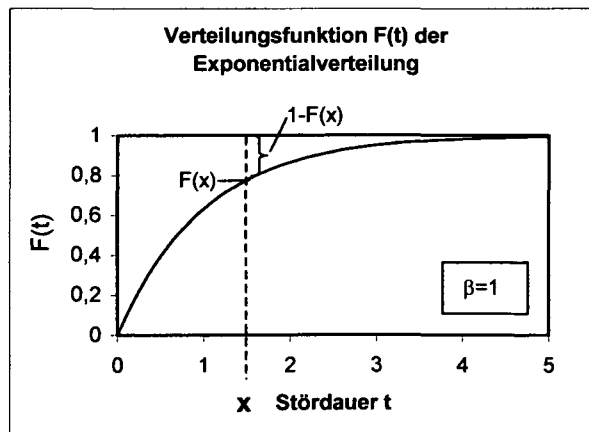


Abbildung 19: Verteilungsfunktion F(t) der Exponentialverteilung

Die Verteilungsfunktion F(t) der Exponentialverteilung mit konstantem Parameter  $\beta > 0$  ist folgendermaßen definiert:

$$F(t) = 1 - e^{-\beta \cdot t}$$

Die Aufgabe besteht nun darin, jene Zeitspanne (Erwartungswert  $E(x)$ ) zu berechnen, die im Mittel bei einer bestimmten Pufferkapazität x in Minuten überbrückt wird.

Der Überbrückungsanteil f beträgt dann:

$$f = \frac{E(x)}{E(t)} = \beta \cdot E(x)$$

Alle Störzeiten, die kürzer sind als  $x$  werden voll überbrückt. Von den Störungen, die länger dauern als  $x$  wird jeweils der Anteil  $x$  überbrückt (siehe Abbildung 18):

$$E(x) = \int_0^x t \cdot f(t) dt + x(1 - F(x))$$

$$E(x) = \beta \cdot \int_0^x e^{-\beta \cdot t} \cdot t \, dt + x \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

Das Integral kann mittels partieller Integration gelöst werden:

$$\int u' v = uv - \int uv' \quad \text{mit} \quad \begin{array}{ll} u' = e^{-\beta \cdot t} & v = t \\ u = -\frac{1}{\beta} e^{-\beta \cdot t} & v' = 1 \end{array}$$

Dies führt zu folgendem Ausdruck:

$$E(x) = \beta \cdot \left( -\frac{1}{\beta} \cdot x \cdot e^{-\beta \cdot x} - \int_0^x -\frac{1}{\beta} \cdot e^{-\beta \cdot t} dt \right) + x \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

$$E(x) = \beta \cdot \left( -\frac{1}{\beta} \cdot x \cdot e^{-\beta \cdot x} + \frac{1}{\beta} \left( -\frac{1}{\beta} \cdot e^{-\beta \cdot t} \right) \Big|_0^x \right) + x \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

$$E(x) = \beta \cdot \left( -\frac{1}{\beta} \cdot x \cdot e^{-\beta \cdot x} + \frac{1}{\beta} \left( -\frac{1}{\beta} \cdot e^{-\beta \cdot x} + \frac{1}{\beta} \right) \right) + x \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

$$E(x) = -x \cdot e^{-\beta \cdot x} - \frac{1}{\beta} \cdot e^{-\beta \cdot x} + \frac{1}{\beta} + x \cdot e^{-\beta \cdot x} = \frac{1}{\beta} \cdot (1 - e^{-\beta \cdot x})$$

Der Überbrückungsanteil  $f$  kann dann folgendermaßen berechnet werden:

$$f = \frac{E(x)}{E(t)} = \beta \cdot E(x) = 1 - e^{-\beta \cdot x} = F(x)$$

$$\boxed{f = 1 - e^{-\beta \cdot x} = F(x)}$$

Wird eine Pufferkapazität  $x$  der Größe MTTR gewählt ( $x=1/\beta$ ), dann werden 63% ( $f=0,63$ ) aller Störungen überbrückt. Dies entspricht in etwa dem Wert  $2/3$  bei der zuvor betrachteten empirischen Verteilungsfunktion.

## Berechnungsbeispiel zu 4.2.2

Es soll ein System, bestehend aus zwei störungsbehafteten Elementen mit gleichen Verfügbarkeiten  $\eta_0=0,9$  betrachtet werden, wobei zwischen diesen ein Puffer mit beschränkter Kapazität angeordnet ist. Dem Puffer soll eine Verfügbarkeit von  $\eta_P=0,95$  zugeordnet werden. Es wird angenommen, dass sämtliche Störzeiten aus Exponentialverteilungen stammen. Der geforderte Solldurchsatz betrage 100 Stk/h. Die erforderlichen technischen Durchsätze werden, bei Variation der Pufferkapazität in Minuten (x), mit Hilfe des zuvor vorgestellten Berechnungsverfahrens bestimmt.

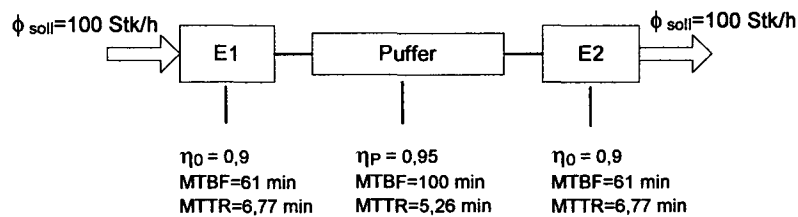


Abbildung 20: Anlagenkonfiguration Taktprozess

Die Ergebnisse des zuvor vorgestellten Berechnungsverfahrens können aus der nachfolgenden Tabelle entnommen werden:

x min	f %	$\eta_0$	$\eta_K$	$\eta_P$	$\eta_{KP}$	$\phi_{I,tech}=\phi_{II,tech}$ Stk/min	Bediendauer min	$K_I=K_{II}$ Stk	$K_{ges}$ Stk	$\phi_{I,tech}=\phi_{II,tech}$ Stk/h
1	13,7	0,9	0,914	0,950	0,868	2,133	0,469	2	4	128,0
2	<b>25,6</b>	<b>0,9</b>	<b>0,926</b>	<b>0,950</b>	<b>0,879</b>	<b>2,105</b>	<b>0,475</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>126,3</b>
3	35,8	0,9	0,936	0,950	0,889	2,082	0,480	6	12	124,9
4	44,6	0,9	0,945	0,950	0,897	2,063	0,485	8	17	123,8
5	<b>52,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,952</b>	<b>0,950</b>	<b>0,905</b>	<b>2,046</b>	<b>0,489</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>122,8</b>
6	58,8	0,9	0,959	0,950	0,911	2,032	0,492	12	24	121,9
7	<b>64,4</b>	<b>0,9</b>	<b>0,964</b>	<b>0,950</b>	<b>0,916</b>	<b>2,020</b>	<b>0,495</b>	<b>14</b>	<b>28</b>	<b>121,2</b>
8	69,3	0,9	0,969	0,950	0,921	2,010	0,497	16	32	120,6
9	<b>73,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,974</b>	<b>0,950</b>	<b>0,925</b>	<b>2,002</b>	<b>0,500</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	<b>120,1</b>
10	77,2	0,9	0,977	0,950	0,928	1,994	0,501	20	40	119,6
11	80,3	0,9	0,980	0,950	0,931	1,988	0,503	22	44	119,3
12	83,0	0,9	0,983	0,950	0,934	1,982	0,504	24	48	118,9
13	85,3	0,9	0,985	0,950	0,936	1,978	0,506	26	51	118,7
14	87,4	0,9	0,987	0,950	0,938	1,973	0,507	28	55	118,4
15	89,1	0,9	0,989	0,950	0,940	1,970	0,508	30	59	118,2
16	<b>90,6</b>	<b>0,9</b>	<b>0,991</b>	<b>0,950</b>	<b>0,941</b>	<b>1,967</b>	<b>0,508</b>	<b>31</b>	<b>62</b>	<b>118,0</b>

Tabelle 2: Ergebnisse des Berechnungsverfahrens für Taktprozesse

Die fett gedruckten Werte in Tabelle 2 dienten als Eingabeparameter für die Simulation (vgl. Seite 138).

In der nachfolgenden Abbildung ist der Zusammenhang zwischen Pufferkapazität  $x$  in Minuten und Anteil  $f$  der überbrückbaren Störzeit einer Exponentialverteilung mit Parameter  $\beta=1/\text{MTTR}=1/6,77$  dargestellt.

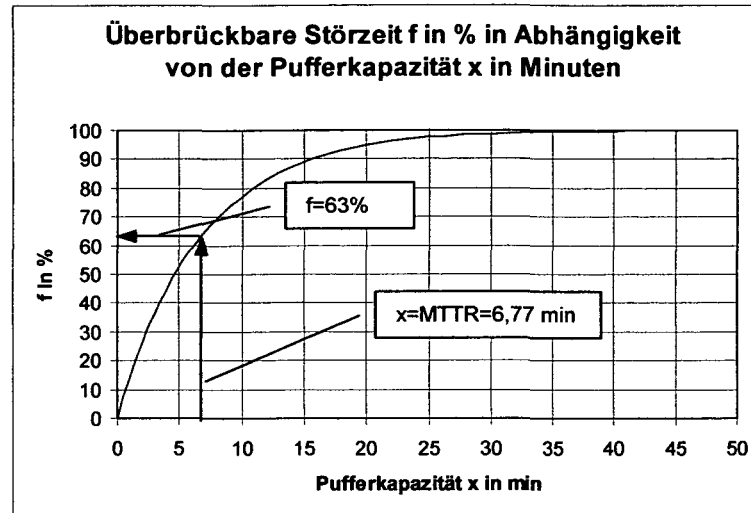
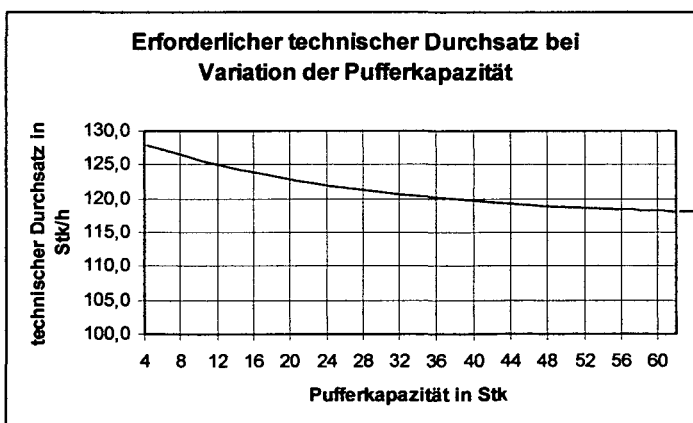


Abbildung 21: Überbrückbare Störzeit  $f$  in % für die Exponentialverteilung

Aus dem nachfolgenden Diagramm kann der erforderliche technische Durchsatz der Anlagenkomponenten in Abhängigkeit von der Pufferkapazität abgelesen werden, damit die Anlage 100 Stk/h ausstößt.



ohne Puffer:

$$\phi_{\text{tech}} = \frac{\phi_{\text{soll}}}{\eta_0 \cdot \eta_0} = \frac{100}{0,9 \cdot 0,9} = 123,5 \text{ Stk/h}$$

ausreichend großer Puffer:

$$\phi_{\text{tech}} = \frac{\phi_{\text{soll}}}{\eta_0 \cdot \eta_p} = \frac{100}{0,9 \cdot 0,95} = 117 \text{ Stk/h}$$

Abbildung 22: Technischer Durchsatz in Abhängigkeit von der Pufferkapazität

**Hinweis:** Dieses Beispiel wird in Kapitel 10 auch simulationstechnisch behandelt. Dabei dienen die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens als Eingabeparameter für die Simulationsexperimente. Während jedes Simulationslaufes sollte sich dann ein mittlerer Durchsatz von 100 Stk/h einstellen (siehe Seite 138).

Soll die Pufferkapazität nicht in Zeiteinheiten (x), sondern in Stück (K) vorgegeben werden, so führt dies, unter Verwendung der bereits bekannten Zusammenhänge

$$f = 1 - e^{-\beta \cdot x} = F(x)$$

und

$$K_I = K_{II} = K = x \cdot \phi_{tech} = x \cdot \frac{\phi_{soll}}{[\eta_0 + (1 - e^{-\beta \cdot x})(1 - \eta_0)] \eta_P \cdot \eta_0}$$

zu folgender transzendenten Gleichung mit der Unbekannten x:

$$f(x) = K \cdot \eta_0^2 \cdot \eta_P + K \cdot \eta_0 \cdot (1 - \eta_0) \cdot \eta_P \cdot (1 - e^{-\beta \cdot x}) - \phi_{soll} \cdot x = 0$$

Die Nullstelle dieser Funktion kann beispielsweise mittels des Newtonschen Näherungsverfahrens oder graphisch bestimmt werden.

für z.B.

$$K = 1 \text{ Stk (} K_{ges} = 2 \text{ Stk)}$$

$$\eta_0 = 0,9$$

$$\eta_P = 0,95$$

$$\beta = 0,1477 \text{ 1/min (= 1/MTTR = 1/6,77)}$$

$$\phi_{soll} = 1,666 \text{ Stk/min (= 100 Stk/h)}$$

ergibt sich folgende Gleichung:

$$f(x) = 0,7695 + 0,0855 \cdot (1 - e^{-0,1477 \cdot x}) - 1,666 \cdot x = 0$$

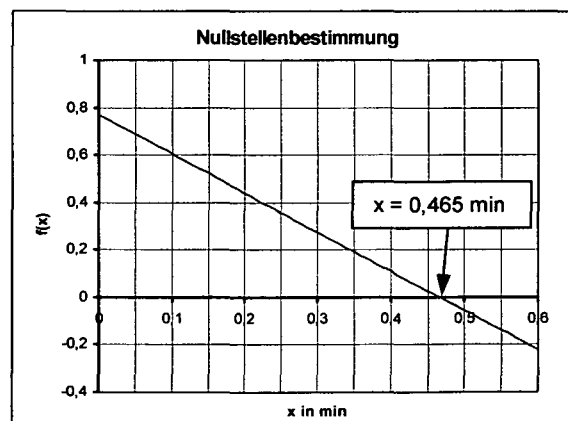


Abbildung 23: Graphische Nullstellenbestimmung

Die Nullstelle dieser Funktion befindet sich bei  $x = 0,465 \text{ min}$  (siehe Abbildung 23).

Somit ergibt sich für

$$f = 1 - e^{-0,1477 \cdot 0,465} = 0,066 = 6,6\%$$

und für

$$\phi_{tech} = \frac{1,666}{(0,9 + 0,66 \cdot 0,1) \cdot 0,95 \cdot 0,9} = 2,149 \text{ Stk/min} = 129 \text{ Stk/h}$$

## 4.3 Auswirkung stochastischer Prozesse auf den erforderlichen technischen Durchsatz

In diesem Kapitel soll die Frage beantwortet werden, welche Auswirkung ein stochastischer Prozess auf den erforderlichen technischen Durchsatz hat. Hierfür wird die Reihenschaltung eines Taktprozesses und eines stochastischen Prozesses untersucht, wobei die Reihenfolge der Verschaltung für die Berechnung unerheblich ist.

### 4.3.1 Reihenschaltung mit stochastischem Prozess ohne Puffer

Es wird ein Materialflusssystem betrachtet, bei dem zwei Elemente in Serie angeordnet sind und kein Puffer vorhanden ist. Die Bedienzeiten von Element E1 sollen als konstant (Taktprozess), jene von Element E2 als exponentialverteilt (stochastischer Prozess) angenommen werden. Es werden keine Störungen der Elemente berücksichtigt.

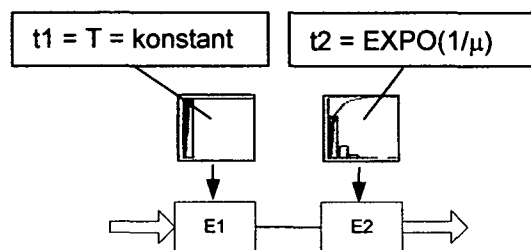


Abbildung 24: Taktprozess / stochastischer Prozess ohne Puffer

Es werden nur jene Fälle, für die  $T \geq \frac{1}{\mu}$  gilt, betrachtet (bei  $T < \frac{1}{\mu}$  würden sich unendlich lange Warteschlangen bilden).

Für den Verhältniswert  $\kappa$  bedeutet dies:  $\kappa = \frac{E(t_2)}{E(t_1)} = \frac{\frac{1}{\mu}}{T} = \frac{1}{\mu \cdot T} \leq 1$

Um den erforderlichen technischen Durchsatz mit dem bereits bekannten Ansatz

$$\phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_0}$$

berechnen zu können, muss die Verfügbarkeit  $\eta_0$  der Reihenschaltung bestimmt werden:

Jene Bedienzeiten von Element E2, die länger dauern als der Taktprozess des vorgelagerten Elementes E1 führen zu Blockierungen von E1, d.h. die Verfügbarkeit der Reihenschaltung wird dadurch reduziert.

Es muss also bekannt sein, wie lange im Mittel jene Prozesszeiten von E2 dauern, die länger sind als der Taktprozess in E1. Die Berechnung dieses Erwartungswertes folgt auf der nächsten Seite.

Der Erwartungswert für  $t$  größer  $T$  beträgt:

$$E(t)_{|T \leq t \leq \infty} = \frac{\int_T^{\infty} t \cdot f(t) dt}{1 - F(T)}$$

$$E(t)_{|T \leq t \leq \infty} = \frac{\int_T^{\infty} t \cdot \mu \cdot e^{-\mu t} dt}{1 - (1 - e^{-\mu T})}$$

Mittels partieller Integration erhält man:

$$E(t)_{|T \leq t \leq \infty} = e^{\mu T} \cdot \frac{-(\mu \cdot t + 1) \cdot e^{-\mu t}}{\mu} \Bigg|_T^{\infty} = \frac{\mu \cdot T + 1}{\mu}$$

$$E(t)_{|T \leq t \leq \infty} = T + \frac{1}{\mu}$$

Für  $0 \leq t \leq T$  ist Verfügbarkeit gegeben, da es in E1 zu keinen Blockierungen kommt. Im Bereich  $T \leq t \leq \infty$  beträgt die Verfügbarkeit:

$$\frac{T}{T + \frac{1}{\mu}}$$

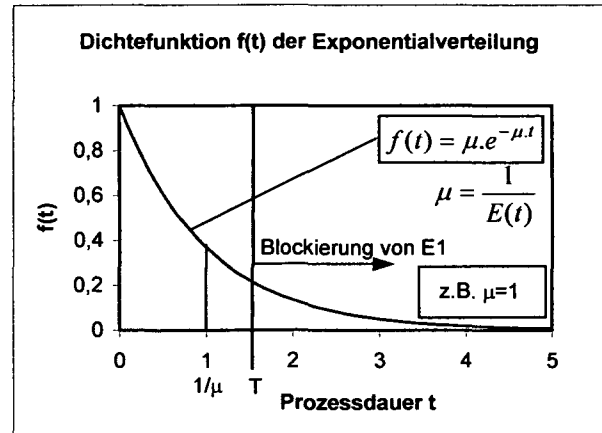


Abbildung 25: Dichtefunktion  $f(t)$

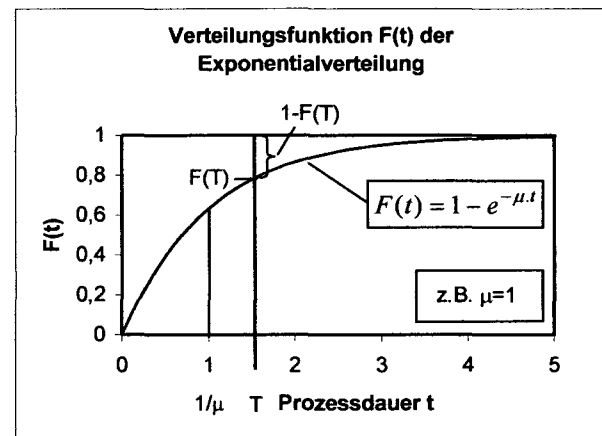


Abbildung 26: Verteilungsfunktion  $F(t)$

Somit ergibt sich für die Gesamtverfügbarkeit:  $\eta_0 = F(T) + (1 - F(T)) \cdot \frac{T}{T + \frac{1}{\mu}} = 1 - e^{-\mu T} \cdot \frac{1}{\mu \cdot T + 1}$

oder mit  $\kappa$ :

$$\eta_0 = 1 - e^{-\frac{1}{\kappa}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\kappa} + 1} = 1 - e^{-\frac{1}{\kappa}} \cdot \frac{\kappa}{\kappa + 1}$$

$$\eta_0 = 1 - e^{-\frac{1}{\kappa}} \cdot \frac{\kappa}{\kappa + 1}$$

Für  $\kappa = 1$  ergibt sich z.B. ein  $\eta_0$  von:  $\eta_0 = 1 - e^{-1} \cdot \frac{1}{2} = 0,816$

Die erforderlichen technischen Durchsätze können somit folgendermaßen berechnet werden:

$$\phi_{1,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_0}$$

$$\phi_{2,tech} = \frac{\phi_{1,tech}}{\kappa}$$



### 4.3.2 Reihenschaltung mit stochastischem Prozess und Puffer

Es wird ein Materialflusssystem betrachtet, bei dem zwischen den beiden Elementen ein Puffer zur Überbrückung systembedingter Wartezeiten angeordnet ist. Es sollen ebenfalls keine Störungen der Elemente berücksichtigt werden.

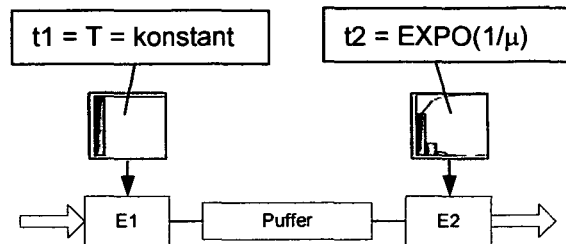


Abbildung 27: Taktprozess / stochastischer Prozess mit Puffer

Der Puffer bewirkt eine Erhöhung der Gesamtverfügbarkeit. Damit die Gesamtverfügbarkeit mit dem bereits bekannten Ansatz

$$\eta_{ges} = \eta_0 + f \cdot (1 - \eta_0)$$

berechnet werden kann, muss zuvor bestimmt werden, welcher Anteil  $f$  der Bedienzeiten bei einer bestimmten Pufferkapazität  $x$  in Zeiteinheiten überbrückt wird.

Dieser kann folgendermaßen berechnet werden:

$$f = \frac{E(t)_x | T \leq t \leq \infty - T}{E(t)_{T \leq t \leq \infty} - T}$$

mit 
$$E(t)_x | T \leq t \leq \infty = \frac{\int_0^x t \cdot \mu \cdot e^{-\mu \cdot t} dt + x \cdot e^{-\mu \cdot x}}{1 - F(T)}$$

und 
$$E(t)_{T \leq t \leq \infty} = T + \frac{1}{\mu}$$

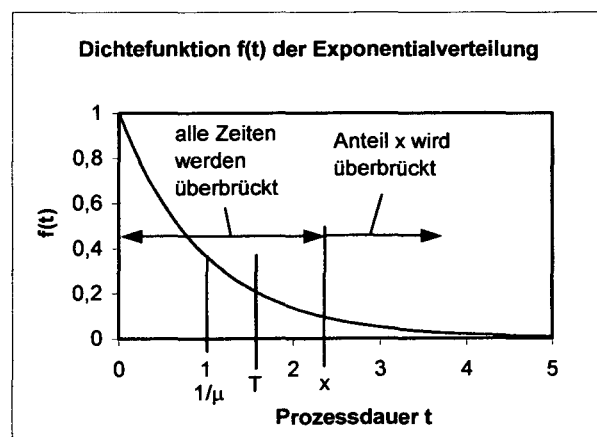


Abbildung 28: Überbrückungsanteile

Das Integral im Ausdruck  $E(t)_{x|T \leq t \leq \infty} = \frac{\int_T^x t \cdot \mu \cdot e^{-\mu \cdot t} dt + x \cdot e^{-\mu \cdot x}}{1 - F(T)}$

kann mittels partieller Integration gelöst werden und führt zu folgendem Ergebnis:

$$E(t)_{x|T \leq t \leq \infty} = -\left(x + \frac{1}{\mu}\right) \cdot e^{-\mu \cdot (x-T)} + T + \frac{1}{\mu} + x \cdot e^{-\mu \cdot (x-T)}$$

Somit ergibt sich für f folgender Ausdruck:

$$f = 1 - e^{-\mu \cdot (x-T)}$$

oder unter Verwendung von  $\kappa$  und  $\phi_{1,tech}$ :

$$f = 1 - e^{-\frac{1}{\kappa} \phi_{1,tech} \left(x - \frac{1}{\phi_{1,tech}}\right)}$$

$$\mu = \frac{1}{\kappa \cdot T}$$

$$\phi_{1,tech} = \frac{1}{E(t_1)} = \frac{1}{T}$$

Der bekannte Ansatz

$$\phi_{1,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}}$$

mit

$$\eta_{ges} = \eta_0 + f \cdot (1 - \eta_0) \quad \text{und} \quad f = 1 - e^{-\frac{1}{\kappa} \phi_{1,tech} \left(x - \frac{1}{\phi_{1,tech}}\right)}$$

führt schließlich zu folgender transzendenten Gleichung f(x):

$$f(x) = \phi_{1,tech} \cdot \eta_0 + \phi_{1,tech} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\kappa} \phi_{1,tech} \left(x - \frac{1}{\phi_{1,tech}}\right)}\right) \cdot (1 - \eta_0) - \phi_{soll} = 0$$

mit

$$\eta_0 = 1 - e^{-\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\kappa}{\kappa + 1}}$$

x ... Pufferkapazität in Zeiteinheiten

Daraus kann der erforderliche technische Durchsatz  $\phi_{1,tech}$  wiederum mittels eines Näherungsverfahrens oder graphisch bestimmt werden.

Für  $\phi_{2,tech}$  ergibt sich schließlich:  $\phi_{2,tech} = \frac{\phi_{1,tech}}{\kappa}$

Die Pufferkapazität K beträgt dann:

$$K = (x - T) \cdot \phi_{1,tech} = \left( x - \frac{1}{\phi_{1,tech}} \right) \cdot \phi_{1,tech}$$

$$K = x \cdot \phi_{1,tech} - 1$$

Soll ein doppeltwirkender Puffer installiert werden, so ist die doppelte Kapazität erforderlich:

$$K_{ges} = 2 \cdot K = 2 \cdot (x \cdot \phi_{1,tech} - 1)$$

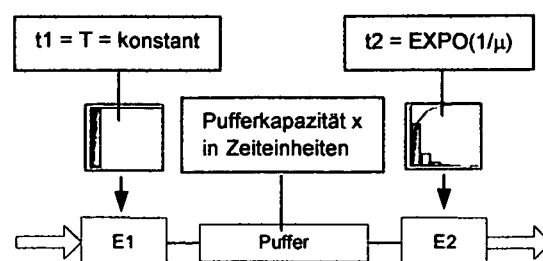
Wobei der Puffer im Ausgangszustand mit K Fördereinheiten gefüllt sein muss.

Der Puffer hat nämlich zwei Funktionen:

- Er füllt sich, wenn der stochastische Prozess länger dauert als der Taktprozess  
Das Element E1 kann solange arbeiten, bis der Puffer voll ist.  
Ausgangslage: Puffer leer
- Er leert sich, wenn der stochastische Prozess kürzer dauert als der Taktprozess  
Das Element E2 kann solange arbeiten, bis der Puffer leer ist.  
Ausgangslage: Puffer voll

### Berechnungsbeispiel zu 4.3.2

Es soll die Reihenschaltung zweier Elemente untersucht werden, wobei zwischen diesen ein Puffer mit beschränkter Kapazität angeordnet ist. Der Verhältniswert  $\kappa$  betrage 0,9. Es soll sich ein Durchsatz von 100 Stk/h einstellen. Die erforderlichen technischen Durchsätze werden, bei Variation der Pufferkapazität in Minuten (x), mit Hilfe des zuvor vorgestellten Berechnungsverfahrens bestimmt (siehe Tabelle 3).



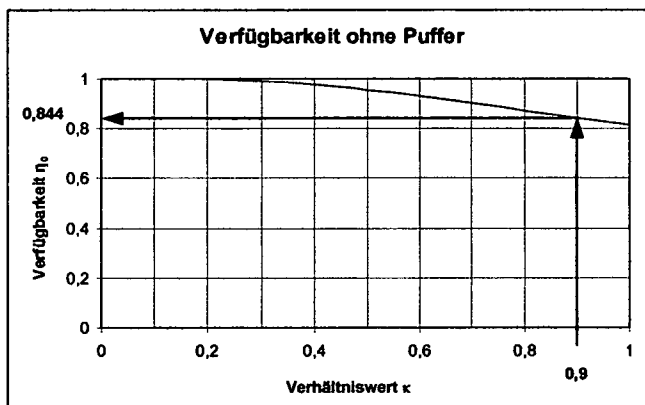
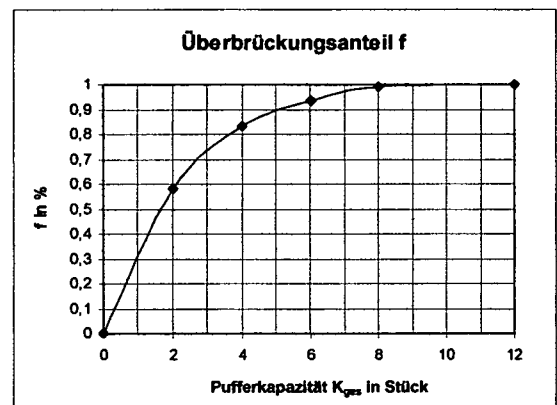
$$\kappa = \frac{E(t_2)}{E(t_1)} = \frac{\frac{1}{\mu}}{T} = \frac{1}{\mu \cdot T} = 0,9$$

Abbildung 29: Anlagenkonfiguration stochastischer Prozess

$\kappa$	$\chi$ min	$\eta_0$	$f$ %	$K_{ges}$ Stk	$\phi_{1,tech}$ Stk/h	$\phi_{2,tech}$ Stk/h
0,9	1,0	0,844	58,0	2	107,1	119,0
0,9	1,5	0,844	83,4	4	104,7	116,3
0,9	2,0	0,844	93,4	6	103,3	114,7
0,9	3,0	0,844	98,9	8	101,7	113,0
0,9	4,0	0,844	99,8	12	100,8	112,0

Tabelle 3: Ergebnisse des Berechnungsverfahrens für stochastischen Prozess

In Abbildung 30 ist die Verfügbarkeit  $\eta_0$  (ohne Puffer) in Abhängigkeit vom Verhältniswert  $\kappa$  für eine Exponentialverteilung dargestellt. Die Abbildung daneben zeigt den Zusammenhang zwischen Anteil  $f$  der überbrückbaren Bedienzeiten und der Pufferkapazität.


Abbildung 30: Verfügbarkeit  $\eta_0$  in Abhängigkeit von  $\kappa$ 

Abbildung 31: Überbrückungsanteil  $f$ 

Die Ergebnisse für den Taktprozess und den stochastischen Prozess in Abhängigkeit von der Pufferkapazität sind in Abbildung 32 dargestellt.

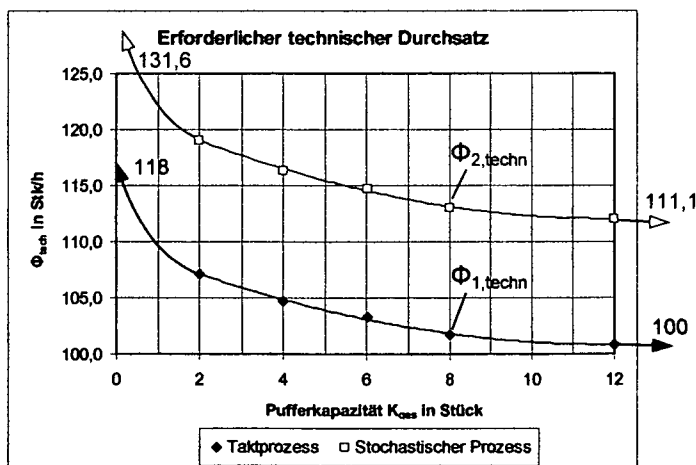


Abbildung 32: Erforderlicher technischer Durchsatz

ohne Puffer:

$$\phi_{1,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_0} = \frac{100}{0,844} = 118,5 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{2,tech} = \frac{\phi_{1,tech}}{\chi} = \frac{118,5}{0,9} = 131,6 \text{ Stk/h}$$

ausreichend großer Puffer:

$$\phi_{1,tech} = \phi_{soll} = 100 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{2,tech} = \frac{\phi_{1,tech}}{\chi} = \frac{100}{0,9} = 111,1 \text{ Stk/h}$$

**Hinweis:** Auch dieses Beispiel wird in Kapitel 10 simulationstechnisch behandelt (siehe Seite 139).

## 4.4 Zusammenfassung

Die analytische Berechnung des erforderlichen technischen Durchsatzes führt bereits bei einfachen Systemkonfigurationen, wie in Kapitel 4.2 und 4.3, zu sehr komplexen Ansätzen, vor allem wenn stochastische Verteilungen zu berücksichtigen sind. In diesem Fall ist das Lösen einer transzendenten Gleichung erforderlich.

Soll bei der Berechnung des erforderlichen technischen Durchsatzes die Pufferkapazität in Stück und nicht in Zeiteinheiten vorgegeben werden, führt dies ebenfalls zu einer transzendenten Gleichung, die mittels Näherungsverfahren oder graphisch gelöst werden muss.

Mit den vorgestellten Berechnungsverfahren ist es nicht möglich, die Wirkung von Puffern zu berücksichtigen, die zur Störzeitüberbrückung und gleichzeitig zur Überbrückung systembedingter Wartezeiten, die durch stochastische Bedien-, bzw. Transportprozesse entstehen können, eingesetzt werden sollen.

Somit bietet sich die diskrete Simulation als Planungsinstrument an. Dieses ermöglicht es, beliebige Systeme (mit Taktprozessen, stochastischen Prozessen, Puffern mit beschränkten Kapazitäten, Störungen, Redundanzen, ...) in einem Computermodell abzubilden und Simulationsexperimente durchzuführen.

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit der diskreten Simulationstechnik.

## 5 Diskrete Simulation

### 5.1 Begriffsdefinition

Ganz allgemein versteht man unter Simulation (lat. simulare ... ähnlich machen, nachbilden, nachahmen) in der Informatik die Nachbildung von Vorgängen auf einer Rechenanlage auf der Basis von Modellen. Im Rahmen der VDI Richtlinie 3633 wird diese sehr allgemeine Definition für den Bereich Materialfluss, Logistik und Produktion wie folgt konkretisiert: „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt“ [4].

Zum besseren Verständnis seien noch weitere Definitionen angeführt:

- Discrete-event simulation concerns the modeling of a system as it evolves over time by a representation in which the state variables change instantaneously at separate points in time. These points in time are the ones at which an event occurs. Although discrete-event simulation could conceptually be done by hand calculations, the amount of data that must be stored and manipulated for most real-world systems dictates that discrete-event simulations be done on a digital computer [5].
- We will define simulation as the process of designing a model of a real system and conducting experiments with this model for the purpose of understanding the behavior of the system and/or evaluating various strategies for the operation of the system. We consider simulation to include both the construction of the model and the experimental use of the model for studying a problem [6].
- Simulation is the imitation of a real-world process or system over time. The behavior of a system as it evolves over time is studied by developing a simulation model. This model usually takes the form of a set of assumptions concerning the operation of the system. These assumptions are expressed in mathematical, logical, and symbolic relationships between the entities, or object of interest, of the system [7].

In Abbildung 33 ist dargestellt, wie das Verhalten realer Systeme untersucht werden kann.

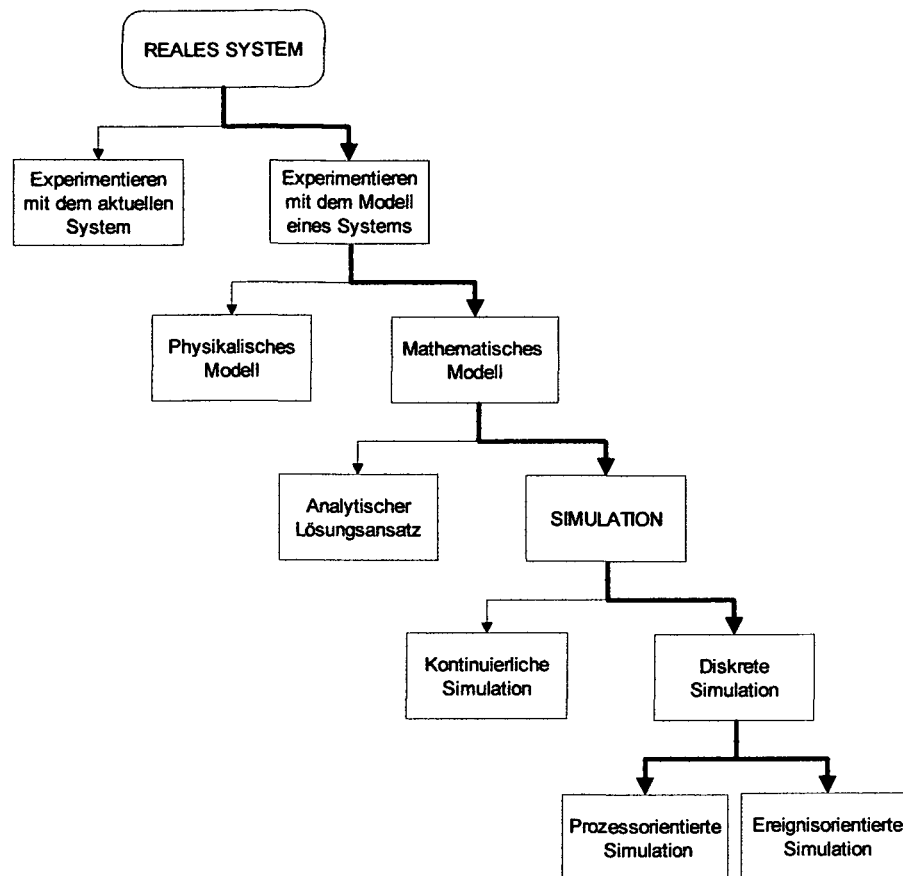


Abbildung 33: Möglichkeiten zur Untersuchung von Realsystemen [5]

**Ereignisorientierung:** Hier wird der Simulationslauf als eine Folge von Ereignissen dargestellt, die den Zustand des Systems beeinflussen. Die einzelnen Ereignisse werden vom Anwender definiert und zeitlich eingeplant. Ein rein ereignisorientiertes Simulationssystem stellt dem Anwender lediglich eine Bibliothek von Hilfsfunktionen und eine generelle Ablaufsteuerung zur Verfügung [5].

**Prozessorientierung:** Hier wird der Simulationslauf als eine Folge von Prozessen dargestellt, die durch bewegliche Transaktionen ausgelöst werden. Prozesse sind häufig wiederkehrende Folgen von Ereignissen. Der Anwender definiert nicht mehr die einzelnen Ereignisse, sondern er verwendet vordefinierte Prozesse, die jeweils mehrere Ereignisse umfassen. Es können somit nur jene Aspekte des zu simulierenden Systems abgebildet werden, für die die entsprechenden Prozesse definiert sind [5].

Simulationsmodelle können im wesentlichen folgendermaßen klassifiziert werden:

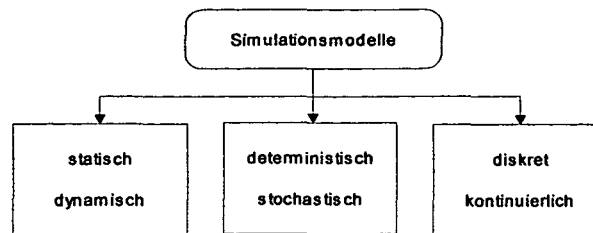


Abbildung 34: Klassifikation von Simulationsmodellen nach 3 Kriterien [7] [4]

Wie Abbildung 34 zu entnehmen ist, werden die Modelltypen und –klassen über gegensätzliche Begriffspaare charakterisiert und abgegrenzt [7] [4]:

Kriterium 1:

- In **statischen** Simulationsmodellen ändert sich das Systemverhalten nicht mit der Zeit. Als Beispiel seien hier Zufallsexperimente angeführt (Monte Carlo Simulation).
- Im Gegensatz dazu verändert sich bei **dynamischen** Simulationen das Systemverhalten über der Zeit.

Kriterium 2:

- In einem **deterministischen** Simulationsmodell kommen keine Zufallsvariablen vor.
- Im Gegensatz dazu können für Eingangsgrößen **stochastischer** Simulationsmodelle auch Zufallsvariablen verwendet werden.

Kriterium 3:

- In **diskreten** Simulationsmodellen ändern sich die Zustandsvariablen nur zu bestimmten Zeitpunkten und können auch nur bestimmte Werte annehmen.
- Im Gegensatz dazu können die Zustandsvariablen eines **kontinuierlichen** Simulationsmodells jeden beliebigen Wert annehmen und sich auch kontinuierlich über der Zeit verändern.

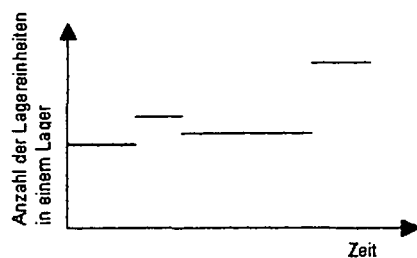


Abbildung 35: Diskrete Simulation [8]

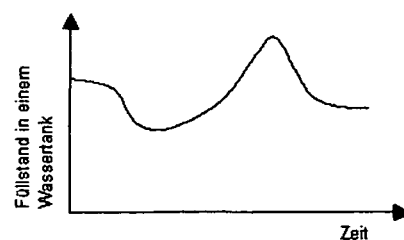


Abbildung 36: Kontinuierliche Simulation [8]



Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich diskrete, dynamische Simulationsmodelle mit sowohl deterministischen, als auch stochastischen Inputparametern untersucht.

Dabei kommt das Simulationssystem Arena 7.01 Professional Edition zum Einsatz, welches auf der Simulationssprache SIMAN basiert und somit sowohl das Erstellen ereignis-, als auch prozessorientierter Simulationsmodelle ermöglicht. Die Entwicklung der Module erfolgte allerdings ereignisorientiert auf SIMAN-Ebene, damit nur jene Funktionen im Computermodell integriert werden, die unbedingt notwendig sind.

Als Überblick sollen noch grundlegende Begriffe der diskreten Simulation angeführt und definiert werden [8]:

<b>System:</b>	Sammlung von Objekten, die zusammenwirken bzw. in Wechselwirkung zueinander stehen, um einen bestimmten Zweck zu erfüllen
<b>Systemzustand:</b>	Wird durch eine Sammlung von Variablen beschrieben, deren Werte zu jedem Zeitpunkt ein System vollständig beschreiben
<b>Modellkonzept:</b>	Vereinfachte Beschreibung des Realproblems (z.B. strukturiertes Wortmodell, Flussdiagramm)
<b>Computermodell:</b>	Softwaretechnische Nachbildung des Modellkonzepts mit einem entsprechenden Simulationswerkzeug
<b>Transaktion:</b>	Objekt (Entity) in einem System (z.B. Werkstück, Arbeiter)
<b>Quelle:</b>	Ort, an dem Transaktionen erzeugt werden (Transaktionen treten in das System ein)
<b>Senke:</b>	Ort, an dem Transaktionen vernichtet werden (Transaktionen treten aus dem System aus)
<b>Attribut:</b>	Eigenschaft einer Transaktion (z.B. Typ eines Werkstücks)
<b>Ereignis:</b>	Augenblicklicher Vorfall, der den Zustand des Systems ändert (z.B. Ankunft einer Fördereinheit vor einem Puffer einer Bedienstation)
<b>Aktivität:</b>	Zeitverzögerung bestimmter Länge (z.B. Taktzeit einer Bedienstation)
<b>Verzögerung:</b>	Zeitverzögerung unbestimmter Länge (z.B. Wartezeit in einer Warteschlange vor einer Bedienstation)

## 5.2 Anwendung der diskreten Simulation

Eine Simulationsstudie erfordert, wie alle Experimente, einen besonderen Aufwand und muss deshalb überlegt eingesetzt werden [9].

Sinnvoll ist ein Einsatz, wenn

- die Grenzen analytischer Methoden erreicht sind,
- komplexe Zusammenhänge die menschliche Vorstellungskraft überfordern,
- ein Experiment in der Realität zu teuer, zu gefährlich oder nicht möglich ist oder
- neue Lösungen, über die kein Erfahrungswissen vorliegt, überprüft werden sollen.

Die nachfolgende Abbildung soll einen Überblick über die Möglichkeiten des Experimentierens mit dem Modell geben.

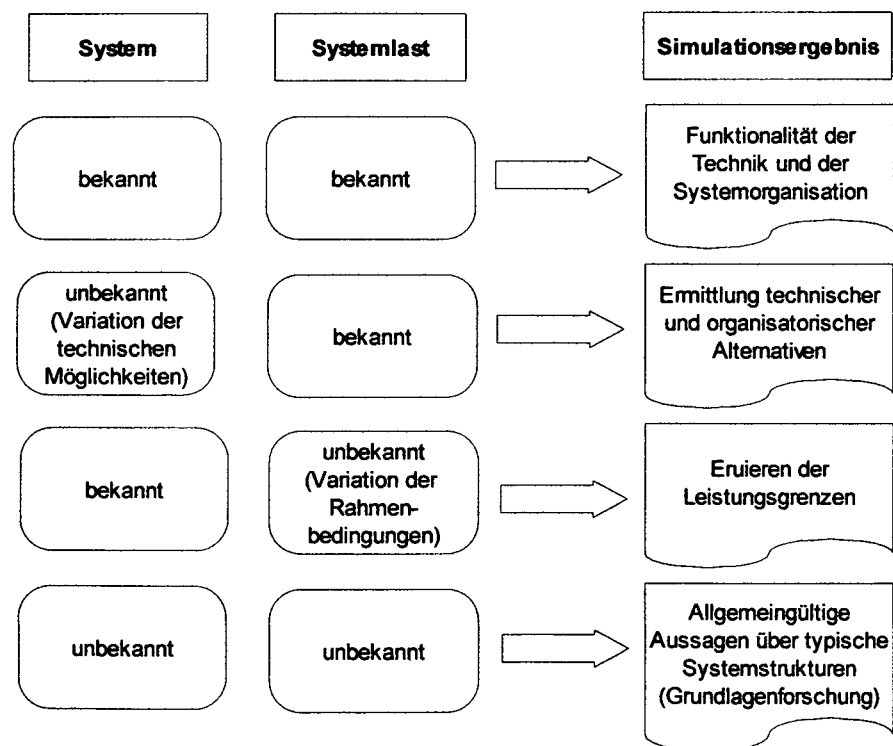


Abbildung 37: Möglichkeiten des Experimentierens mit dem Modell [4]

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Materialflusssystemen unterschiedlicher Strukturen und Systemlasten.

## 5.3 Ablauf einer Simulationsstudie

### 5.3.1 Allgemeines

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, welche Schritte bei der Durchführung einer Simulationsstudie zu durchlaufen sind. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Struktur einer Simulationsstudie.

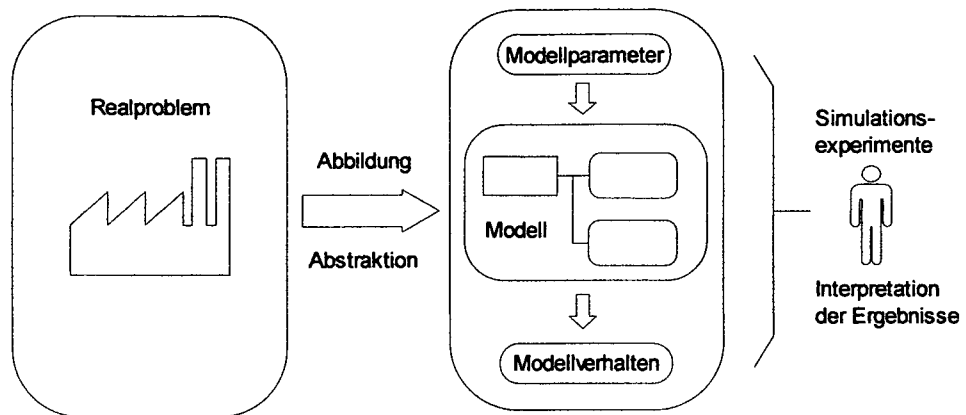


Abbildung 38: Struktur einer Simulationsstudie [10]

Im Wesentlichen sind folgende Schritte zu durchlaufen [10]:

- Problemdefinition (Zielformulierung)
- Sammlung aller problemrelevanter Daten
- Erstellen eines Modellkonzeptes (z.B. mittels Flussdiagrammen)
- Programmierung des Simulationsmodells (Erstellung des Computermodells)
- Verifikation: Überprüfung, ob sich das Computermodell wie beabsichtigt, also wie das Modellkonzept, verhält (Beseitigung syntaktischer und logischer Fehler) (siehe Abbildung 39)
- Validation: Überprüfung, ob das Computermodell eine ausreichend gute Abbildung der Realität darstellt (Vergleich mit Messergebnissen oder analytischen Lösungen) (siehe Abbildung 39)
- Versuchsplanung (Planung der Simulationsexperimente)
- Durchführung der Experimente
- Aufbereitung und Interpretation der Ergebnisse

### 5.3.2 Verifikation und Validation

Verifikation und Validation stellen zwei wichtige Punkte während der Durchführung einer Simulationsstudie dar (siehe Abbildung 39). Die Fehlersuche kann mitunter sehr viel Zeit in Anspruch nehmen, vor allem wenn komplexe Abläufe abgebildet werden müssen. Die Computeranimation kann hier unterstützend eingesetzt werden. Ihr Einsatz ermöglicht es, Vorgänge im simulierten System besser zu verstehen und diese in einfacher Art und Weise nachzuvollziehen.

Bei der Animation werden die einzelnen Prozesse visualisiert, d. h. es werden Ortsveränderungen von Objekten am Bildschirm dargestellt (z.B. Flurförderzeuge) und Onlinestatistiken ausgegeben (z.B. Warteschlangenlängen).

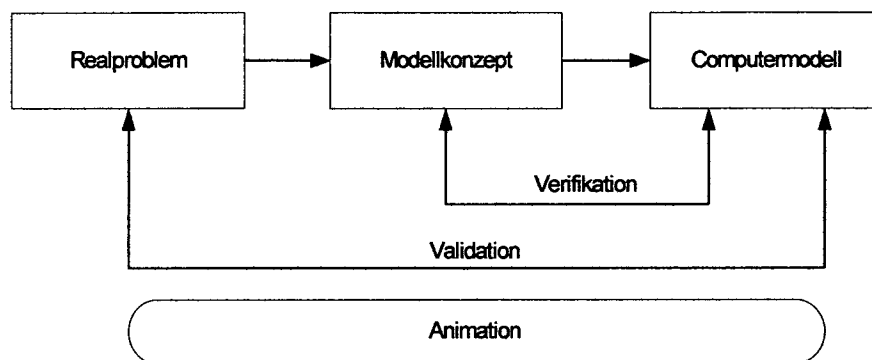


Abbildung 39: Verifikation und Validation eines Simulationsmodells

### 5.3.3 Aufbereitung und Interpretation der Ergebnisse

Für die Aufbereitung und Interpretation der Simulationsergebnisse kann die elementare Stichprobentheorie, sowie die statistische Schätztheorie herangezogen werden [22].

Die Stichprobentheorie untersucht Beziehungen, die zwischen einer Grundgesamtheit und den aus ihr gezogenen Stichproben bestehen. In einer Simulationsstudie können die verschiedenen Ergebnisse mehrerer Simulationsläufe, die sich aufgrund stochastischer Parameter im System ergeben, als Stichproben aufgefasst werden. Diese Stichprobenergebnisse können benutzt werden, um Informationen über die Grundgesamtheit der zu untersuchenden Größe zu erhalten:

Für alle  $n$  möglichen Stichproben des Umfangs  $N$ , die ohne Zurücklegen aus einer endlichen Grundgesamtheit vom Umfang  $N_p > N$  gezogen werden, können die Werte der Stichprobenfunktion, wie etwa arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung, berechnet werden, wobei diese von Stichprobe zu Stichprobe verschieden sein werden.

Arithmetische Mittelwerte der Stichproben: 
$$\overline{X}_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji}}{N} \quad j=1 \dots n$$

Standardabweichungen der Stichproben: 
$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{ji} - \overline{X}_j)^2}{N-1}} \quad j=1 \dots n$$

Auf diese Weise erhält man eine Verteilung der Stichprobenfunktion, von der man wiederum Mittelwert  $\mu_{\overline{X}}$  und Standardabweichung  $\sigma_{\overline{X}}$  berechnen kann:

Arithmetischer Mittelwert der Stichprobenfunktion: 
$$\mu_{\overline{X}} = \frac{\sum_{j=1}^n \overline{X}_j}{n}$$

Standardabweichung der Stichprobenfunktion: 
$$\sigma_{\overline{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\overline{X}_j - \mu_{\overline{X}})^2}{n}}$$

Wenn man den Mittelwert und die Standardabweichung der Stichprobenverteilung der Mittelwerte mit  $\mu_{\overline{X}}$  und  $\sigma_{\overline{X}}$  bezeichnet und die Standardabweichung der Grundgesamtheit mit  $\mu_G$  und  $\sigma_G$ , dann gilt für eine endliche Grundgesamtheit:

$$\mu_{\overline{X}} = \mu_G \quad \text{und} \quad \sigma_{\overline{X}} = \frac{\sigma_G}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{\frac{N_P - N}{N_P - 1}}$$

Ist die Grundgesamtheit unendlich, oder werden Stichproben mit Zurücklegen gezogen, so ergibt sich:

$$\mu_{\overline{X}} = \mu_G \quad \text{und} \quad \sigma_{\overline{X}} = \frac{\sigma_G}{\sqrt{N}}$$

Für große Werte von N ( $N \geq 30$ ) ist die Stichprobenverteilung der Mittelwerte angenähert eine Normalverteilung, ohne Rücksicht auf die Grundgesamtheit (zentraler Grenzwertsatz). Im Falle einer normalverteilten Grundgesamtheit ist die Stichprobenverteilung der Mittelwerte auch für kleine Werte von N ( $N < 30$ ) eine Normalverteilung.

Diese Erkenntnisse können nun in weiterer Folge dazu benutzt werden, um mit Hilfe der statistischen Schätztheorie die Parameter einer Grundgesamtheit aus den Stichprobenergebnissen abzuschätzen. Es wird zwischen Punkt- und Intervallschätzungen unterschieden. Bei Intervallschätzungen muss berücksichtigt werden, ob es sich um große oder kleine Stichproben handelt.

### **Punktschätzung**

Eine durch eine einzelne Zahl gegebene Schätzung eines Parameters der Grundgesamtheit wird Punktschätzung genannt. Der Mittelwert  $\mu_{\bar{x}}$  der Stichprobenverteilung des Mittelwertes ist gleich dem Mittelwert  $\mu_G$  der Grundgesamtheit. Daher ist das Stichprobenmittel  $\bar{X}$  eine erwartungstreue Schätzung des Mittelwertes  $\mu_G$  der Grundgesamtheit:

$$\mu_G = \bar{X}$$

### **Intervallschätzung**

Eine durch zwei Zahlen gegebene Schätzung, von denen angenommen wird, dass der Parameter der Grundgesamtheit zwischen ihnen liegt, wird als Intervallschätzung bezeichnet. Da diese die Genauigkeit einer Schätzung angeben, sind diese den Punktschätzungen vorzuziehen. Das ist auch der Grund, warum Simulationsergebnisse in Form von Konfidenzintervallen angegeben werden sollten.

### **Theorie der großen Stichproben**

Ist die Stichprobenverteilung angenähert normal ( $N \geq 30$ ), dann kann man erwarten, dass der Mittelwert der Grundgesamtheit mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (Konfidenzniveau) innerhalb folgender Grenzen liegt:

$$\bar{X} - z_k \cdot \frac{s}{\sqrt{N}} < \mu_G < \bar{X} + z_k \cdot \frac{s}{\sqrt{N}}$$

Dabei wird  $z_k$  als Sicherheitskoeffizient oder kritischer Wert bezeichnet. Dieser kann für ein bestimmtes Konfidenzniveau aus Tabellen für die Normalverteilung entnommen werden.

Konfidenzniveau	95%	99%
$z_k$	1,96	2,58

Tabelle 4: Beispiele kritischer Werte für die Normalverteilung [22]

### Theorie der kleinen Stichproben

Bei Stichproben vom Umfang  $N < 30$  ist die Annäherung der Stichprobenverteilung an die Normalverteilung nicht mehr sehr gut und wird mit kleiner werdendem  $N$  schlechter. Deshalb müssen angemessene Modifizierungen vorgenommen werden. Und zwar wird hier auf die t-Verteilung (Studentverteilung) zurückgegriffen, wobei man das Konfidenzintervall, abhängig vom Konfidenzniveau und vom Stichprobenumfang, wie folgt berechnen kann:

$$\bar{X} - t_k \cdot \frac{s}{\sqrt{N-1}} < \mu_G < \bar{X} + t_k \cdot \frac{s}{\sqrt{N-1}}$$

Dabei wird  $t_k$  ebenfalls als kritischer Wert bezeichnet. Wobei dieser für ein bestimmtes Konfidenzniveau und einen bestimmten Freiheitsgrad  $\nu = N-1$  aus Tabellen für die t-Verteilung entnommen werden kann.

Konfidenzniveau	95%	99%
$t_{k,N=5}$	2,78	4,6
$t_{k,N=10}$	2,26	3,25

Tabelle 5: Beispiele kritischer Werte für die t-Verteilung [22]

In Abbildung 40 sind t-Verteilungen mit unterschiedlichen Freiheitsgraden  $\nu$  dargestellt. Für große Werte von  $\nu$  oder  $N$  (sicher für  $N \geq 30$ ) nähern sich die Kurven sehr genau der Kurve der standardisierten Normalverteilung an.

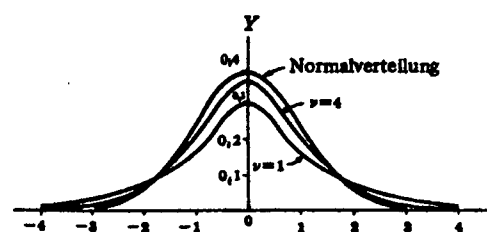


Abbildung 40: t-Verteilungen [22]

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Simulationen wurde  $N=5$  gewählt (d. h. 5 Simulationsläufe je Experiment). Die Ergebnisse werden entsprechend der Theorie der kleinen Stichproben aufbereitet, und es werden jeweils Konfidenzintervalle mit einem Konfidenzniveau von 95 % nach der t-Verteilung berechnet.

## 5.4 Simulationswerkzeuge

Die Werkzeuge zur Simulation zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine softwaretechnische Nachbildung eines Systems in einem Modell erlauben. Zum Einsatz kommen einfache Programmiersprachen, Simulationssprachen (Programmiersprachen mit simulationspezifischen Funktionen) und die als Simulatoren (Programmpakete für bestimmte Anwendungsgebiete) bezeichneten Simulationspakete [4].

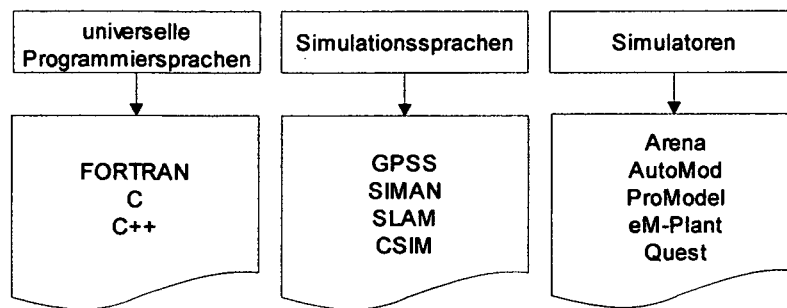


Abbildung 41: Klassifikation von Simulationswerkzeugen

Die folgende Abbildung soll die geschichtliche Entwicklung der Simulationssoftware veranschaulichen.

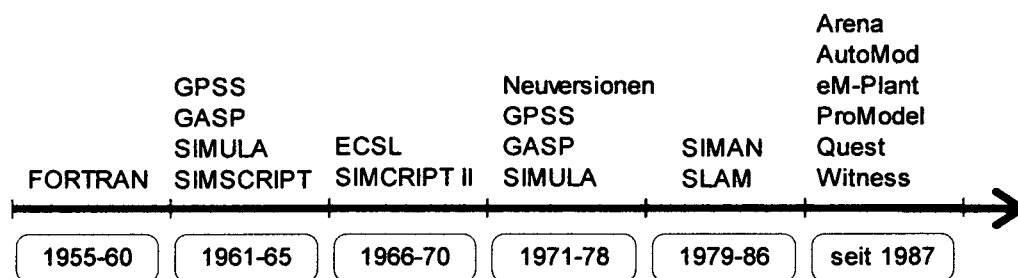


Abbildung 42: Geschichtliche Entwicklung der Simulationssoftware [8]

Als in den 50er Jahren die ersten Computer auf den Markt kamen, wurden bereits die ersten Simulationsmodelle erstellt. Diese wurden in FORTRAN programmiert. Es stellte sich aber bald heraus, dass die Programmierung mit allgemeinen Programmiersprachen sehr zeitaufwändig war. Deshalb gab es die Bestrebung, eigene Simulationssprachen zu entwickeln. Die erste Simulationssprache GPSS (General Purpose Simulation System), entwickelt von Geoffrey Gordon (IBM), kam 1961 auf den Markt. Ihre ersten Anwendungsgebiete waren Simulationen von Kommunikations- und Computersystemen. Im Laufe der Zeit folgten weitere Simulationssprachen wie GASP, SIMSCRIPT und SIMAN. Hauptaugenmerk bei der weiteren Entwicklungstätigkeit von Simulationssprachen galt der Anwendungsfreundlichkeit. So entstanden schließlich die heute am meisten eingesetzten Simulatoren (z.B. Arena, AutoMod, eM-Plant). Diese ermöglichen das Erstellen von Simulationsmodellen ohne Kenntnis einer Programmier- oder Simulationssprache.



In Abbildung 43 ist eine Einordnung der verschiedenen Simulationswerkzeuge hinsichtlich Flexibilität, bzw. Allgemeingültigkeit und zeitlichem Aufwand für die Modellerstellung dargestellt.

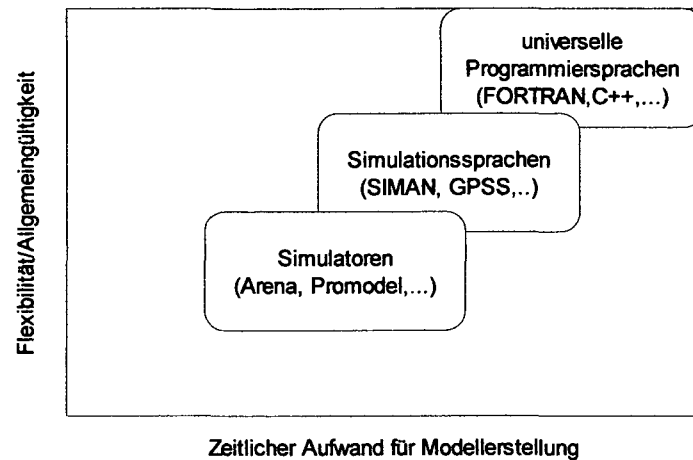


Abbildung 43: Einordnung der Simulationswerkzeuge

Heute gibt es auf dem Weltmarkt bereits Hunderte von Simulationswerkzeugen für die verschiedensten Anwendungsgebiete.

Je nach Anwendungsfeld, Aufgabenstellung und Anwendergruppe kann das Ergebnis der Auswahl eines Simulationswerkzeuges unterschiedlich ausfallen. Als wesentliche Auswahlkriterien können Aspekte der Systementwicklung (Systemetablierung), des Produkteinsatzes, der Softwarefunktionalität, sowie Service- und Marketingaspekte angeführt werden [4]. In der nachfolgenden Abbildung werden die einzelnen Auswahlkriterien näher erläutert.

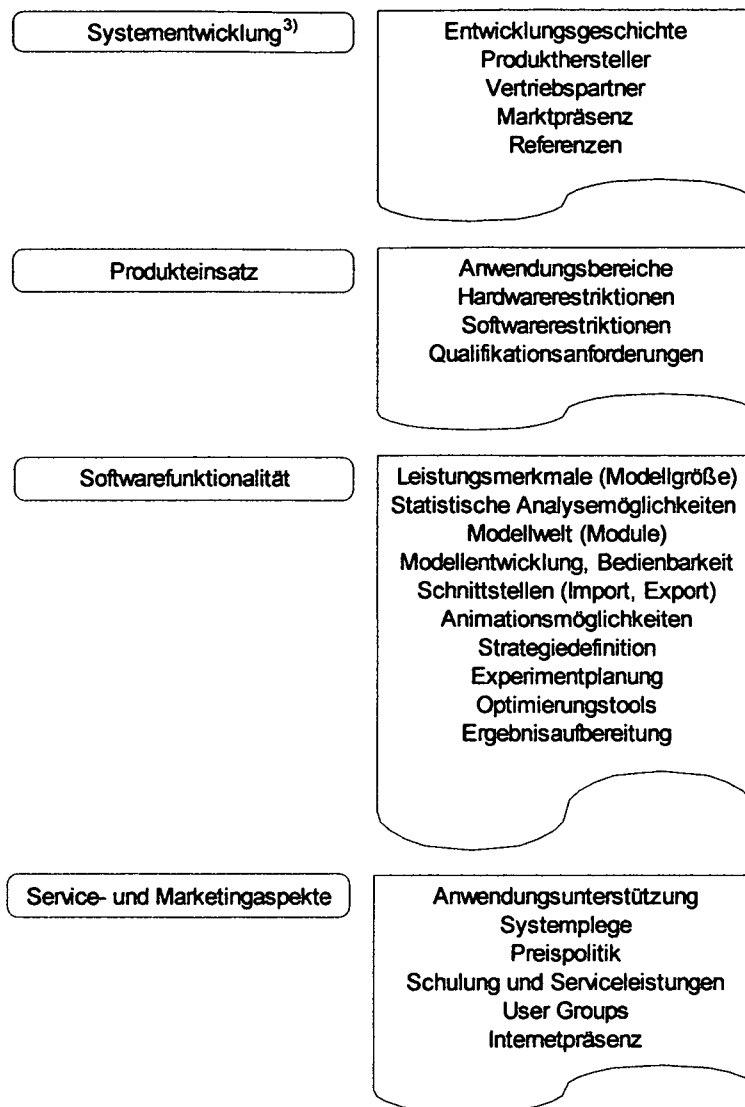


Abbildung 44: Auswahlkriterien für Simulationswerkzeuge [4]

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsstudien stand das Simulationssystem Arena 7.01 Professional Edition zur Verfügung, welches im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

<sup>3)</sup> ... Systemetablierung

## 6 Simulationssystem Arena

### 6.1 Entwicklungsumgebung

Arena ist ein graphisches, objektorientiertes Simulationssystem mit hierarchischer Softwarestruktur und basiert auf der Simulationssprache SIMAN (Abbildung 45).

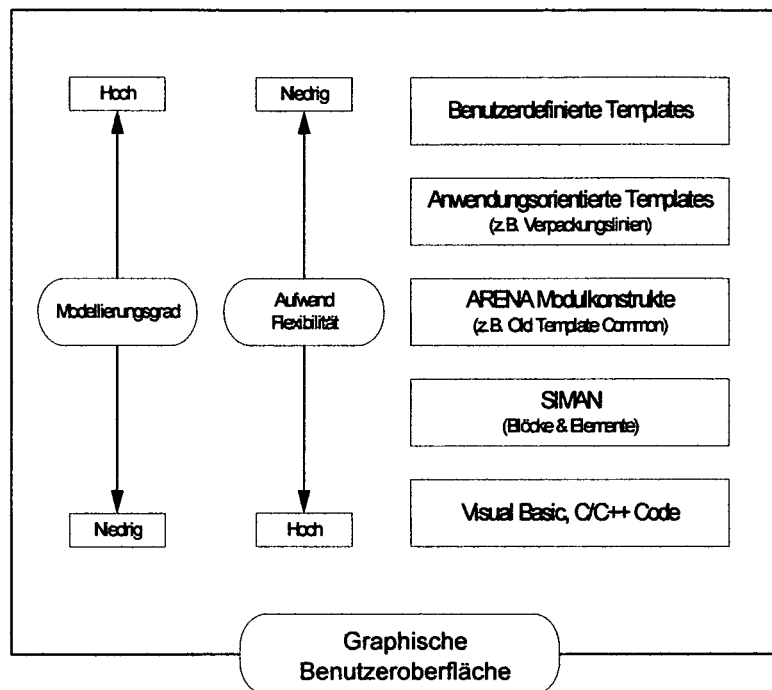


Abbildung 45: Hierarchische Struktur [7]

In Arena werden Simulationsmodelle erstellt, indem Module verschiedener Bibliotheken (Templates) auf dem Modellfenster platziert und die entsprechenden Daten eingegeben werden. Ein Template besteht aus einem Bedienfeld (Panel) oder einem Satz von Bedienfeldern. Diese enthalten wiederum Modellierungskonstrukte für spezifische Anwendungen. Alle Modellierungskonstrukte können miteinander kombiniert werden, d.h. es können z.B. ARENA-Modulkonstrukte mit SIMAN-Modellen verknüpft werden [11].

Arena stellt eine Reihe von Templates zur Verfügung (z.B. Old Template: Common, Support und Transfer), es können aber auch benutzerdefinierte Templates erstellt werden, d. h. der Benutzer hat die Möglichkeit, sich seine eigenen Bibliotheken mit selbst erstellten Modulen zusammenzustellen (siehe Kapitel 6.3).

In der nächsten Abbildung ist die Benutzeroberfläche von Arena dargestellt. Anhand des SERVER-Moduls aus dem Common-Panel (Old Template), soll die Vorgangsweise bei der Modellerstellung verdeutlicht werden.

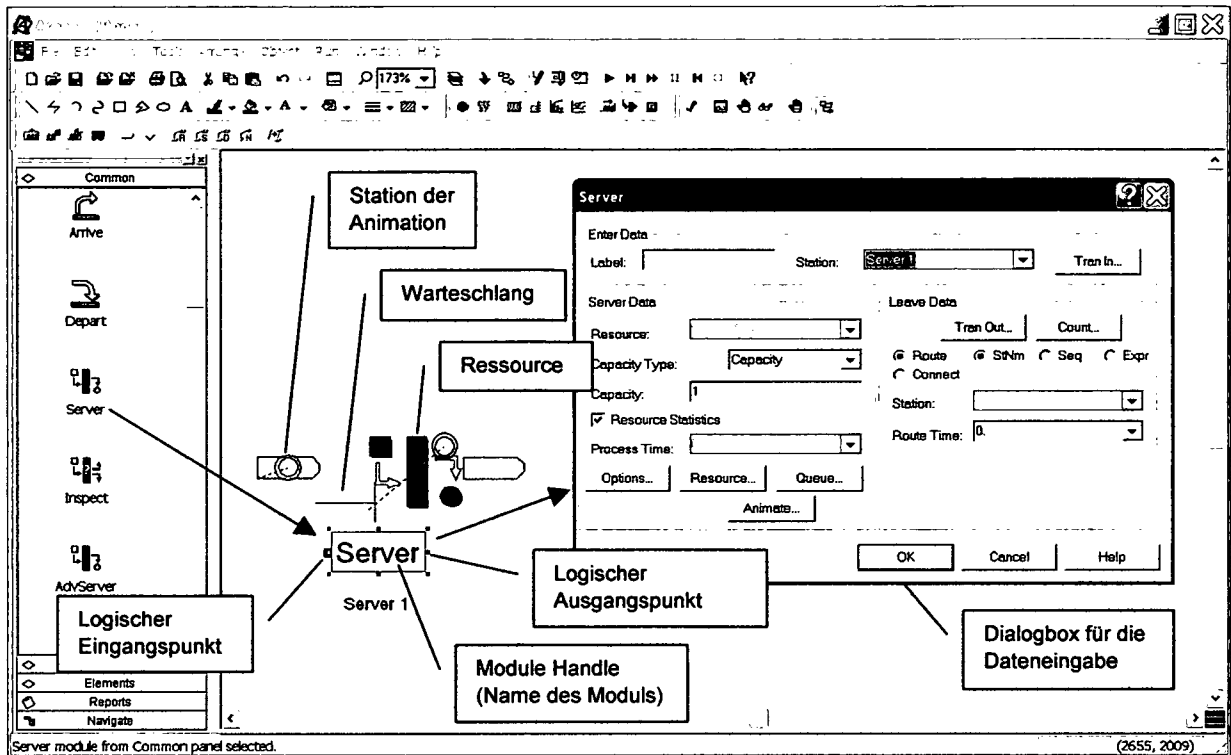


Abbildung 46: Benutzeroberfläche – SERVER-Modul

Man wählt den gewünschten Modul aus den Bedienfeldern (Panels) aus und platziert ihn auf dem Modellfenster. Im oben angeführten Beispiel ist dies der SERVER-Modul aus dem Common-Panel. Bei diesem Modul handelt es sich um einen einfachen Serverprozess, d.h. eine Ressource wird belegt, dann folgt ein Bedienprozess mit einer bestimmten Dauer und schließlich wird die Ressource wieder freigegeben. Nach Anklicken des „Module Handle“ öffnet sich eine Dialogbox, in der alle für den Modul relevanten Daten eingegeben werden können. Die Verknüpfung zu anderen Modulen kann entweder über die logischen Ein- und Ausgangspunkte der Module oder über sog. Labels (Adressen) erfolgen.

Oberhalb des „Module Handle“ sind die für den entsprechenden Modul vorgesehenen Animationselemente angeordnet. In diesem Fall sind dies Ein- und Ausgangsstation für die Verbindung zu anderen Animationselementen, eine Warteschlange und eine Ressource.

Alle Elemente in der obigen Abbildung können durch Anklicken in ihrer Position und Größe verändert, bzw. gelöscht werden.

Ähnlich wie diese ARENA-Templates können auch ARENA-Modulkonstrukte und SIMAN-Blöcke, bzw. –Elemente aus den entsprechenden Panels ausgewählt und auf dem Modellfenster angeordnet werden.

## 6.2 Simulationssprache SIMAN

Da im Rahmen dieser Arbeit Module mit Hilfe der Simulationssprache SIMAN entwickelt wurden, soll diese im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt werden.

SIMAN (SIMulation ANalysis) wurde von Dennis Pegden (University of Alabama) entwickelt. Viele der grundlegenden Ideen, die in SIMAN verwirklicht wurden, können auf die Arbeiten von Geoffroy Gordon, dem Entwickler der ersten Simulationssprache GPSS, zurückgeführt werden [6].

SIMAN unterscheidet zwischen der Modelldefinition und der Definition des experimentellen Rahmens eines Simulationsmodells (siehe Abbildung 47). In der Modelldefinition (System-Modell) wird die Ablaufstruktur des zu simulierenden Systems abgebildet. Hier wird also die Systemlogik festgelegt (z.B. wann wird eine bestimmte Maschine belegt und wieder frei gegeben). Der experimentelle Rahmen dagegen erfasst jene Angaben, die sich im Laufe der Variationen der Versuchsbedingungen ändern können, z.B. Geschwindigkeiten von Transportfahrzeugen [10].

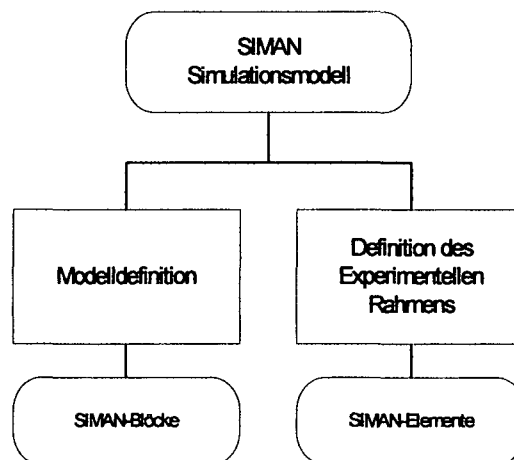


Abbildung 47: Struktur eines SIMAN-Simulationsmodells [10]

Die kleinsten Sprach- bzw. Darstellungseinheiten einer SIMAN-Modelldefinition sind sog. Blöcke. Diese legen die im Rahmen der Simulation durchzuführenden Aktionen fest und beeinflussen damit den Systemzustand und den Fluss der Transaktionen durch das Netzwerk. Der experimentelle Rahmen besteht aus sog. Elementen. Jede dieser Anweisungen hat einen oder mehrere Operanden mit spezifischem Bedeutungsinhalt [10].

Folgende SIMAN-Blöcke stehen unter anderem für die Festlegung der Modellstruktur zur Verfügung (Auszug aus den SIMAN-Blöcken [10]):

<b>OPERATION-Blöcke</b>	
<b>Blockname</b>	<b>Beschreibung</b>
CREATE	Erzeugen von Transaktionen (Quelle)
DISPOSE	Vernichten von Transaktionen (Senke)
DUPLICATE	Duplizieren einer Transaktion
DELAY	Zeitverzögerung
ASSIGN	Wertzuweisung zu Attributen oder Variablen
ALTER	Verändern der Kapazität einer Ressource
RELEASE	Freigabe einer Ressource
STOP	Anhalten eines Conveyor-Fördermittels
START	Aktivieren eines Conveyor-Fördermittels
EXIT	Verlassen eines Conveyor-Fördermittels
HALT	Anhalten eines Transporter-Transportmittels
ACTIVATE	Aktivieren eines Transporter-Transportmittels
FREE	Freigabe eines Transporter-Transportmittels
INSERT	Einfügen einer Transaktion in eine Warteschlange
COUNT	Zählen von Ereignissen
TALLY	Erfassen der Ausprägung einer Variable

Tabelle 6: Operation-Blöcke

<b>TRANSFER-Blöcke</b>	
<b>Blockname</b>	<b>Beschreibung</b>
ROUTE	Transfer zwischen Stationen (Transportdauer)
TRANSPORT <sup>4)</sup>	Transfer mit Transporter-Transportmittel (Weg, Geschwindigkeit)
CONVEY <sup>5)</sup>	Transfer mit Conveyor-Fördermittel (Weg, Geschwindigkeit)

Tabelle 7: Transfer-Blöcke

<b>HOLD-Blöcke</b>	
<b>Blockname</b>	<b>Beschreibung</b>
SEIZE	Belegen einer Bedienungseinrichtung
ACCESS	Belegen eines Conveyor-Fördermittels
REQUEST	Zuordnen eines Transporter-Fahrzeuges
COMBINE	Permanentes Gruppieren von Transaktionen
GROUP	Temporäres Gruppieren von Transaktionen
SCAN	Verzögerung, bis eine bestimmte Bedingung erfüllt ist

Tabelle 8: Hold-Block

<b>QUEUE-Block</b>	
<b>Blockname</b>	<b>Beschreibung</b>
QUEUE	Warteschlange vor einem HOLD-Block

Tabelle 9: Queue-Block

<b>BRANCH-Block</b>	
<b>Blockname</b>	<b>Beschreibung</b>
BRANCH	Steuerung des Transaktionsflusses mittels Verzweigungen

Tabelle 10: Branch-Block

<sup>4)</sup> ... mit Überholmöglichkeit

<sup>5)</sup> ...ohne Überholmöglichkeit

Für die Festlegung des experimentellen Rahmens eines SIMAN-Modells können beispielsweise die folgenden Elemente verwendet werden (Auszug aus den SIMAN-Elementen [10]):

Elementname	Beschreibung
REPLICATE	Festlegung von Anzahl und Länge der Simulationläufe
VARIABLES	Festlegung von benutzerspezifischen Variablen
ATTRIBUTES	Festlegung von Transaktionsattributen
QUEUES	Festlegung von Warteschlangen
TALLIES	Festlegung genereller statistischer Variablen
COUNTERS	Festlegung von Zählvariablen
RESOURCES	Festlegung von Bedienungseinrichtungen
CONVEYORS	Festlegung von getakteten Fördermitteln
SEGMENTS	Festlegung von Förderwegen
DISTANCES	Festlegung von Entfernungstabellen
TRANSPORTERS	Festlegung von nicht getakteten Fördermitteln
PICTURES	Festlegung des animierten Bildes einer Transaktion

Tabelle 11: SIMAN-Elemente

Neben diesen Blöcken und Elementen bietet SIMAN systemweite Variablen an, die unabhängig von einer bestimmten Transaktion existieren und von jeder Transaktion gelesen und zum Teil auch verändert werden können. Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten SIMAN-Variablen zusammen (Auszug aus den SIMAN-Variablen [10]):

Variable	Beschreibung
TNOW	aktuelle Simulationszeit
NC(N)	Stand der Zählvariable N
TAVG(N)	aktueller Mittelwert der TALLY-Variable N <sup>6)</sup>
NR(N)	Anzahl belegter Einheiten der Bedienungseinrichtung N
MR(N)	Kapazität der Bedienungseinrichtung N
STATE(N)	Status der Bedienungseinrichtung N (frei, belegt,...)
ICS(N)	Status eines Conveyor-Fördermittels (frei, belegt,...)
MLC(N)	Länge eines Conveyor-Fördermittels
VC(N)	Geschwindigkeit eines Conveyor-Fördermittels
NQ(N)	Anzahl Transaktionen in der Warteschlange N
VAR(N)	Wert der benutzerspezifischen, globalen Variable N

Tabelle 12: SIMAN-Variablen

<sup>6)</sup> ... generelle statistische Variable (es können statistische Kenngrößen ausgegeben werden)

In der folgenden Abbildung ist ein einfaches Beispiel eines SIMAN-Simulationsmodells angeführt. Es wurde ein Bedienelement mit Warteschlange (M|M|1-Warteschlangenmodell) modelliert, wobei auch Störungen dieses Bedienelementes mit berücksichtigt wurden (im wesentlichen entspricht die hier angeführte Modellstruktur jener des SERVER-Moduls aus Abbildung 46).

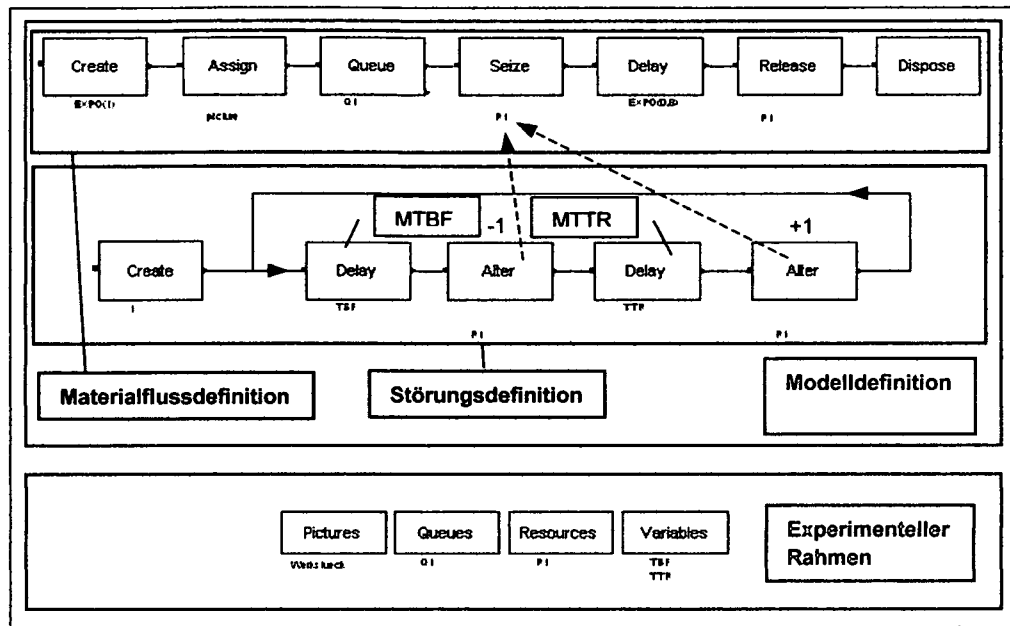


Abbildung 48: Beispiel eines einfachen SIMAN-Modells

Die Fördereinheiten werden im Create-Block der Materialflussdefinition erzeugt (Zwischenankunftszeiten entstammen einer Exponentialverteilung). Ist die Ressource (z.B. Bearbeitungsmaschine) frei, wird diese belegt (Seize-Block). Wenn nicht, wartet das Entity in der Warteschlange (Queue-Block), bis die Bedienstation frei geworden ist. Die Bearbeitungsdauer wird im Delay-Block definiert (ebenfalls Exponentialverteilung). Nach dem Bearbeitungsvorgang wird die Ressource wieder frei gegeben (Release-Block) und ein neues Entity kann bearbeitet werden. Die Transaktion wird schließlich im Dispose-Block wieder vernichtet.

Störungen werden von einem speziellen "Störungsentity" hervorgerufen. Zu Beginn der Simulation wird dieses im Create-Block der Störungsdefinition erzeugt. Nach der Zeitdauer MTBF (hier kann anstelle eines konstanten Wertes auch jede beliebige Verteilungsfunktion eingegeben werden) wird die Kapazität der Ressource um 1 reduziert (Alter-Block). Da keine Kapazität mehr vorhanden ist, kann auch keine Bearbeitung stattfinden. Nach erfolgter Reparatur (Zeitdauer MTTR) wird die Kapazität wieder um 1 erhöht und die Ressource beginnt wieder zu arbeiten. Schließlich wird das "Störungsentity" wieder rückgeführt und der Ablauf wiederholt sich.



## 6.3 Benutzerdefinierte Module

Wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben wurde, können mit Arena Professional Edition benutzerdefinierte Module erstellt werden. Hierfür stehen in Arena fünf Entwicklungsfenster zur Verfügung:

- Operand Window
- Logic Window
- Switch Window
- User View Window
- Panel Icon Window

Diese können ausgehend von einem sog. Template Window, in dem die Namen der einzelnen Module eingetragen sind, bearbeitet werden (siehe Abbildung 49).

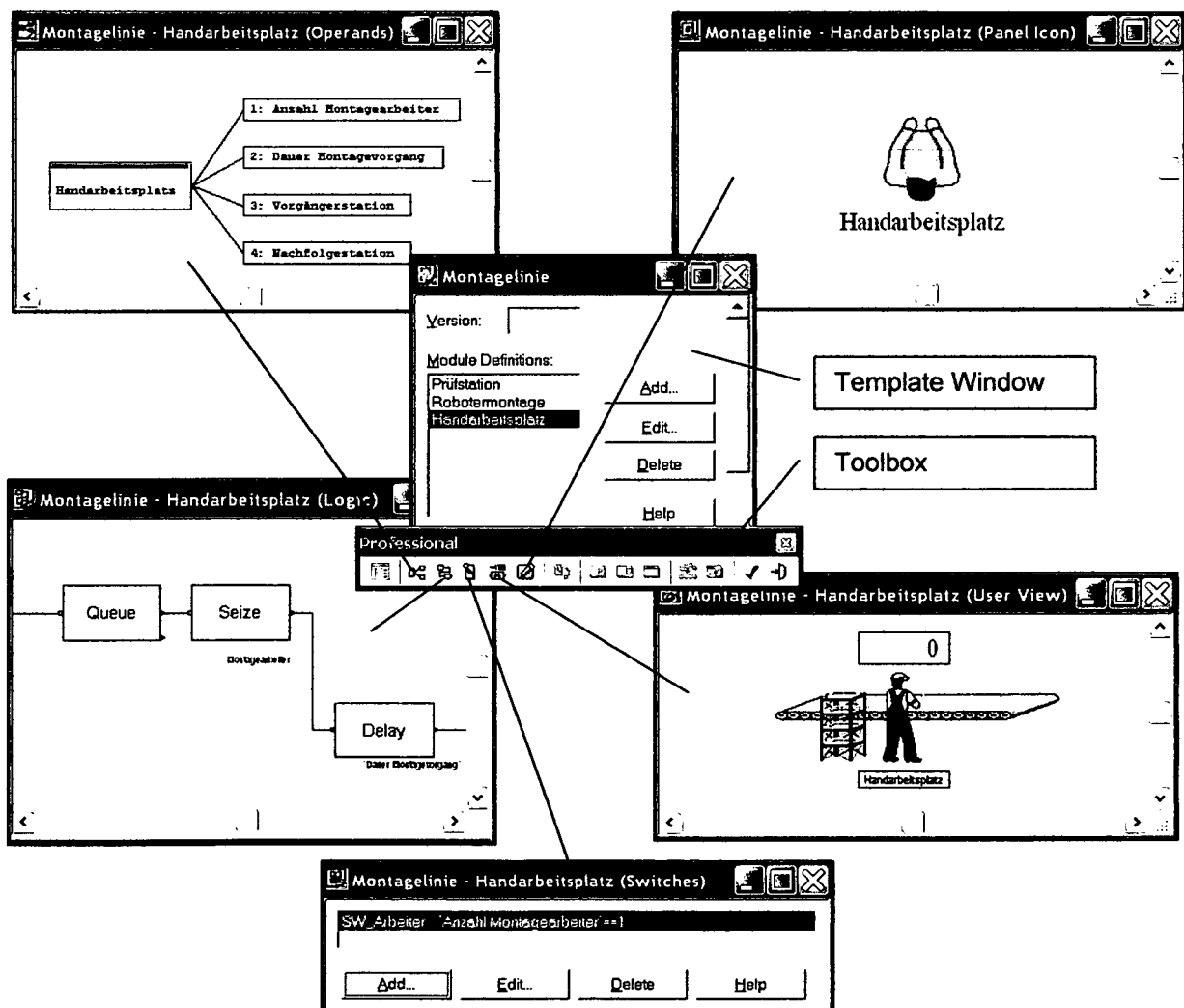


Abbildung 49: Moduldefinition – Entwicklungsfenster

- Operand Window:** In diesem Fenster werden die Eingabeparameter für den Modul definiert und das Erscheinungsbild der Dialogboxen festgelegt (Dialoghierarchie und Dialoge werden definiert).
- Logic Window:** In diesem Fenster wird die Modelllogik, unter Einbindung der Operanden aus dem Operand Window, definiert. Dabei sollte die Programmierung auf SIMAN-Ebene erfolgen, um nur jene Funktionen im Computermode zu integrieren, die unbedingt notwendig sind. Dadurch nimmt die Validationsphase weniger Zeit in Anspruch und die Simulationslaufzeiten verkürzen sich.
- Switch Window:** In diesem Fenster werden Bedingungen definiert, um die Dialoge im Operand Window, die Logik im Logic Window und die Animationselemente im User View Window verändern zu können.
- User View Window:** In diesem Fenster wird die Animation für den Modul definiert. Es werden jene Animationselemente angegeben, die auch am Modellfenster sichtbar sein sollen.
- Panel Icon Window:** In diesem Fenster wird das Erscheinungsbild des Moduls im Bedienfeld (Panel) definiert.

Die Moduldefinitionen werden in einer Datei mit der Erweiterung .tpl (template panel library file) abgespeichert. Um eine Einbindung der Module in einem Simulationsmodell zu ermöglichen, muss eine Datei mit der Erweiterung .tpo (template panel object file) erzeugt werden. Diese Datei kann dann in die Modulbibliothek von Arena geladen werden. Die Module können dann so verwendet werden, wie alle anderen Arena-Modulkonstrukte auch.

Anhand eines einfachen Beispiels soll die Vorgangsweise bei der Erstellung eines Moduls verdeutlicht werden. Da die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Module sehr komplex und umfangreich sind und deshalb eine übersichtliche Darstellung der verschiedenen Entwicklungsfenster nicht möglich ist, wird als Beispiel die Moduldefinition einer Palettierereinrichtung angeführt.

Dabei soll der Modul Palettierereinrichtung folgende Funktionen erfüllt:

- Transaktionen erzeugen
- Transport mit einem Bandförderer durchführen
- Handhabungsvorgang (Palettierung) mit einem Industrieroboter durchführen
- Transport mit einem Flurförderzeug durchführen (Palette abtransportieren)

Abbildung 50 zeigt das Modellkonzept der Palettierereinrichtung.

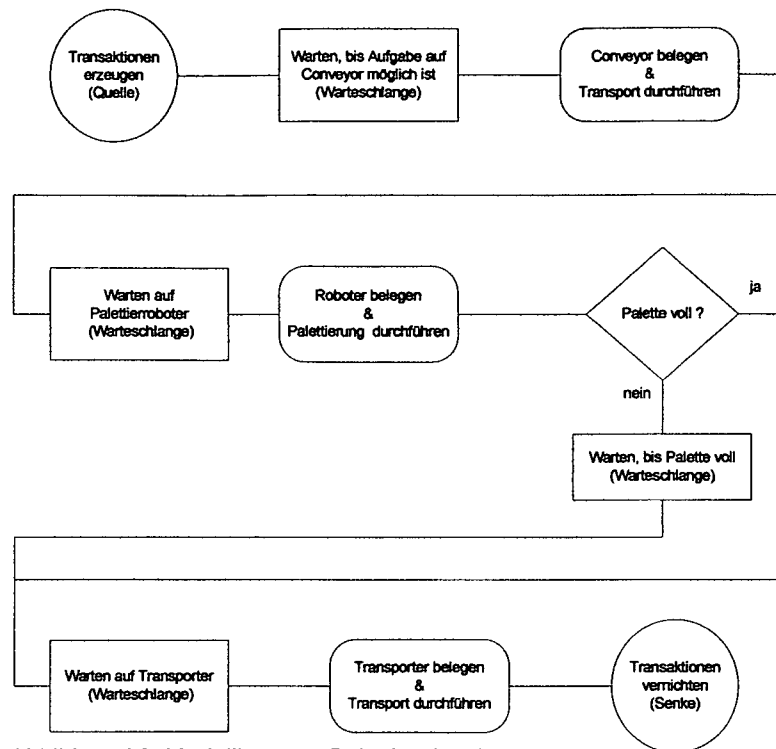


Abbildung 50: Modellkonzept Palettierereinrichtung

In Tabelle 13 sind alle erforderlichen Eingabeparameter angeführt. In den nachfolgenden Abbildungen sind die einzelnen Entwicklungsfenster für den Modul dargestellt.

Eingabeparameter	Beschreibung
Zwischenankunftszeit	Zeitintervall zwischen ankommenden Paletten
Geschwindigkeit Conveyor	Geschwindigkeit des Conveyor-Fördermittels
Länge Conveyor	Länge des Conveyor-Fördermittels
Anzahl Zellen	Anzahl der Zellen, aus denen sich das Conveyor-Fördermittel zusammensetzt
Zellen je Transaktion	Anzahl der Zellen, die eine Transaktion auf dem Conveyor belegt
Dauer Handhabungsvorgang	Zeitdauer des Handhabungsvorganges (Palettierung)
Transaktionen je Palette	Maximale Anzahl von Transaktionen auf einer Palette
Geschwindigkeit Transporter	Geschwindigkeit des Transporter-Fördermittels
Wegstrecke Transporter	Wegstrecke, die der Transporter zurücklegen muss

Tabelle 13: Eingabeparameter Palettierereinrichtung

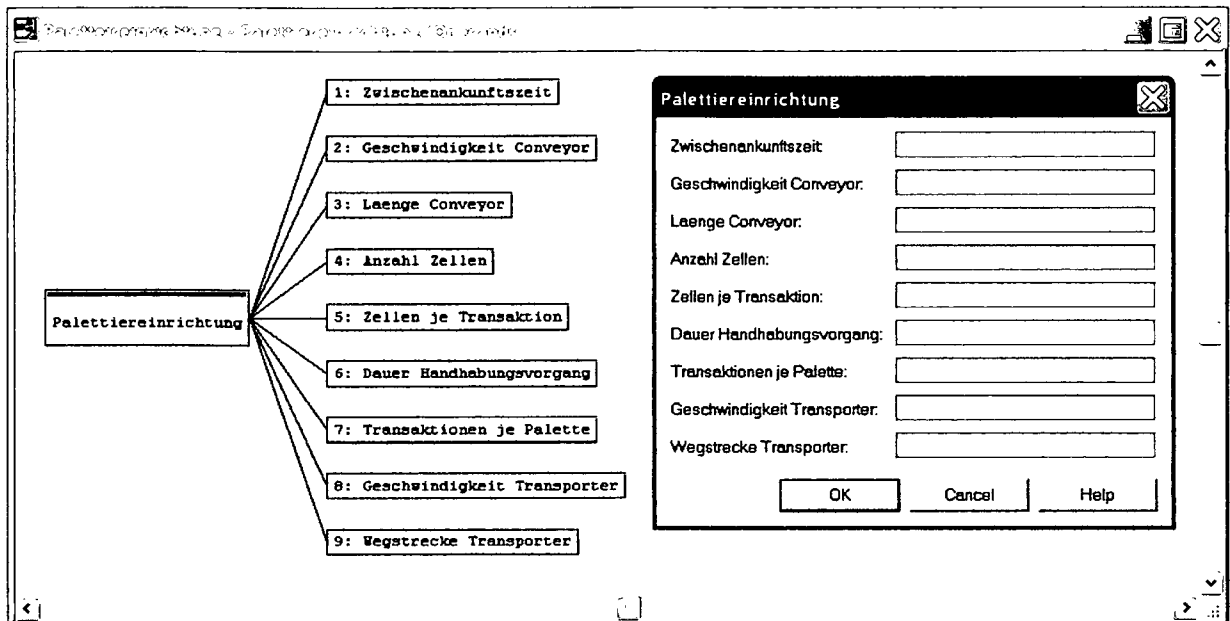


Abbildung 51: Operand Window Paletteneinrichtung

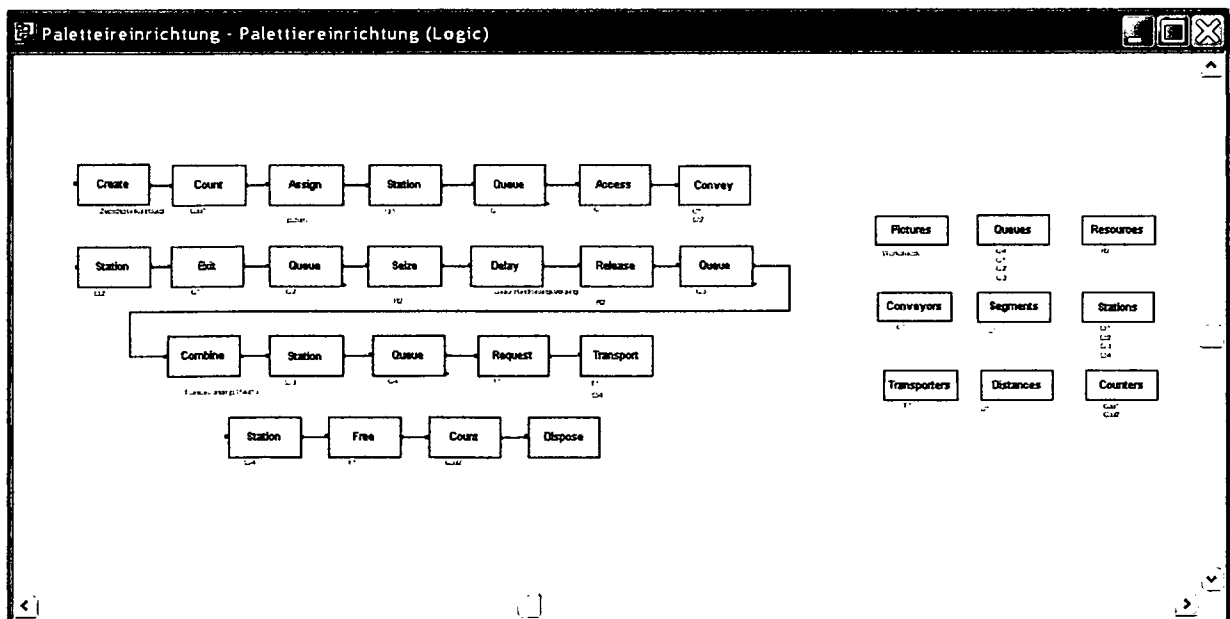


Abbildung 52: Logic Window Paletteneinrichtung

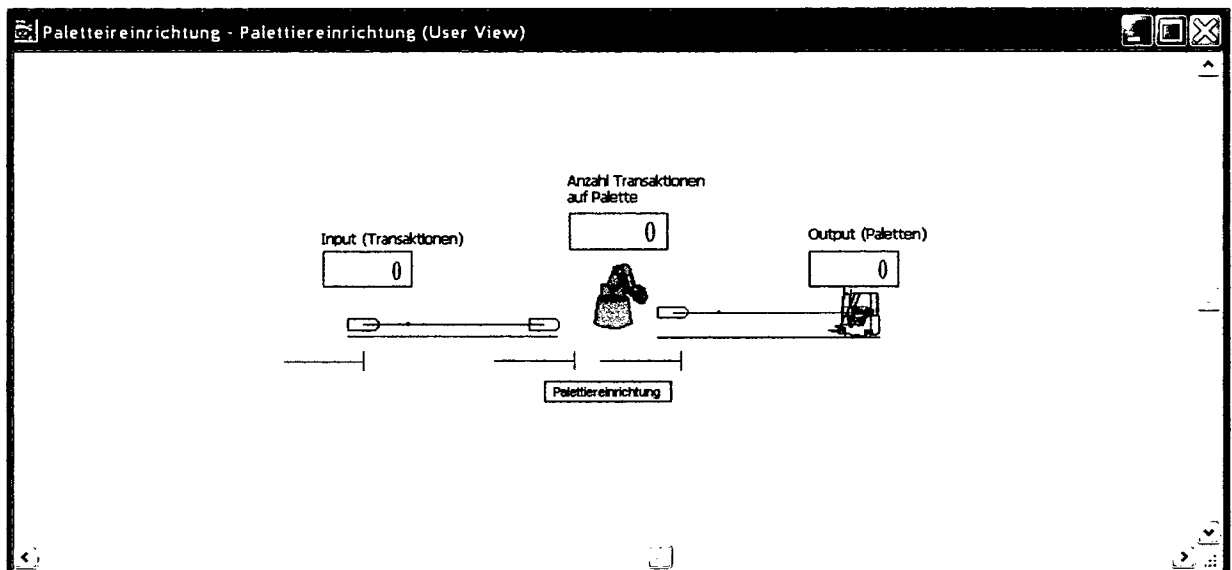


Abbildung 53: User View Window Palettiereinrichtung

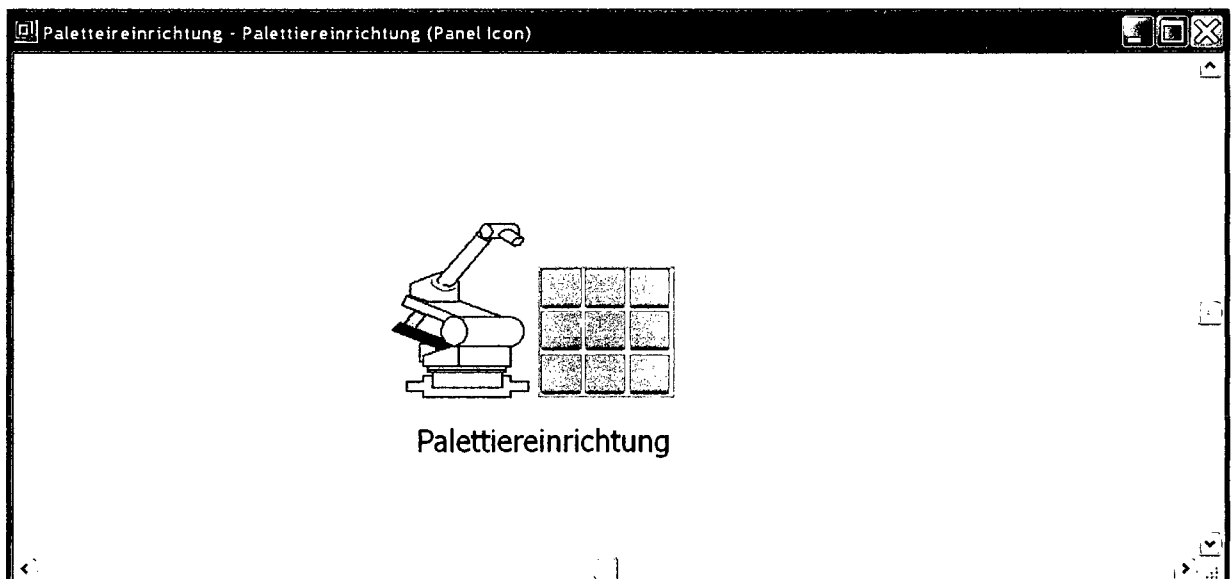


Abbildung 54: Panel Icon Window Palettiereinrichtung

Die nachfolgende Abbildung soll zeigen, wie der erstellte Modul im Modellfenster verwendet werden kann:

Der Modul wird aus dem entsprechenden Templatefenster, das zuvor geladen werden muss, ausgewählt und in das Modellfenster gezogen. Danach können die Parameterwerte im Dialogfenster eingegeben werden. Nach Eingabe der Dauer und der Anzahl der Wiederholungen der Simulationsläufe kann die Simulation gestartet und das Systemverhalten in der Animation beobachtet werden.

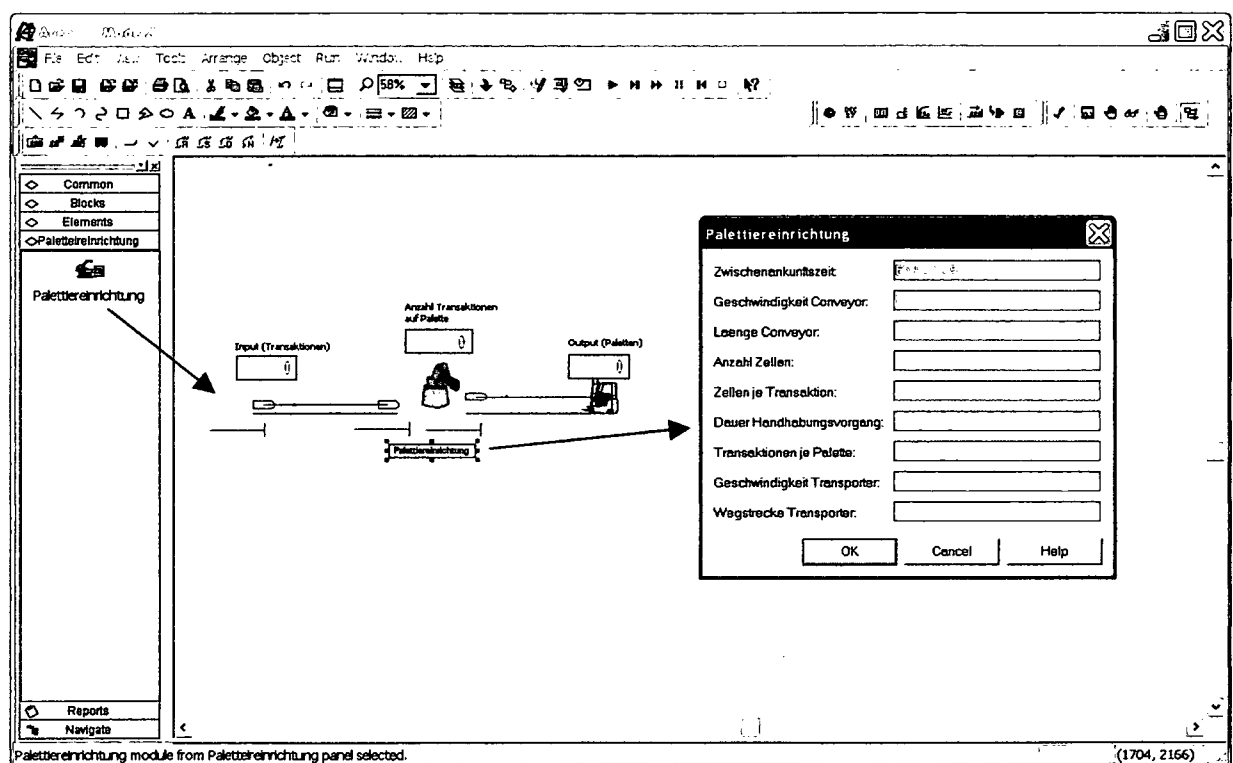
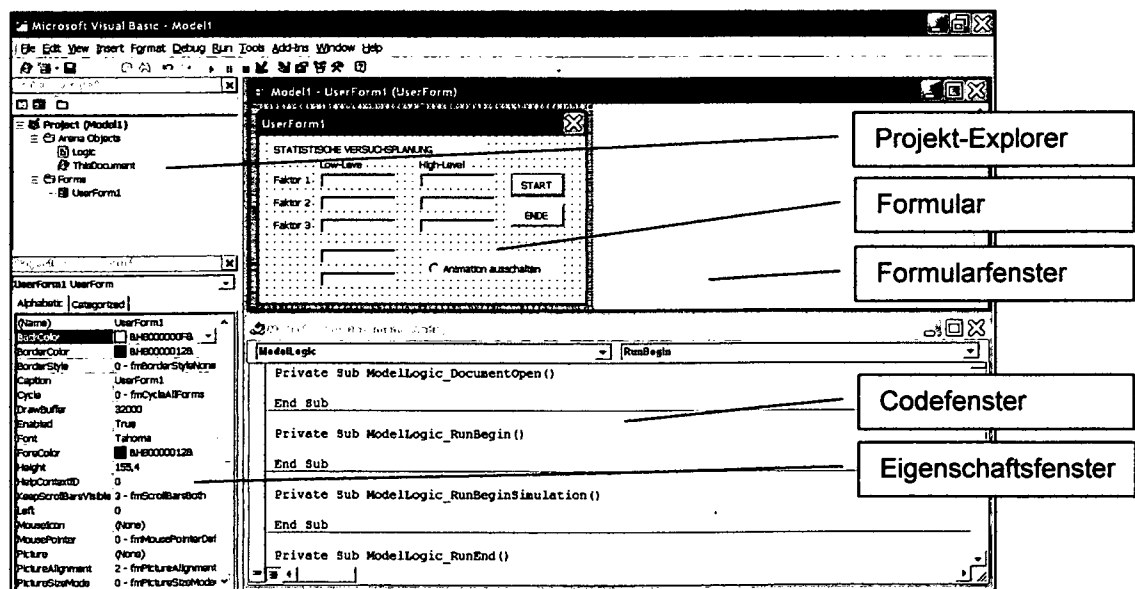


Abbildung 55: Modul Paletteneinrichtung



**Projekt-Explorer** ... hier werden alle eingebundenen Objekte in einer Baumstruktur dargestellt (z.B. Arena - ThisDocument, Excel, Formulare, Makros).

**Formularfenster** ... hier werden Formulare (Eingabemasken) definiert, die während eines Simulationslaufes aufgerufen werden können. Diese ermöglichen das Ändern verschiedener Parameterwerte. Die einzelnen Modelle und Simulationsläufe können somit sehr flexibel gestaltet werden.

**Codefenster** ... hier wird der eigentliche Sourcecode mit Hilfe eines intelligenten Texteditors eingegeben. Es werden jene Aktionen (z.B. Aufrufen eines Formulars, Daten importieren/exportieren) definiert, die beim Eintreten eines bestimmten Ereignisses ausgeführt werden sollen.

**Eigenschaftsfenster** ... hier werden die Eigenschaften der Objekte aus dem Projekt-Explorer in Tabellenform aufgelistet (z.B. Name, Schriftgröße).

Um die Simulationsläufe automatisiert ablaufen zu lassen, müssen verschiedene Ereignisse definiert werden. Tritt ein bestimmtes Ereignis ein, werden die zuvor definierten Funktionen, Unterprozeduren oder Makros aufgerufen. In VBA stehen bereits vordefinierte Ereignisprozeduren zur Verfügung (siehe nächste Seite).

In der nachfolgenden Abbildung sind alle Ereignisse, die während eines Simulationslaufes eintreten können, dargestellt. Weiters wird angegeben wann welche Daten verfügbar sind, um sie mit VBA bearbeiten zu können.

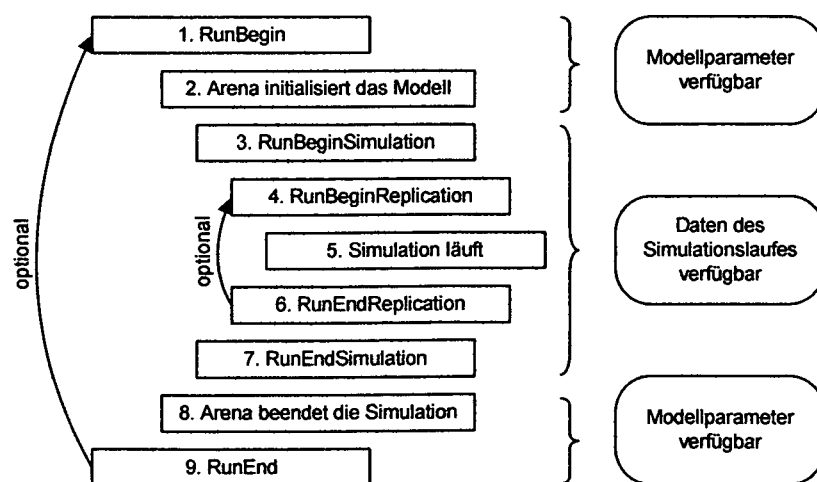


Abbildung 57: VBA-Ereignisse während eines Simulationslaufes [7]



Die abschließende Auflistung beinhaltet die wichtigsten Aktionen (z. B. Formulare aufrufen, Variablen deklarieren, Ergebnisse speichern oder exportieren), die beim Eintreten der verschiedenen Ereignisse ausgeführt werden können [7]:

**1. Ereignisprozedur ModelLogic\_RunBegin** ... wird ausgeführt, wenn die Simulation gestartet wird. Es können z. B. globale Variablen deklariert und Eingabemasken aufgerufen werden.

**2. Arena überprüft das Modell auf Fehler und führt eine Initialisierung durch**

**3. Ereignisprozedur ModelLogic\_RunBeginSimulation** ... wird ausgeführt, nachdem das Modell initialisiert wurde. Es erfolgt der eigentliche Start des Simulationslaufes. Hier können ebenfalls Variable deklariert werden.

**4. Ereignisprozedur ModelLogic\_RunBeginReplication** ... wird vor jeder Replication ausgeführt (z. B. Rücksetzen von Variablen, Speichern von Zwischenergebnissen)

**5. Arena führt den Simulationslauf durch**

**6. Ereignisprozedur ModelLogic\_RunEndReplication** ... wird ausgeführt, wenn der letzte Simulationslauf (Replication) durchgeführt wurde (z. B. Rücksetzen von Variablen, Speichern von Zwischenergebnissen)

**7. Ereignisprozedur ModelLogic\_RunEndSimulation** ... wird ausgeführt, wenn die Simulation abgeschlossen ist. Hier können z. B. Ergebnisse analysiert und exportiert werden.

**8. Arena beendet die Simulation**

**9. Ereignisprozedur ModelLogic\_RunEnd** ... wird ausgeführt, wenn Arena die Simulation beendet hat. Es kann nicht mehr auf die Daten des Simulationslaufes zugegriffen werden. Falls gewünscht, kann man hier definieren unter welchen Bedingungen die Simulation erneut gestartet werden soll. Der gesamte Ablauf würde dann wieder bei Punkt 1 beginnen.

## 7 Modulwelt

### 7.1 Überblick

Um offene Materialflusssysteme bedienungsfreundlich und ohne großen zeitlichen Aufwand in einem Simulationsmodell nachbilden zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Module entwickelt, die aus den entsprechenden Bibliotheken ausgewählt und auf dem Modellfenster platziert werden können. Die Parameter werden in übersichtlich gestalteten Dialogboxen eingegeben. In Abbildung 58 sind alle Module dargestellt.

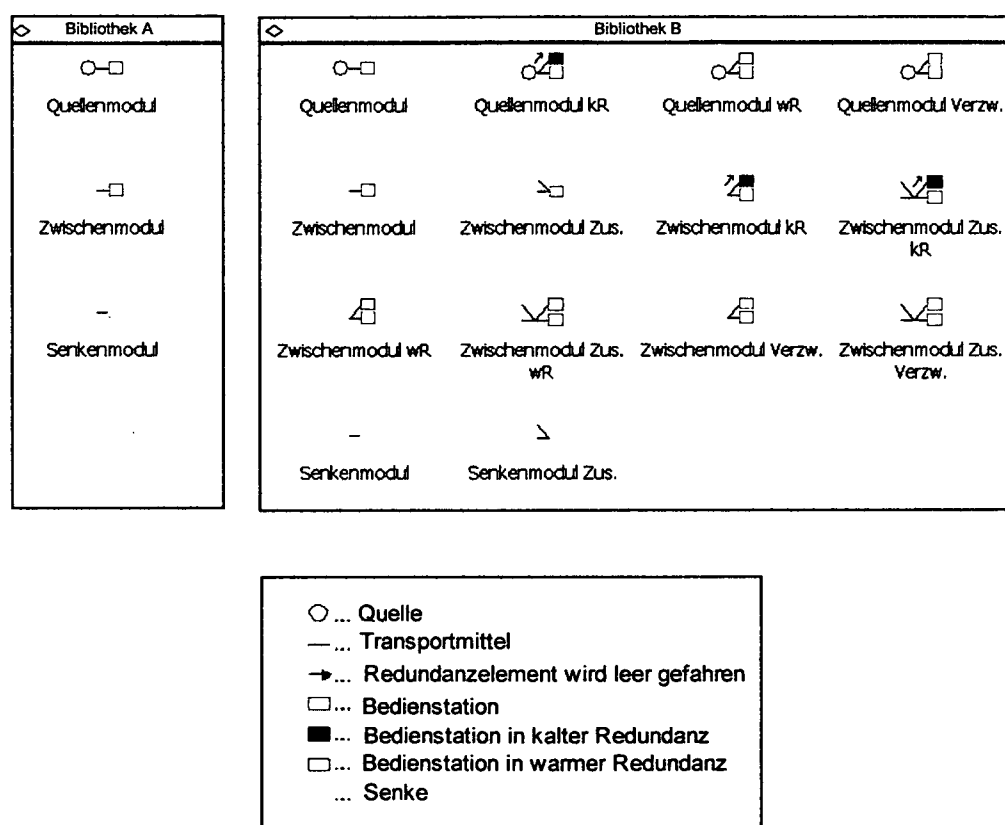


Abbildung 58: Überblick Modulwelt

Die einzelnen Module werden in den nächsten Abschnitten genau beschrieben. Für jeden Modul wird ein Modellkonzept in Form eines Flussdiagramms und das entsprechende ComputermodeLL angegeben. Das ComputermodeLL setzt sich aus verschiedenen SIMAN-Submodellen zusammen, die in Anhang A angeführt sind. Weiters wird beschrieben, welche Eingabeparameter definiert werden müssen und welche Animationselemente am Modellfenster dargestellt werden.

Zunächst sollen allerdings die einzelnen Modulbibliotheken kurz beschrieben werden:

### **Modulbibliothek A**

Die Module dieser Bibliothek ermöglichen die Abbildung von einfachen Materialflusssystemen mit Linienstruktur, d.h. die einzelnen Elemente wie Transportmittel, Puffer und Bedienstationen sind seriell angeordnet. Sie sind sowohl für Stückgut, als auch für Schüttgut geeignet, wobei für letzteres eine Diskretisierung erforderlich ist.

Das komplette Materialflusssystem wird durch eine Vielzahl von Animationselementen am Bildschirm visualisiert und eine umfangreiche Onlinestatistik, wie z.B. Auslastungsgrade, Blockierzeiten, Ausfallzeiten, technische Verfügbarkeiten, Warteschlangenlängen und Durchlaufzeiten ausgegeben. Des Weiteren werden die Dichtefunktionen der Ankunfts- und Bedienprozesse graphisch dargestellt.

### **Modulbibliothek B**

Mit den in dieser Bibliothek enthaltenen Modulen können Materialflusssysteme mit beliebiger Struktur, also mit Verzweigungen, Zusammenführungen und Redundanzelementen, in einem Simulationsmodell abgebildet werden. Zum Unterschied zu den Modulen für einfache Systemstruktur, werden hier nur die wichtigsten Animationselemente und Onlinestatistiken ausgegeben, um eine übersichtliche Darstellung am Bildschirm zu gewährleisten.

Die Anwendbarkeit der entwickelten Module wird in Anhang A an einem Beispiel illustriert (siehe Seite 170).

## 7.2 Bibliothek A

### 7.2.1 Quellenmodul

#### Modellkonzept

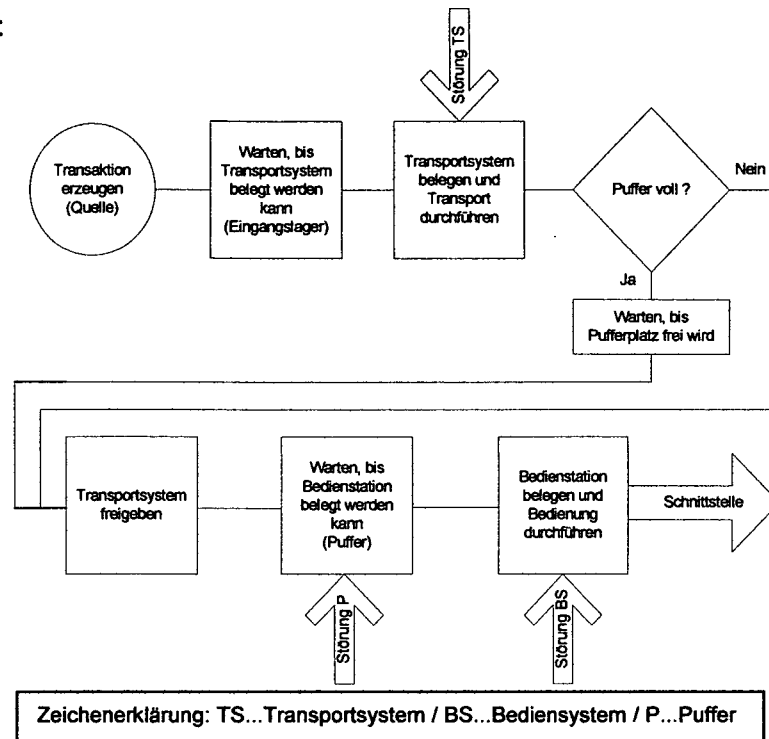


Abbildung 59: Modellkonzept Quellenmodul

#### Computermodell

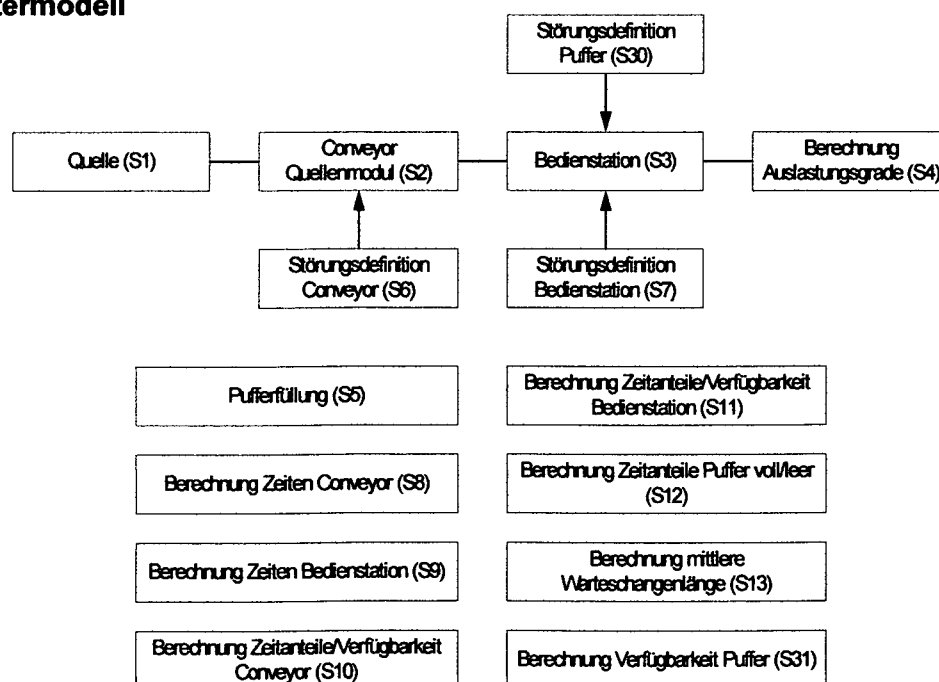


Abbildung 60: Computermodell Quellenmodul

## Eingabeparameter

**Quellenmodul**

Betrachtungszeitraum:

Zwischenankunftszeit:

Bezeichnung:

Techn. Durchsatz TS:

TBF TS:

TTR TS:

Pufferkapazität:

Pufferinhalt:

Warteschlangendisziplin:

TBF Puffer:

TTR Puffer:

Bediendauer:

TBF BS:

TTR BS:

Berechnungsintervall:

Nachfolgeelement:

OK Cancel Help

Zeitraum, in dem Transaktionen erzeugt werden

Zeitlicher Abstand zwischen zwei erzeugten Transaktionen (z.B. EXPO(1.2))

Modulbezeichnung

Technischer Durchsatz des Transportsystems in Stk/Zeiteinheit

Störungsfreie Zeit des Transportsystems

Störungsdauer des Transportsystems

Anzahl der vom Puffer maximal aufnehmbaren Fördereinheiten

Anzahl der Fördereinheiten im Puffer zu Beginn des Simulationslaufes

Strategie der Abfertigung

Störungsfreie Zeit des Puffers

Störungsdauer des Puffers

Zeitdauer des Bedienvorgangs

Störungsfreie Zeit der Bedienstation

Störungsdauer der Bedienstation

Zeitlicher Abstand zwischen der Aktualisierung der Onlinestatistik

Bezeichnung des nachfolgenden Moduls, bzw. Elements

Abbildung 61: Dialogbox Quellenmodul

## Animationselemente

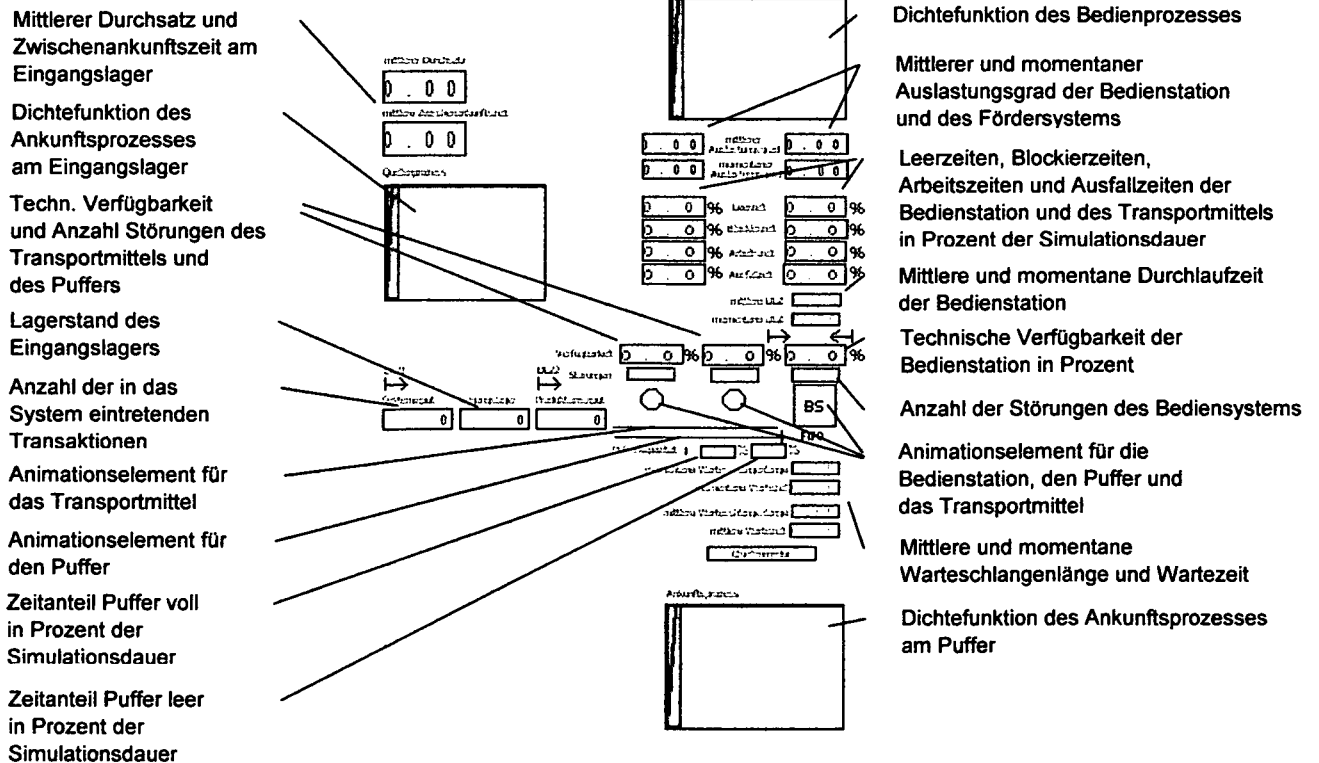


Abbildung 62: Animationselemente Quellenmodul

## 7.2.2 Zwischenmodul

### Modellkonzept

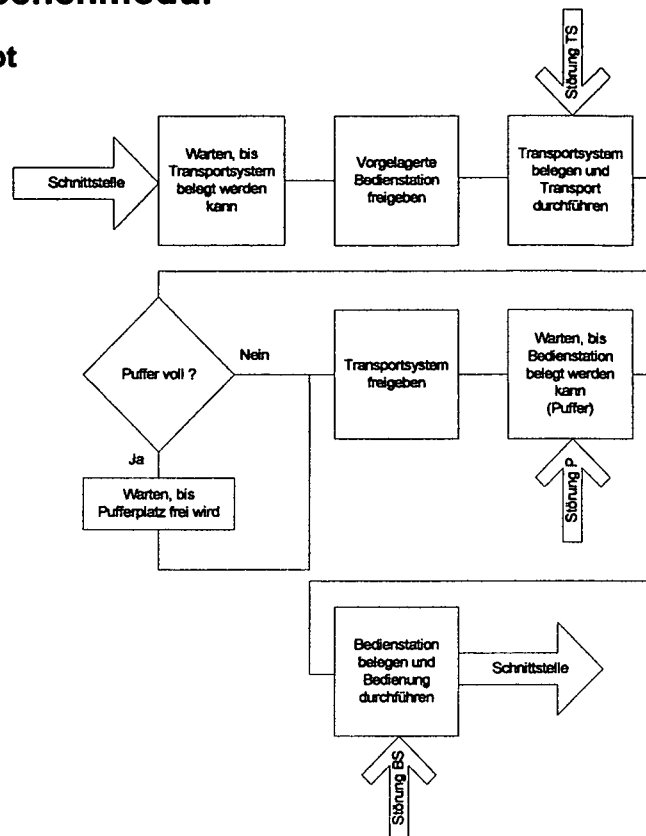


Abbildung 63: Modellkonzept Zwischenmodul

### Computermodell

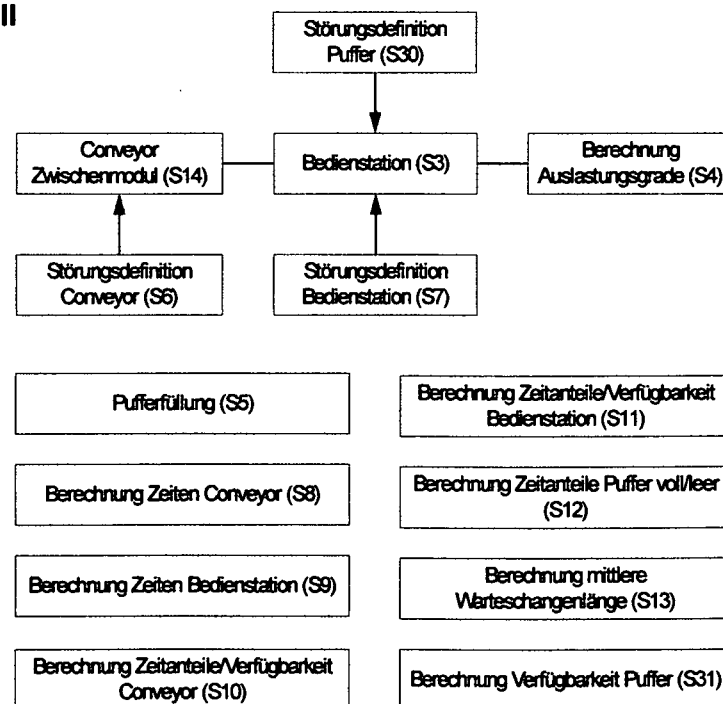


Abbildung 64: Computermodell Zwischenmodul

## Eingabeparameter

**Zwischenmodul**

Bezeichnung:

Techn Durchsatz TS:

TBF TS:

TTR TS:

Pufferkapazität:

Pufferinhalt:

Warteschlangendisziplin:

TBF Puffer:

TTR Puffer:

Bediendauer:

TBF BS:

TTR BS:

Berechnungsintervall:

Nachfolgeelement:

Vorgängerelement:

OK Cancel Help

Bezeichnung des  
vorangehenden  
Moduls, bzw. Elements

Abbildung 65: Dialogbox Zwischenmodul

## Animationselemente

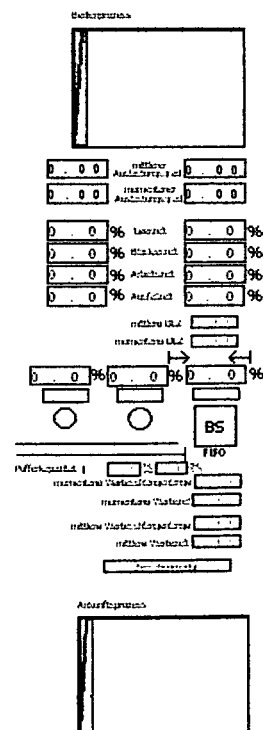


Abbildung 66: Animationselemente Zwischenmodul

## 7.2.3 Senkenmodul

### Modellkonzept

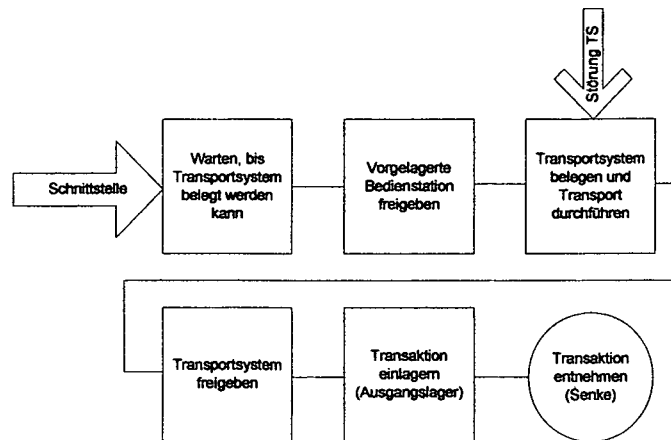


Abbildung 67: Modellkonzept Senkenmodul

### Computermodell

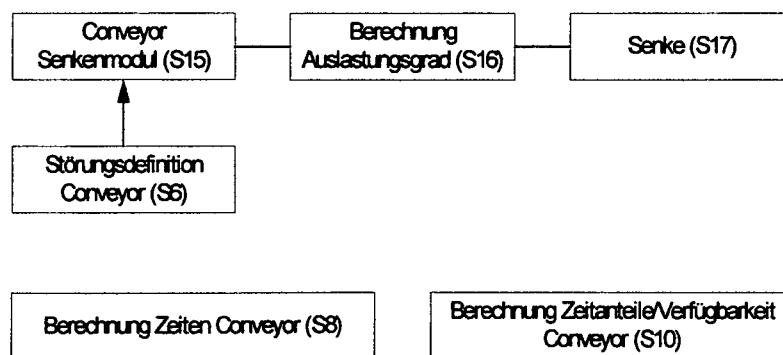


Abbildung 68: Computermodell Senkenmodul



## Eingabeparameter

Senkenmodul

Bezeichnung:

Techn Durchsatz TS:

TBF TS:

TTR TS:

Entnahmeintervall:

Berechnungsintervall:

Vorgeengerelement

DLZ Quellenmodul:

OK Cancel Help

Zeitlicher Abstand zwischen den Entnahmen der Fördereinheiten aus dem Ausgangslager

Bezeichnung des Quellenmoduls, der Ausgangspunkt für die Messung der Durchlaufzeit bis zur Senke sein soll

Abbildung 69: Dialogbox Senkenmodul

## Animationselemente

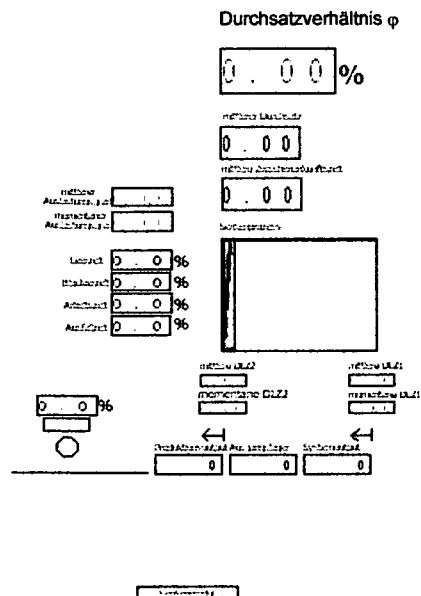


Abbildung 70: Animationselemente Senkenmodul

## 7.3 Bibliothek B

### 7.3.1 Vereinfachter Quellenmodul

Modellkonzept, Computermmodell, Eingabeparameter wie bei Quellenmodul Bibliothek A

#### Animationselemente

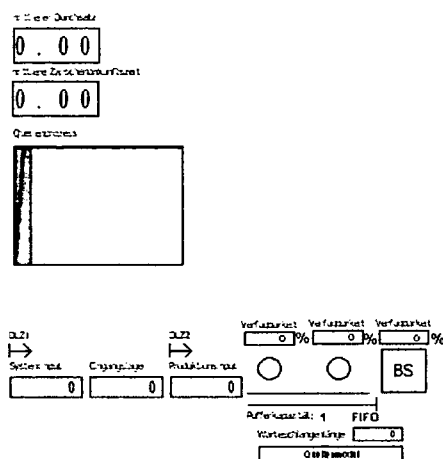


Abbildung 71: Animationselemente vereinfachter Quellenmodul

### 7.3.2 Vereinfachter Quellenmodul mit kalter Redundanz (kR)

#### Modellkonzept

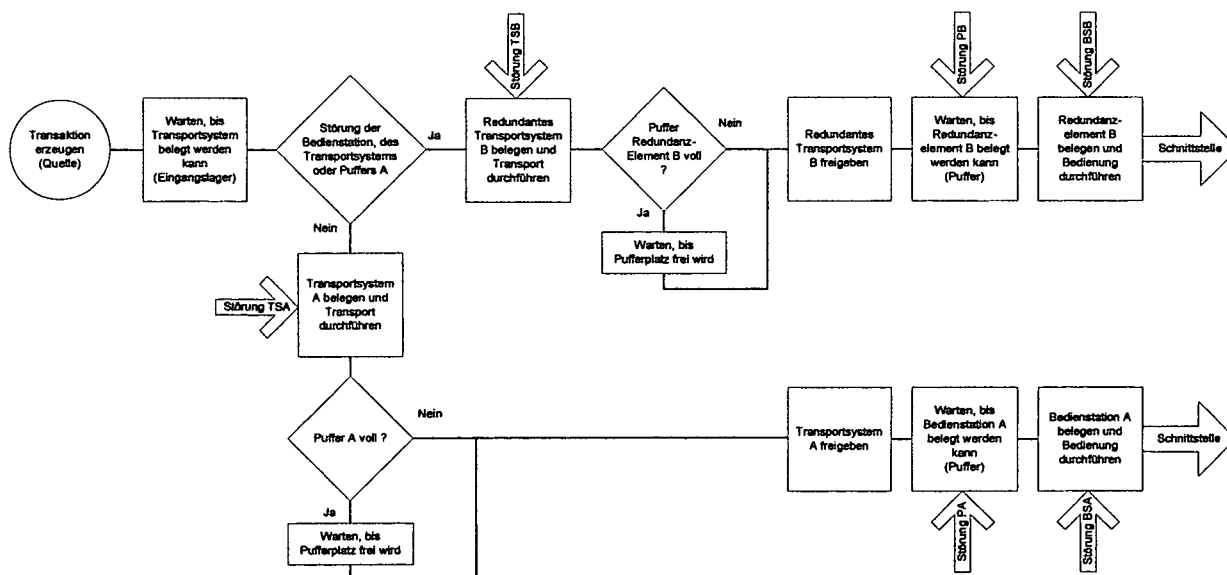


Abbildung 72: Modellkonzept vereinfachter Quellenmodul kR

## Computermodell

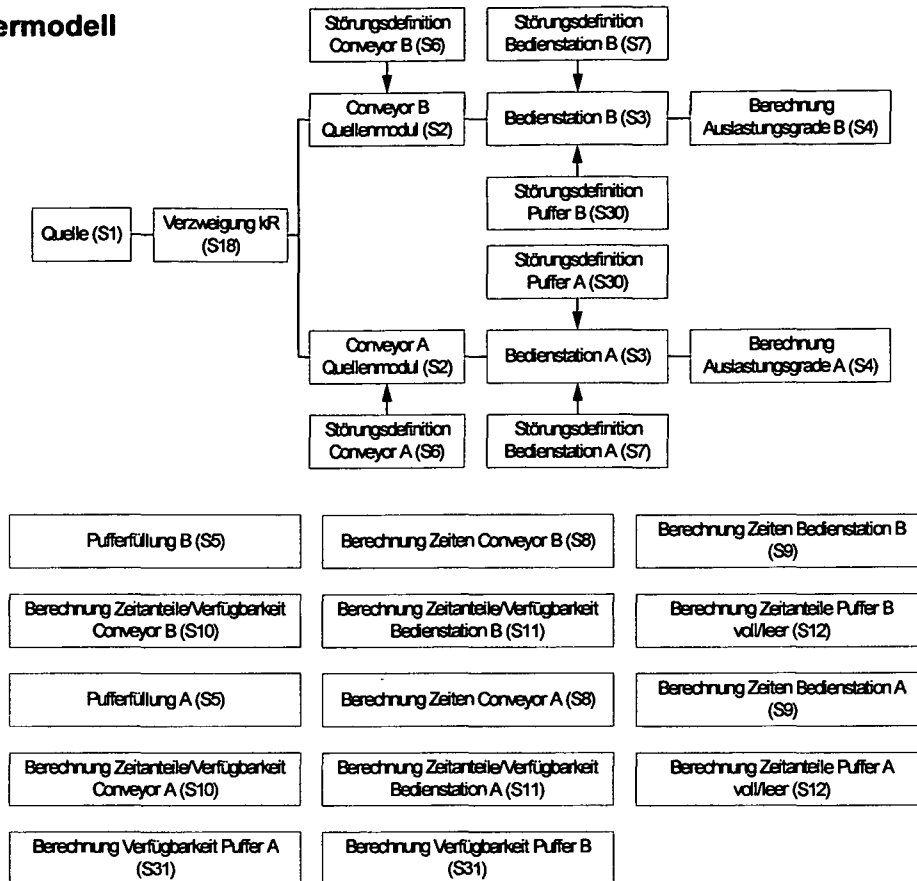


Abbildung 73: Computermodell vereinfachter Quellenmodul kR

## Eingabeparameter

The screenshot shows the 'Quellenmodul kR' dialog box. It contains input fields for: Betrachtungszeitraum, Zwischenankunftszeit, Bezeichnung, Berechnungsintervall, Nachfolgeelement B, and Nachfolgeelement A. There are also buttons for 'Element B...', 'Element A...', 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Abbildung 74: Dialogbox vereinfachter Quellenmodul kR

**Element A**

Bezeichnung A:

Techn Durchsatz TS A:

TBF TS A:

TTR TS A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer A:

TBF BS A:

TTR BS A:

OK Cancel Help

**Element B**

Bezeichnung B:

Techn Durchsatz TS B:

TBF TS B:

TTR TS B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

Bediendauer B:

TBF BS B:

TTR BS B:

OK Cancel Help

Abbildung 75: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Quellenmodul kR

## Animationselemente

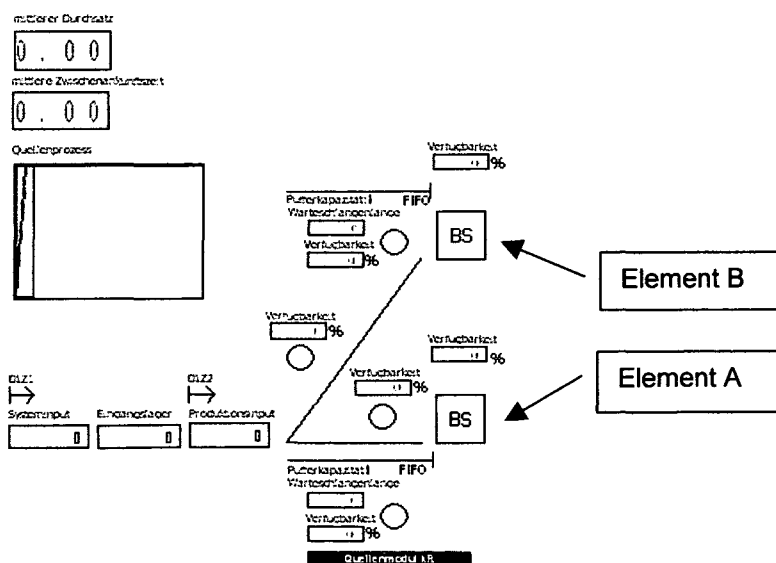


Abbildung 76: Animationselemente vereinfachter Quellenmodul kR

### 7.3.3 Vereinfachter Quellenmodul mit warmer Redundanz (wR)

#### Modellkonzept

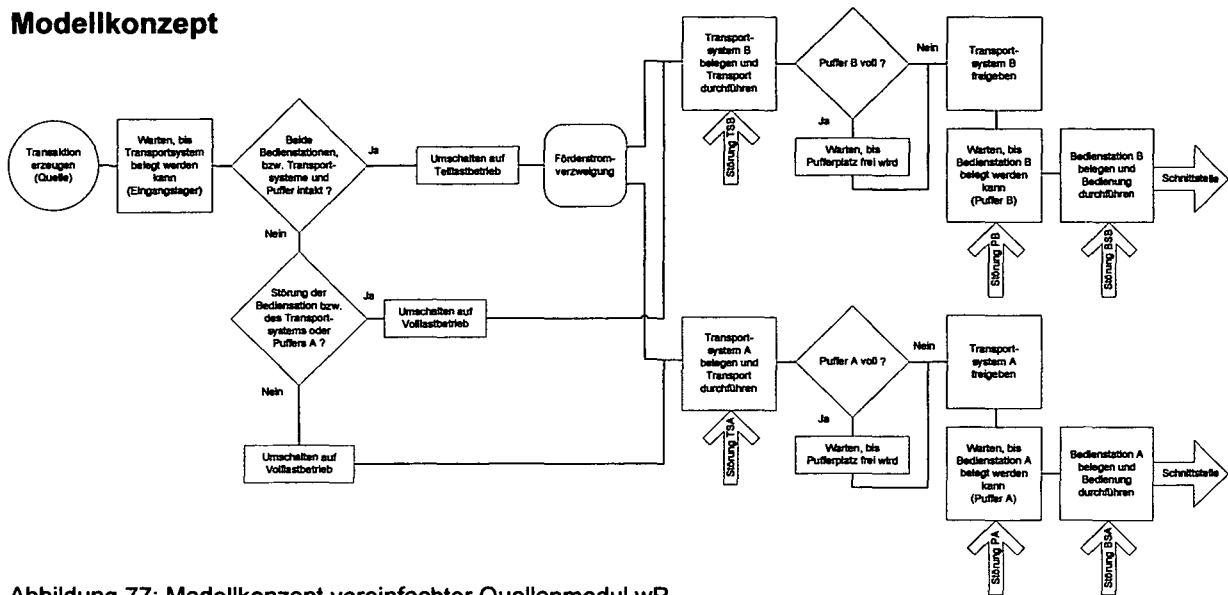


Abbildung 77: Modellkonzept vereinfachter Quellenmodul wR

#### Computermodell

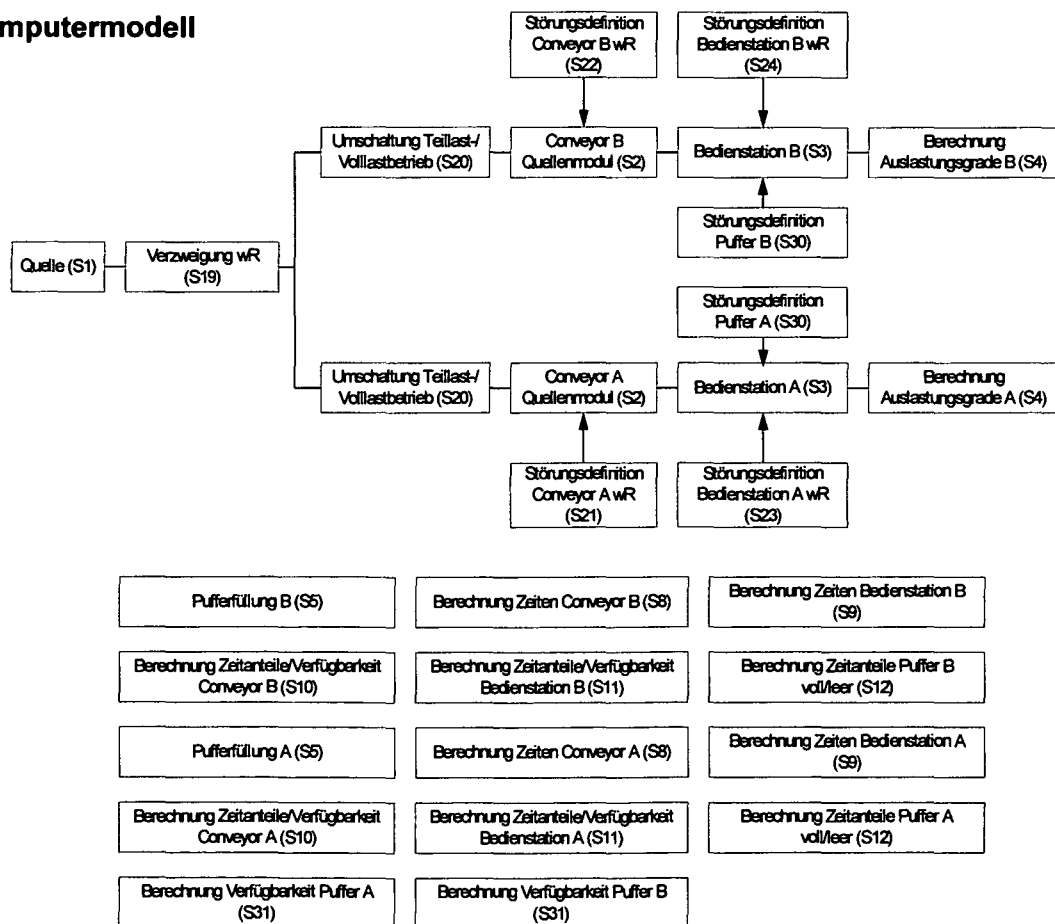


Abbildung 78: Computermodell vereinfachter Quellenmodul wR

## Eingabeparameter

**Quellenmodul wR**

Betrachtungszeitraum:

Zwischenankunftszeit:

Bezeichnung:

Anzahl B:

Anzahl A:

Berechnungsintervall:

Nachfolgeelement B:

Nachfolgeelement A:

Abbildung 79: Dialogbox vereinfachter Quellenmodul wR

**Element A**

Bezeichnung A:

Techn Durchsatz TS Teillast A:

Techn Durchsatz TS Vollast A:

TBF TS VL A:

TBF TS TL A:

TTR TS A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer Teillast A:

Bediendauer Vollast A:

TBF BS VL A:

TBF BS TL A:

TTR BS A:

**Element B**

Bezeichnung B:

Techn Durchsatz TS Teillast B:

Techn Durchsatz TS Vollast B:

TBF TS VL B:

TBF TS TL B:

TTR TS B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

Bediendauer Teillast B:

Bediendauer Vollast B:

TBF BS VL B:

TBF BS TL B:

TTR BS B:

Abbildung 80: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Quellenmodul wR

**Animationselemente** siehe vereinfachter Quellenmodul kR

## 7.3.4 Vereinfachter Quellenmodul mit Verzweigung

### Modellkonzept

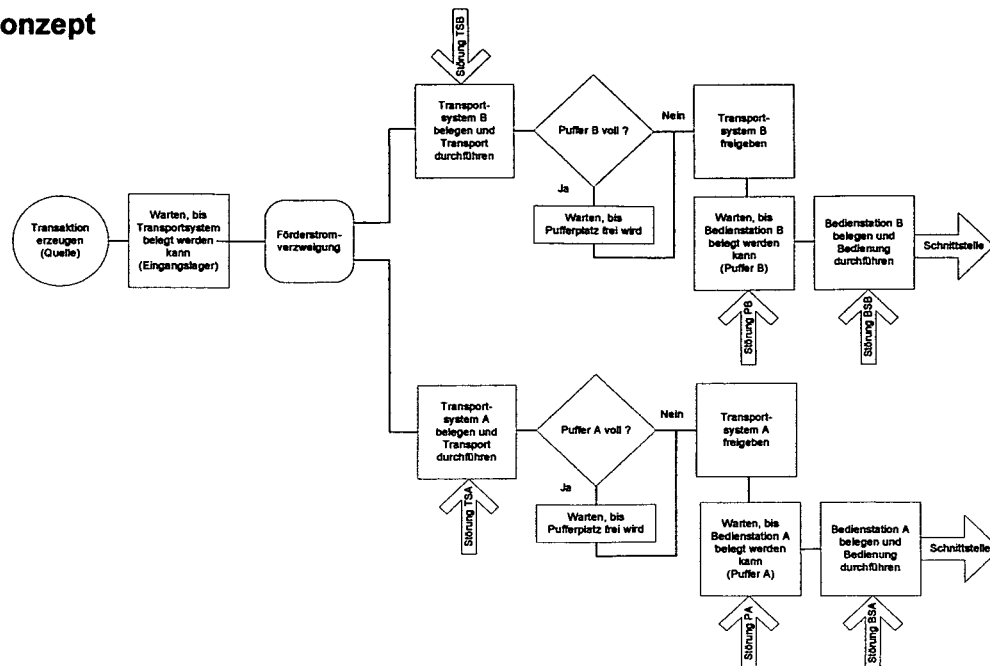


Abbildung 81: Modellkonzept vereinfachter Quellenmodul Verzweigung

### Computermodell

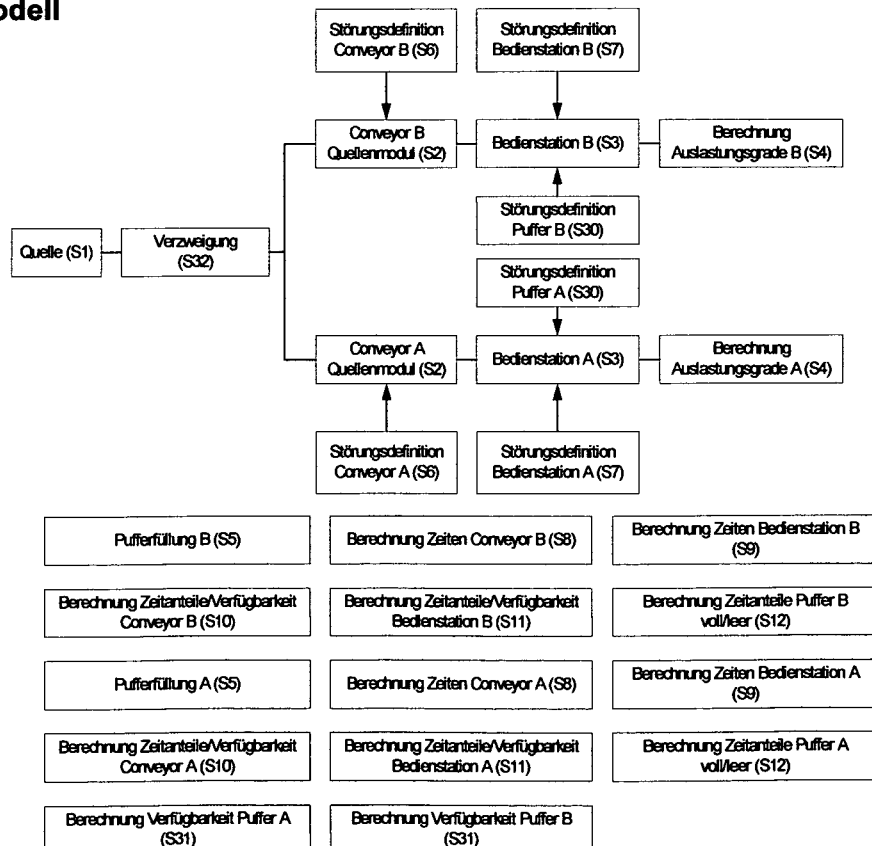


Abbildung 82: Computermodell vereinfachter Quellenmodul Verzweigung

## Eingabeparameter

**Quellenmodul Verz.**

Betrachtungszeitraum:

Zwischenankunftszeit:

Bezeichnung:

Anzahl B:

Anzahl A:

Berechnungsintervall:

Nachfolgeelement B:

Nachfolgeelement A:

Abbildung 83: Dialogbox vereinfachter Quellenmodul Verzweigung

**Element A**

Bezeichnung A:

Techn Durchsatz TS A:

TBF TS A:

TTR TS A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer A:

TBF BS A:

TTR BS A:

**Element B**

Bezeichnung B:

Techn Durchsatz TS B:

TBF TS B:

TTR TS B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

Bediendauer B:

TBF BS B:

TTR BS B:

Abbildung 84: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Quellenmodul Verzweigung

**Animationselemente** siehe vereinfachter Quellenmodul kR



### 7.3.5 Vereinfachter Zwischenmodul

Modellkonzept, Computermodell, Eingabeparameter wie bei Zwischenmodul Bibliothek A

#### Animationselemente

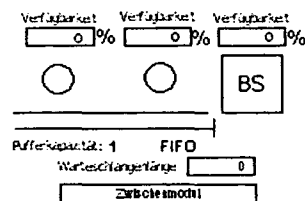


Abbildung 85: Animationselemente vereinfachter Zwischenmodul

### 7.3.6 Vereinfachter Zwischenmodul mit Verzweigung

#### Modellkonzept

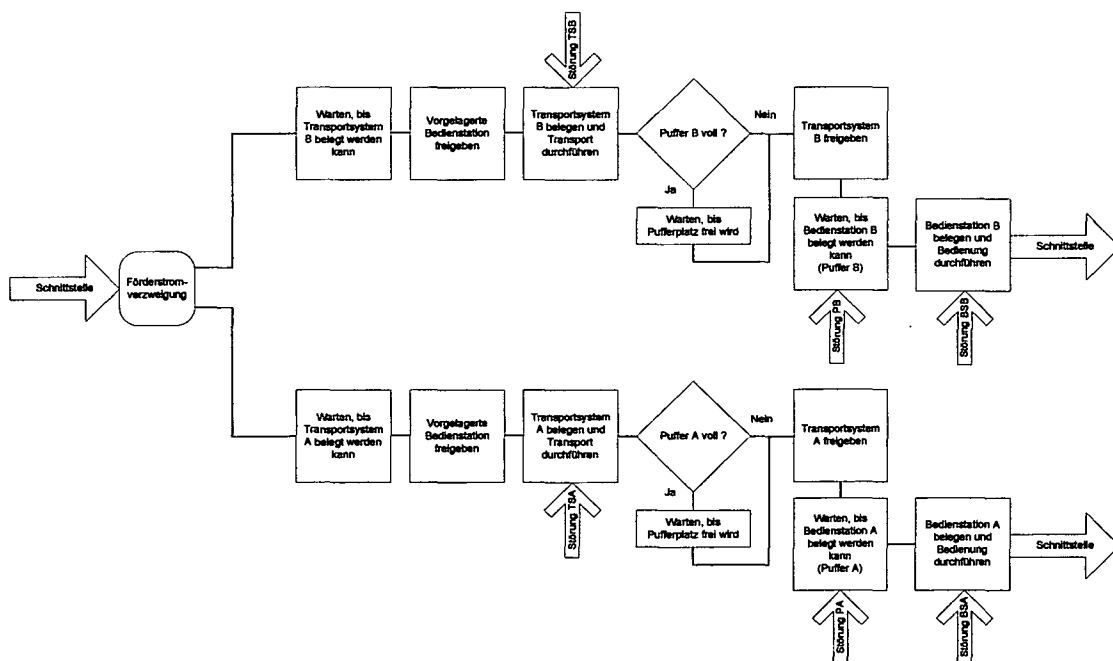


Abbildung 86: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Verzweigung

## Computermodell

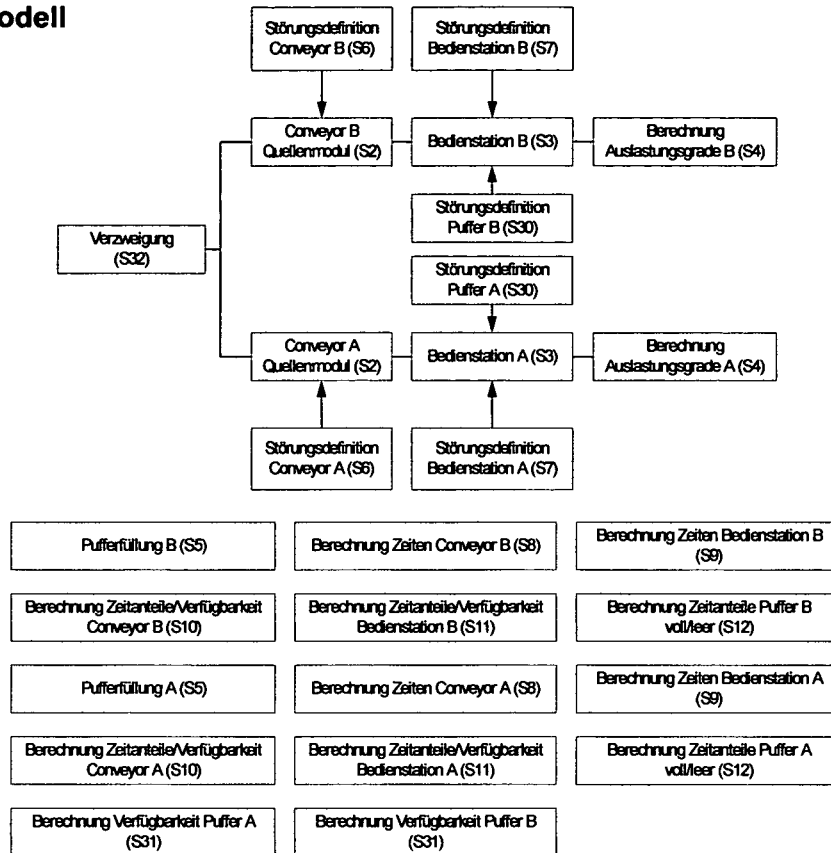


Abbildung 87: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Verzweigung

## Eingabeparameter

Abbildung 88: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Verzweigung

### Element A

Bezeichnung A:

Techn Durchsatz TS A:

TBF TS A:

TTR TS A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer A:

TBF BS A:

TTR BS A:

OK Cancel Help

### Element B

Bezeichnung B:

Techn Durchsatz TS B:

TBF TS B:

TTR TS B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

Bediendauer B:

TBF BS B:

TTR BS B:

OK Cancel Help

Abbildung 89: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul Verzweigung

Animationselemente siehe vereinfachter Zwischenmodul kR

## 7.3.7 Vereinfachter Zwischenmodul mit Zusammenführung

Modellkonzept

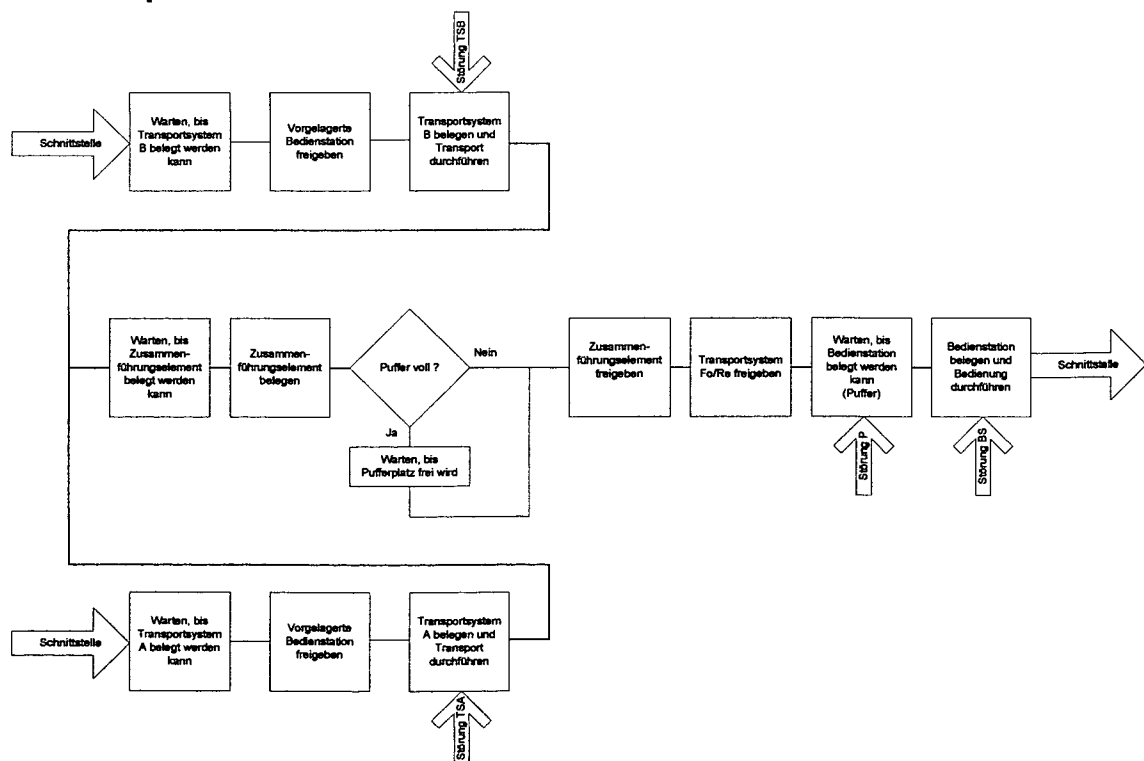


Abbildung 90: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung

## Computermodell

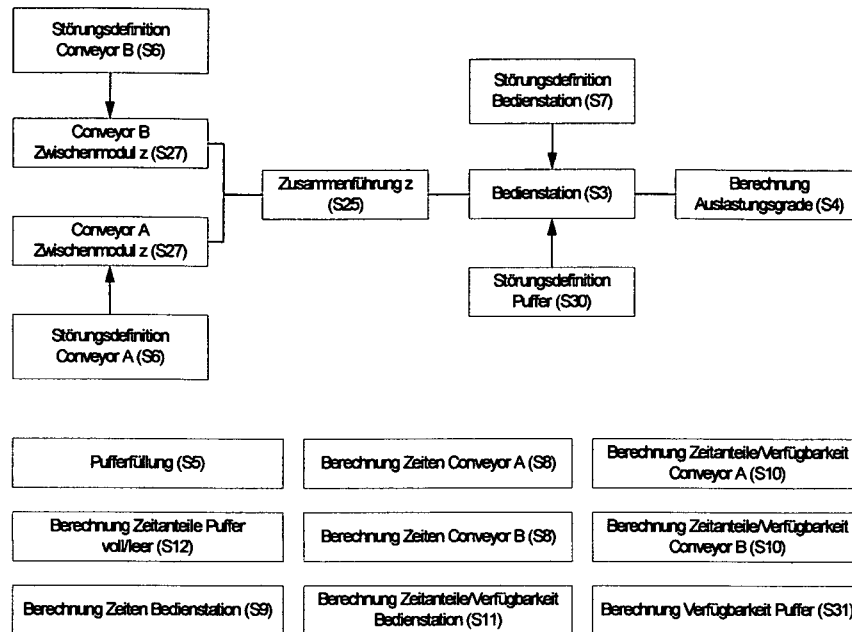


Abbildung 91: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung

## Eingabeparameter

**Zwischenmodul Zus.**

Bezeichnung:	<input type="text"/>	Zeitdauer Einschleusvorgang:	<input type="text"/>
Bezeichnung B:	<input type="text"/>	Pufferkapazität:	<input type="text"/>
Vorgaengerelement B:	<input type="text"/>	Pufferinhalt:	<input type="text"/>
Techn Durchsatz TS B:	<input type="text"/>	Warteschlangendisziplin:	<input type="text"/>
TBF TS B:	<input type="text"/>	TBF Puffer:	<input type="text"/>
TTR TS B:	<input type="text"/>	TTR Puffer:	<input type="text"/>
Bezeichnung A:	<input type="text"/>	Bediendauer:	<input type="text"/>
Vorgaengerelement A:	<input type="text"/>	TBF BS:	<input type="text"/>
Techn Durchsatz TS A:	<input type="text"/>	TTR BS:	<input type="text"/>
TBF TS A:	<input type="text"/>	Berechnungsintervall:	<input type="text"/>
TTR TS A:	<input type="text"/>	Nachfolgeelement:	<input type="text"/>

Abbildung 92: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung

## Animationselemente

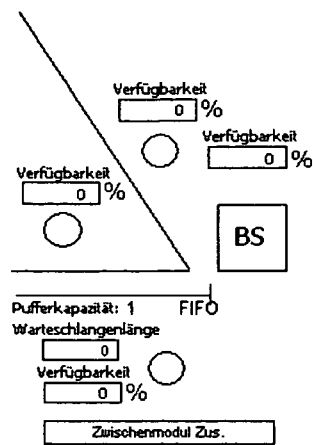


Abbildung 93: Animationselemente vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung

## 7.3.8 Vereinfachter Zwischenmodul mit kalter Redundanz (kR)

### Modellkonzept

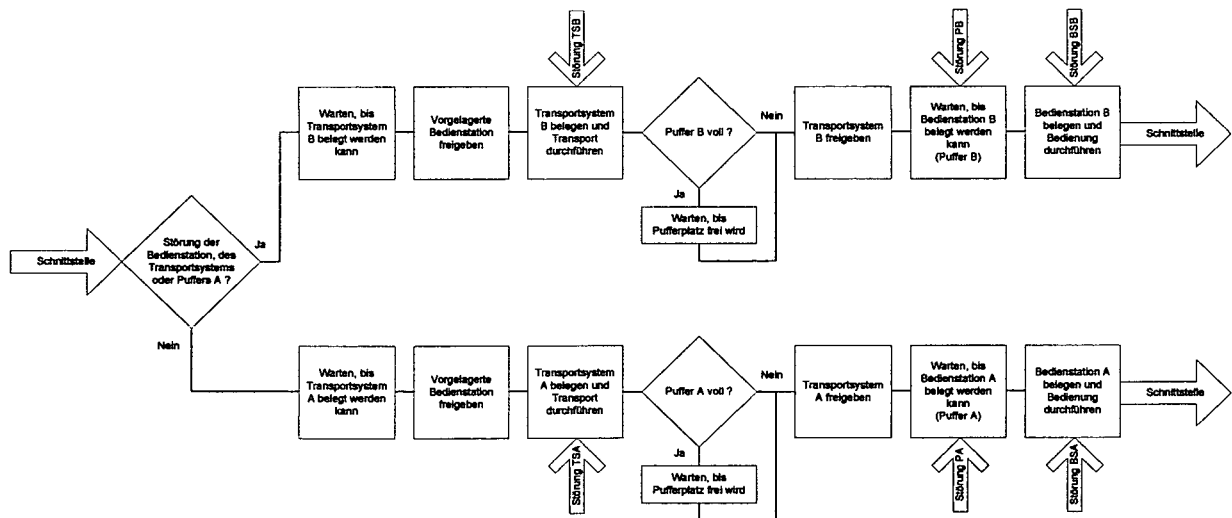


Abbildung 94: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul kR

## Computermodell

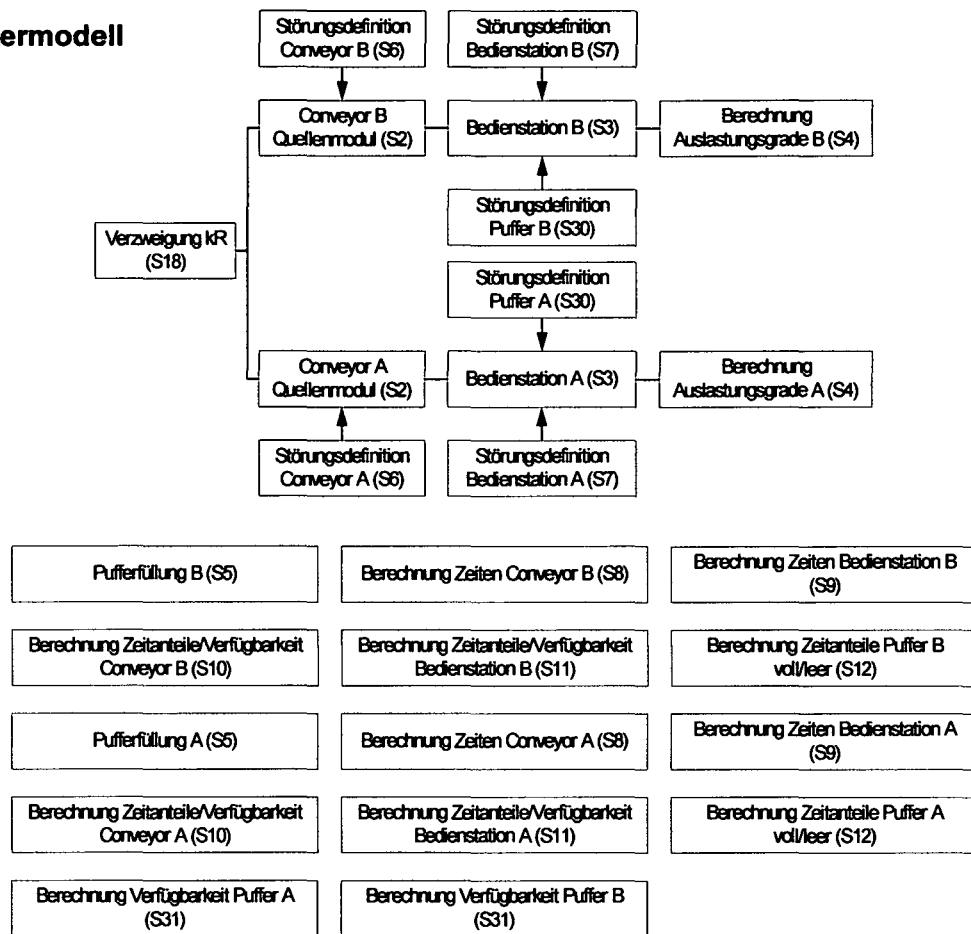


Abbildung 95: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul kR

## Eingabeparameter

The dialog box titled "Zwischenmodul kR" contains the following input fields and buttons:

- Bezeichnung:** A text input field with a button labeled "Element B..." below it.
- Berechnungsintervall:** A text input field with a button labeled "Element A..." below it.
- Nachfolgeelement B:** A text input field.
- Nachfolgeelement A:** A text input field.
- Vorgängerelement:** A text input field.
- Buttons:** "OK", "Cancel", and "Help" at the bottom.

Abbildung 96: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul kR

**Element A**

Bezeichnung A:

Techn Durchsatz TS A:

TBF TS A:

TTR TS A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer A:

TBF BS A:

TTR BS A:

OK Cancel Help

**Element B**

Bezeichnung B:

Techn Durchsatz TS B:

TBF TS B:

TTR TS B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

Bediendauer B:

TBF BS B:

TTR BS B:

OK Cancel Help

Abbildung 97: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul kR

## Animationselemente

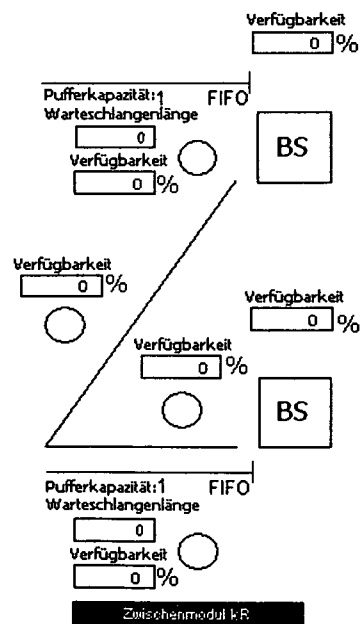


Abbildung 98: Animationselemente vereinfachter Zwischenmodul kR

## 7.3.9 Vereinfachter Zwischenmodul mit Zusammenführung und kalter Redundanz (kR)

### Modellkonzept

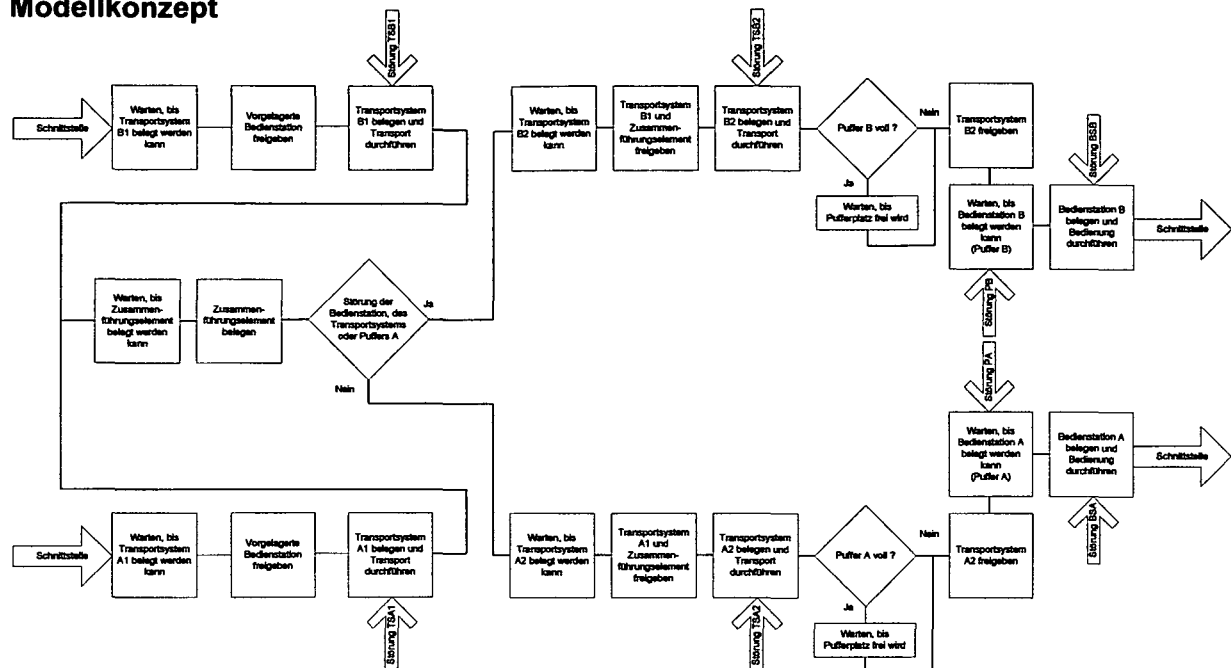
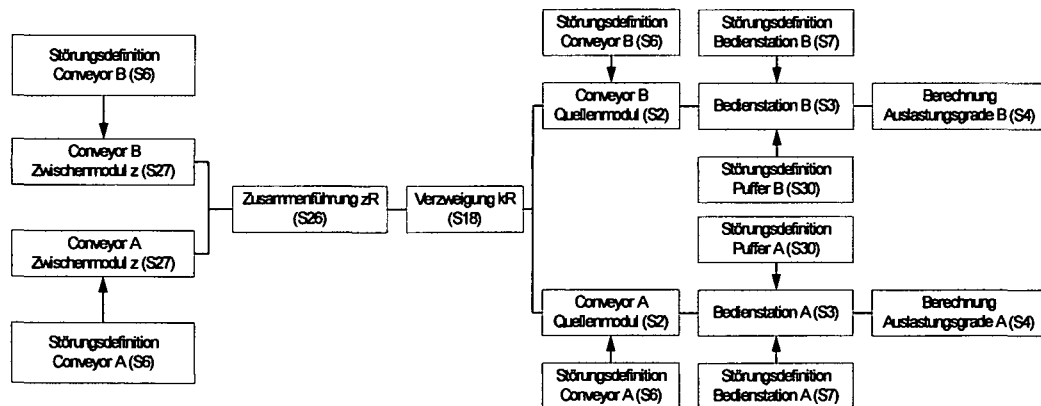


Abbildung 99: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR

### Computermodell



Pufferfüllung B (S5)	Berechnung Zeiten Conveyor B Zwischenmodul zR (S6)	Pufferfüllung A (S5)	Berechnung Zeiten Conveyor A Zwischenmodul zR (S6)
Berechnung Zeitanteile Puffer B voll/leer (S12)	Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Conveyor B Zwischenmodul zR (S10)	Berechnung Zeitanteile Puffer A voll/leer (S12)	Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Conveyor A Zwischenmodul zR (S10)
Berechnung Zeiten Conveyor B Zwischenmodul z (S8)	Berechnung Zeiten Bedienstation B (S9)	Berechnung Zeiten Conveyor A Zwischenmodul z (S8)	Berechnung Zeiten Bedienstation A (S9)
Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Conveyor B Zwischenmodul z (S10)	Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Bedienstation B (S11)	Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Conveyor A Zwischenmodul z (S10)	Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Bedienstation A (S11)
Berechnung Verfügbarkeit Puffer A (S31)	Berechnung Verfügbarkeit Puffer B (S31)		

Abbildung 100: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR



## Eingabeparameter

**Zwischenmodul Zus. kR**

Bezeichnung:

Bezeichnung B:

Vorgaengerelement B:

Techn Durchsatz TS1 B:

TBF TS1 B:

TTR TS1 B:

Bezeichnung A:

Vorgaengerelement A:

Techn Durchsatz TS1 A:

TBF TS1 A:

TTR TS1 A:

Zeitdauer Einschleusvorgang:

Element B...

Element A...

Berechnungsintervall:

Nachfolgeelement B:

Nachfolgeelement A:

Abbildung 101: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR

**Element A**

Techn Durchsatz TS2 A:

TBF TS2 A:

TTR TS2 A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer A:

TBF BS A:

TTR BS A:

**Element B**

Techn Durchsatz TS2 B:

TBF TS2 B:

TTR TS2 B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

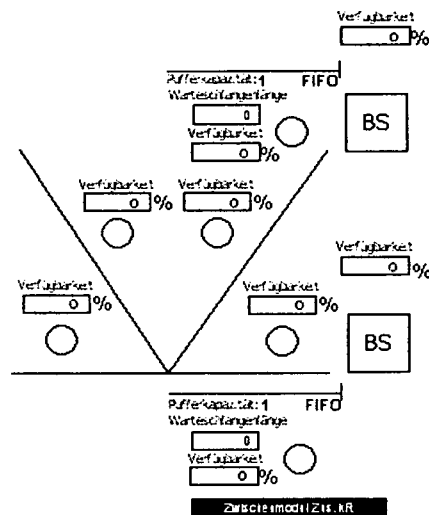
Bediendauer B:

TBF BS B:

TTR BS B:

Abbildung 102: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR

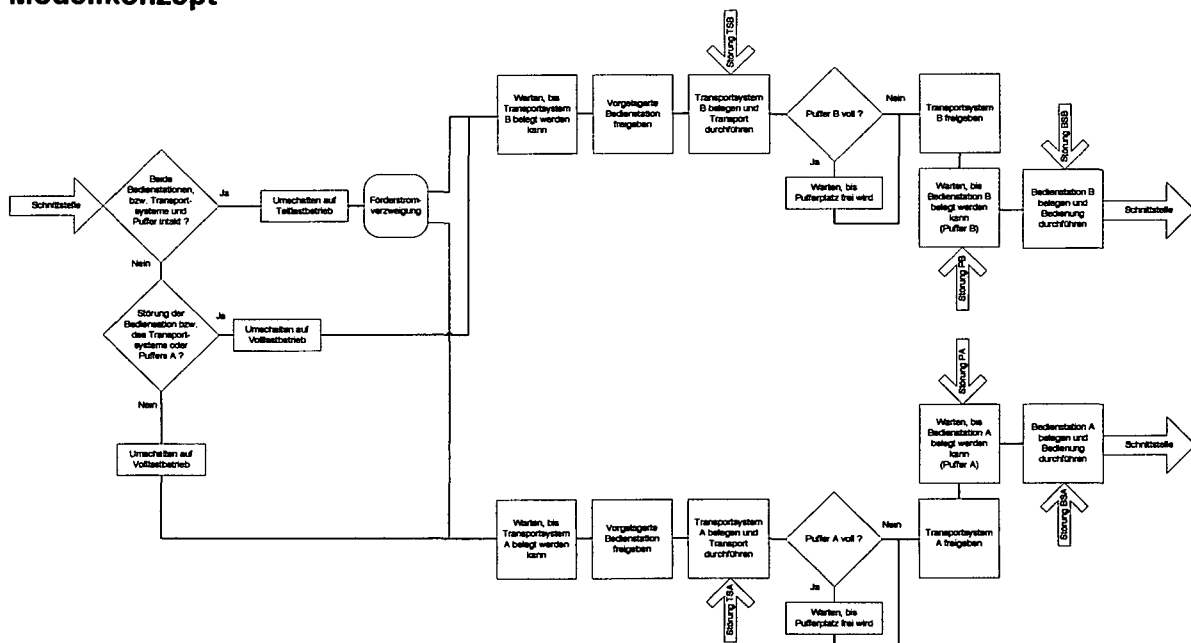
## Animationselemente



**Abbildung 103: Animationselemente vereinfachter Zwischenmodul  
Zusammenführung kR**

### 7.3.10 Vereinfachter Zwischenmodul mit warmer Redundanz

## Modellkonzept



**Abbildung 104: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul wR**

## Computermodell

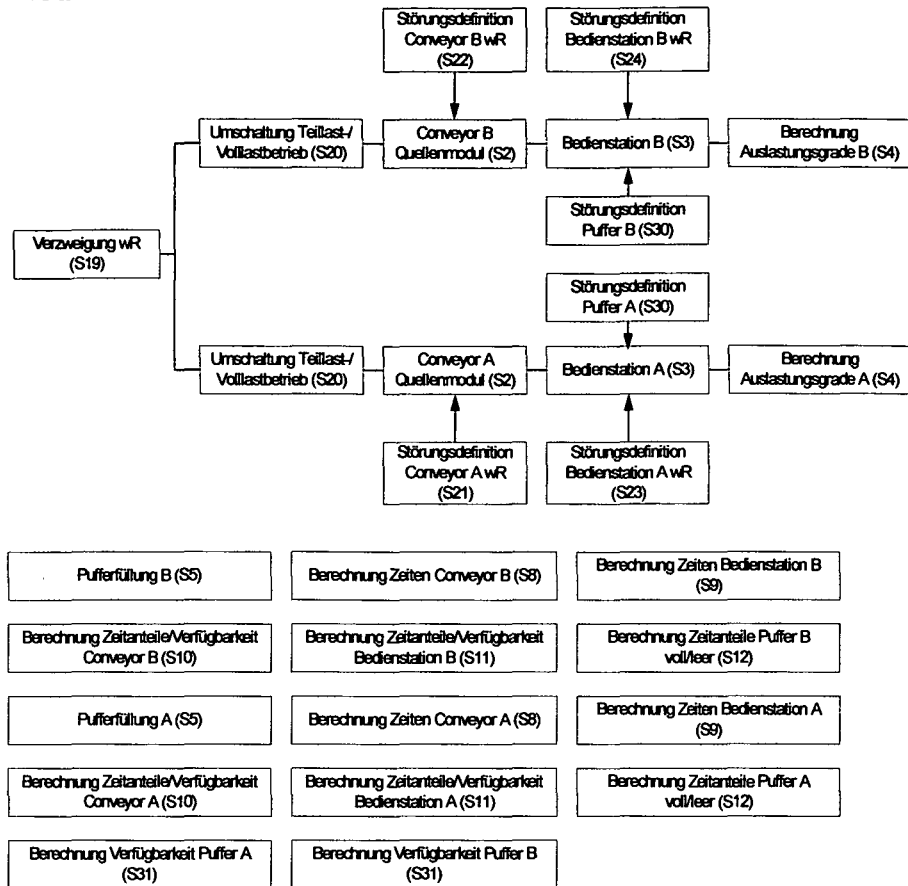


Abbildung 105: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul wR

## Eingabeparameter

**Zwischenmodul wR**

Bezeichnung:

Anzahl B:

Anzahl A:

Element B...

Element A...

Berechnungsintervall:

Nachfolgeelement B:

Nachfolgeelement A:

Vorgängerelement:

OK Cancel Help

Abbildung 106: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul wR

### Element A

Bezeichnung A:

Techn Durchsatz TS Teillast A:

Techn Durchsatz TS Volllast A:

TBF TS VLA:

TBF TS TLA:

TTR TS A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer Teillast A:

Bediendauer Volllast A:

TBF BS VLA:

TBF BS TLA:

TTR BS A:

Hilfe A...

OK Cancel Help

### Element B

Bezeichnung B:

Techn Durchsatz TS Teillast B:

Techn Durchsatz TS Volllast B:

TBF TS VL B:

TBF TS TL B:

TTR TS B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

Bediendauer Teillast B:

Bediendauer Volllast B:

TBF BS VL B:

TBF BS TL B:

TTR BS B:

Hilfe B...

OK Cancel Help

Abbildung 107: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul wR

Animationselemente siehe vereinfachter Zwischenmodul kR

### 7.3.11 Vereinfachter Zwischenmodul mit Zusammenführung und warmer Redundanz (wR)

#### Modellkonzept

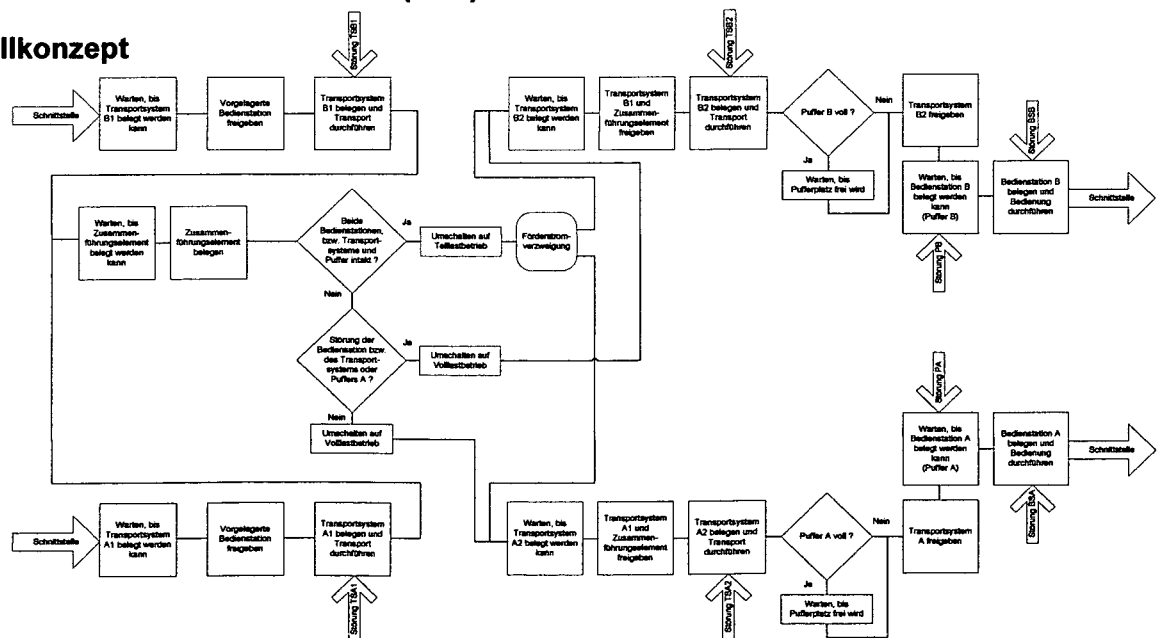


Abbildung 108: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung wR

## Computermodell

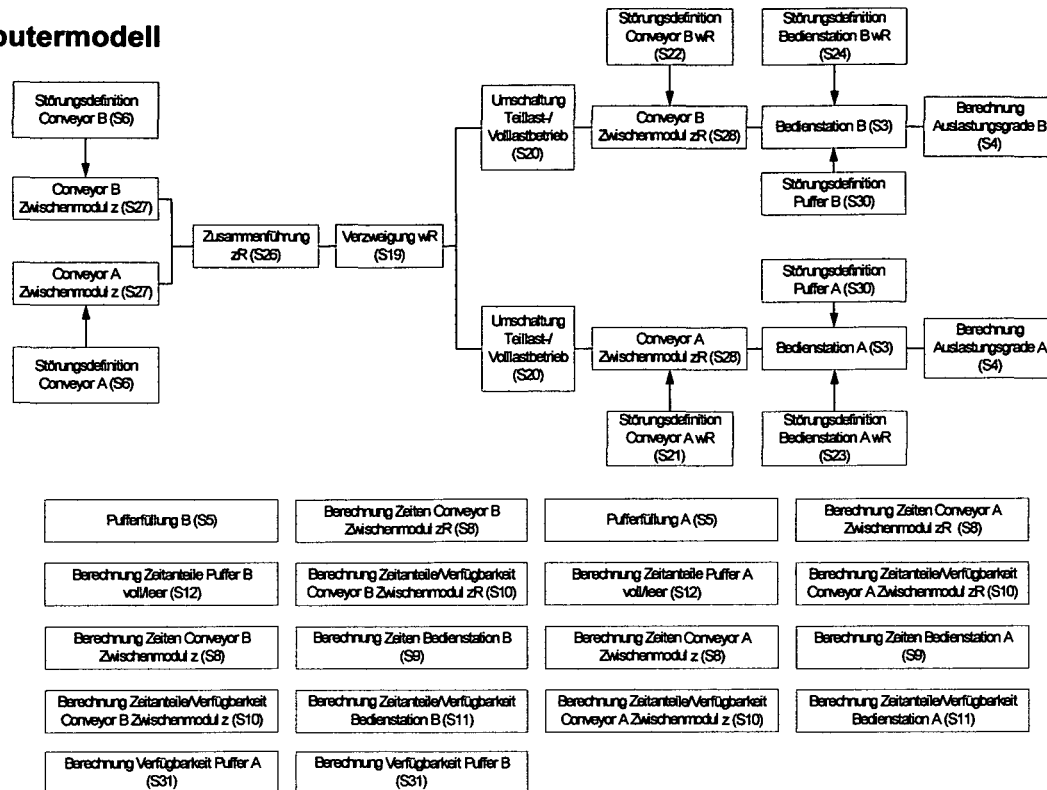


Abbildung 109: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung wR

## Eingabeparameter

**Zwischenmodul Zus. wR**

Bezeichnung:

Bezeichnung B:

Vorgaengerelement B:

Techn Durchsatz TS1 B:

TBF TS1 B:

TTR TS1 B:

Bezeichnung A:

Vorgaengerelement A:

Techn Durchsatz TS1 A:

TBF TS1 A:

TTR TS1 A:

Zeitdauer Einschleusvorgang:

Anzahl B:

Anzahl A:

Element B...

Element A...

Berechnungsintervall:

Nachfolgeelement B:

Nachfolgeelement A:

OK Cancel Help

Abbildung 110: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung wR

### Element A

Techn Durchsatz TS2 TL A:

Techn Durchsatz TS2 VL A:

TBF TS2 VL A:

TBF TS2 TL A:

TTR TS2 A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer Teillast A:

Bediendauer Vollast A:

TBF BS VL A:

TBF BS TL A:

TTR BS A:

Hilfe A...

### Element B

Techn Durchsatz TS2 TL B:

Techn Durchsatz TS2 VL B:

TBF TS2 VL B:

TBF TS2 TL B:

TTR TS2 B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

Bediendauer Teillast B:

Bediendauer Vollast B:

TBF BS VL B:

TBF BS TL B:

TTR BS B:

Hilfe B...

Abbildung 111: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung wR

Animationselemente siehe vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR

### 7.3.12 Vereinfachter Zwischenmodul mit Zusammenführung und Verzweigung

#### Modellkonzept

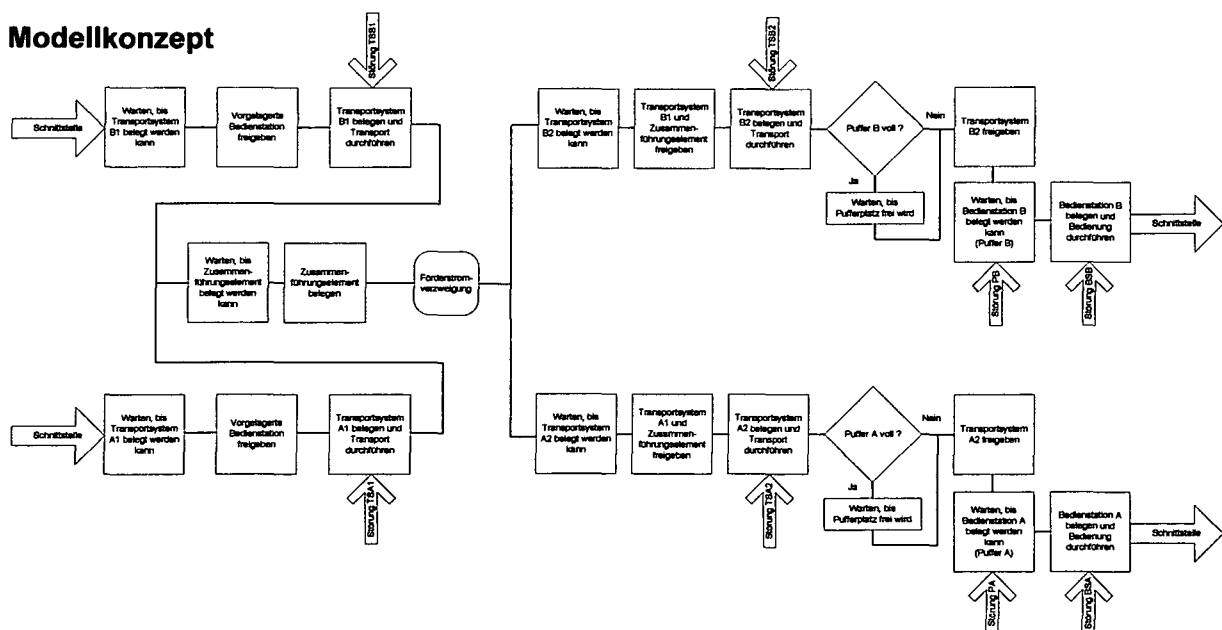


Abbildung 112: Modellkonzept vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung-Verzweigung

## Computermodell

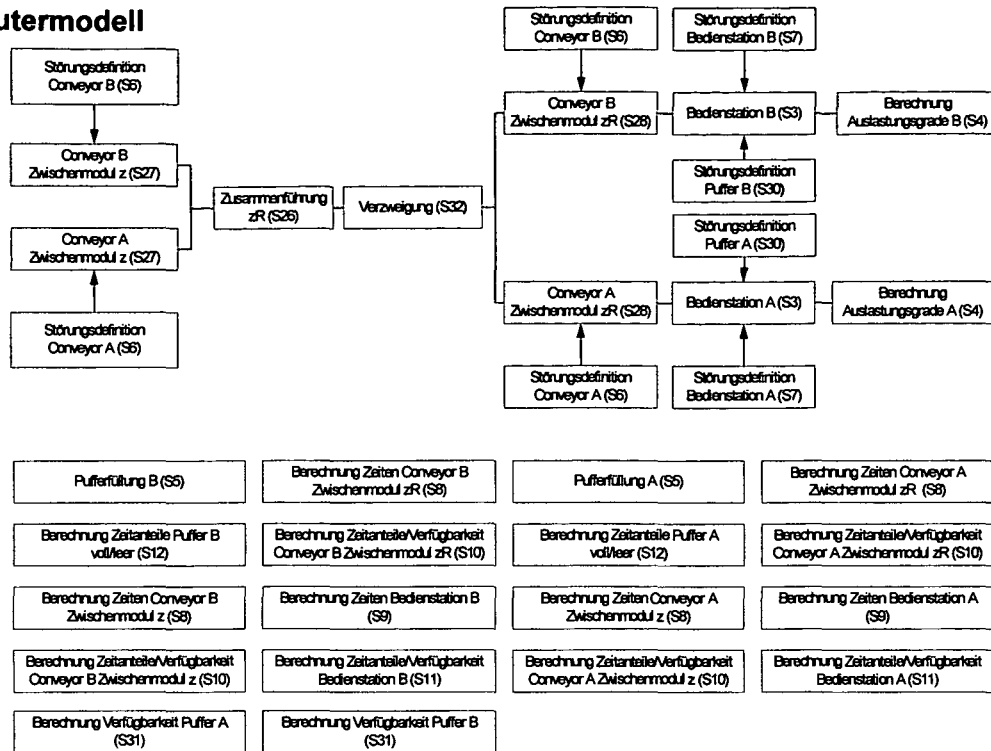


Abbildung 113: Computermodell vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung-Verzweigung

## Eingabeparameter

**Zwischenmodul Zus. Verz.**

Bezeichnung:

Bezeichnung B:

Vorgaengerelement B:

Techn Durchsatz TS1 B:

TBF TS1 B:

TTR TS1 B:

Bezeichnung A:

Vorgaengerelement A:

Techn Durchsatz TS1 A:

TBF TS1 A:

TTR TS1 A:

Zeitdauer Einschleusvorgang:

Anzahl B:

Anzahl A:

Element B...

Element A...

Berechnungsintervall:

Nachfolgeelement B:

Nachfolgeelement A:

OK Cancel Help

Abbildung 114: Dialogbox vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung-Verzweigung

**Element A**

Techn Durchsatz TS2 A:

TBF TS2 A:

TTR TS2 A:

Pufferkapazität A:

Pufferinhalt A:

Warteschlangendisziplin A:

TBF Puffer A:

TTR Puffer A:

Bediendauer A:

TBF BS A:

TTR BS A:

OK Cancel Help

**Element B**

Techn Durchsatz TS2 B:

TBF TS2 B:

TTR TS2 B:

Pufferkapazität B:

Pufferinhalt B:

Warteschlangendisziplin B:

TBF Puffer B:

TTR Puffer B:

Bediendauer B:

TBF BS B:

TTR BS B:

OK Cancel Help

Abbildung 115: Dialogboxen Untermenü Element A und Element B – vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung-Verzweigung

Animationselemente siehe vereinfachter Zwischenmodul Zusammenführung kR

### 7.3.13 Vereinfachter Senkenmodul

Modellkonzept, Computermode, Eingabeparameter wie bei Senkenmodul Bibliothek A

Animationselemente

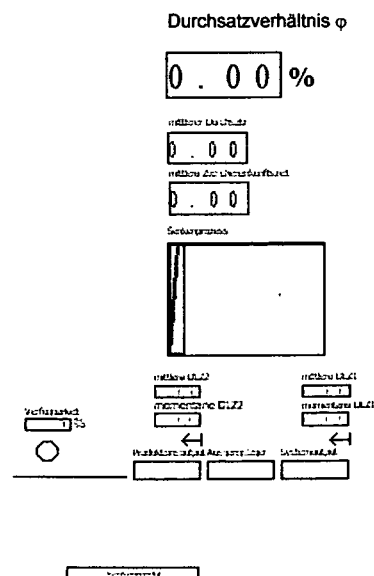


Abbildung 116: Animationselemente vereinfachter Senkenmodul



## 7.3.14 Vereinfachter Senkenmodul mit Zusammenführung

### Modellkonzept

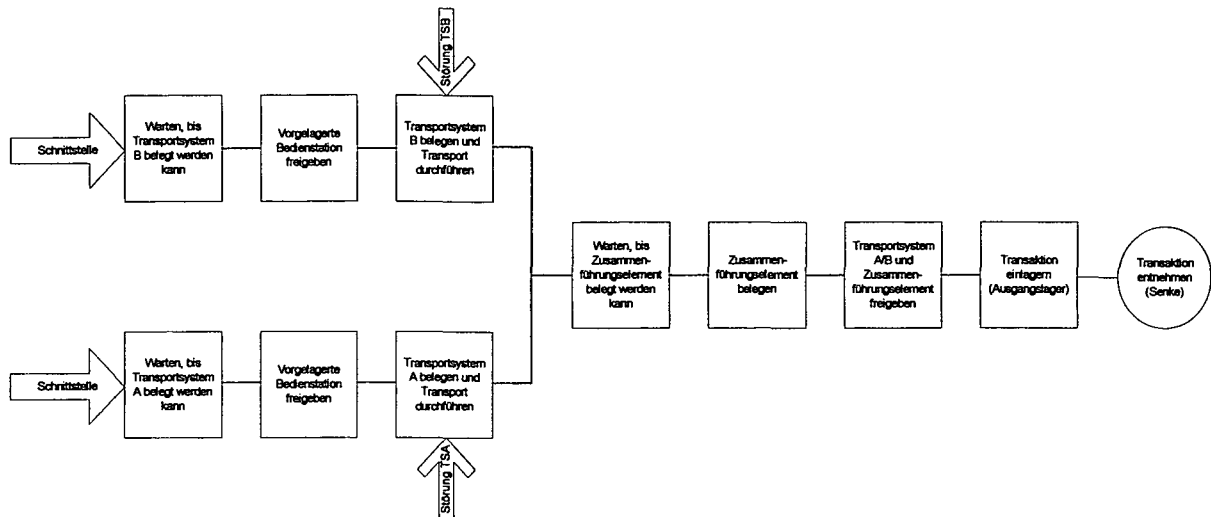


Abbildung 117: Modellkonzept vereinfachter Senkenmodul Zusammenführung

### Computermodell

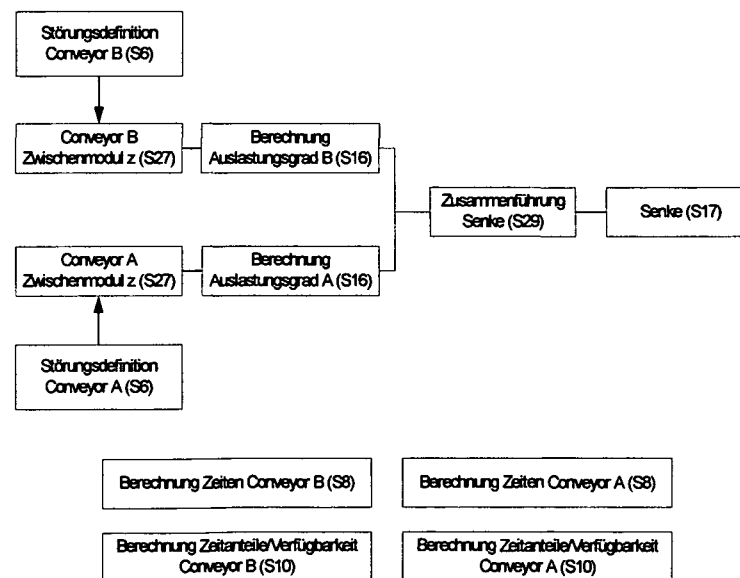


Abbildung 118: Computermodell vereinfachter Senkenmodul Zusammenführung

## Eingabeparameter

**Senkenmodul Zus.**

Bezeichnung:

Bezeichnung B:

Vorgaengerelement B:

Techn Durchsatz TS B:

TBF TS B:

TTR TS B:

Bezeichnung A:

Vorgaengerelement A:

Techn Durchsatz TS A:

TBF TS A:

TTR TS A:

Zeitdauer Einschleusvorgang:

Entnahmeintervall:

Berechnungsintervall:

DLZ Quellenmodul:

OK Cancel Help

Abbildung 119: Dialogbox vereinfachter Senkenmodul Zusammenführung

## Animationselemente

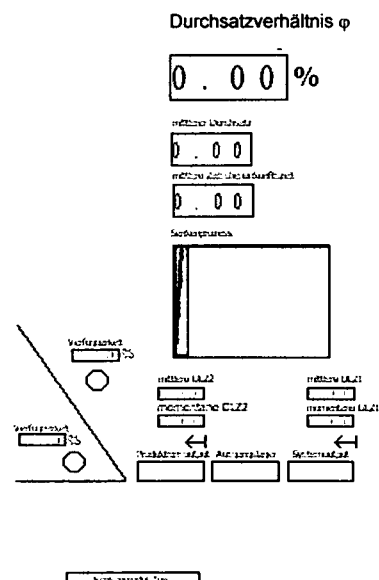


Abbildung 120: Animationselemente vereinfachter Senkenmodul Zusammenführung

## 7.4 Einplanung von Störungen

### 7.4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie Störungen von Bedienstationen und Transportmitteln, sowie von Puffern, im Simulationssystem SIMAN/ARENA eingeplant wurden.

Im Wesentlichen wird eine Störung durch ein „Störungsentity“ hervorgerufen. Dieses wartet eine gewisse Zeitspanne (störungsfreie Zeit TBF) ab, bis es die Bedienstation, bzw. das Transportmittel abschaltet. Das „Störungsentity“ wartet dann die für die Reparatur vorgesehene Zeitspanne (Stördauer TTR) ab und setzt die entsprechende Anlagenkomponente wieder in Betrieb.

Der Ausfall eines Puffers wird ebenfalls durch ein „Störungsentity“ verursacht. Nach einer störungsfreien Zeit TBF werden alle Fördereinheiten aus dem Puffer entnommen und simulationstechnisch zwischengelagert. Der vorgelagerte Conveyor wird blockiert. Es liegt somit eine Störung des Puffers vor, da der Conveyor nicht mehr fördert und die nachfolgende Bedienstation keine Fördereinheiten mehr bedienen kann, da der Puffer leer ist. Nach erfolgter Reparatur werden die zuvor entnommenen Fördereinheiten wieder in den Puffer verschoben und der Conveyor wieder freigegeben.

Das Prinzip der Störungseinplanung in SIMAN/ARENA soll am Beispiel von Bedienstationen verdeutlicht werden. Zunächst erfolgt die Störungsfestlegung eines einzelnen Bedienelements und daran anschließend von zwei parallel geschalteten Elementen, die völlig unabhängig voneinander arbeiten. Schließlich wird das Ausfallverhalten zweier Element in kalter und warmer Redundanz betrachtet.

Um die Darstellung zu verdeutlichen, wurden für die störungsfreie Zeit TBF und die Stördauer TTR keine stochastischen, sondern konstante Werte angenommen (mittlere störungsfreie Zeit MTBF und mittlere Stördauer MTTR). Die Werte wurden so gewählt, dass das Ausfallverhalten der Elemente aus den Abbildungen klar hervorgeht. Diese Werte werden normalerweise in Wirklichkeit nicht vorkommen.

### 7.4.2 Störungen eines Elements

Nach einer gewissen störungsfreien Zeit (hier 20 Zeiteinheiten) wird das Element außer Funktion gesetzt. Nach erfolgter Reparatur (hier 6 Zeiteinheiten) beginnt das Element wieder zu arbeiten.

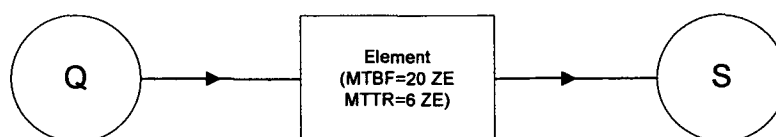


Abbildung 121: Störungsfestlegung eines Elements

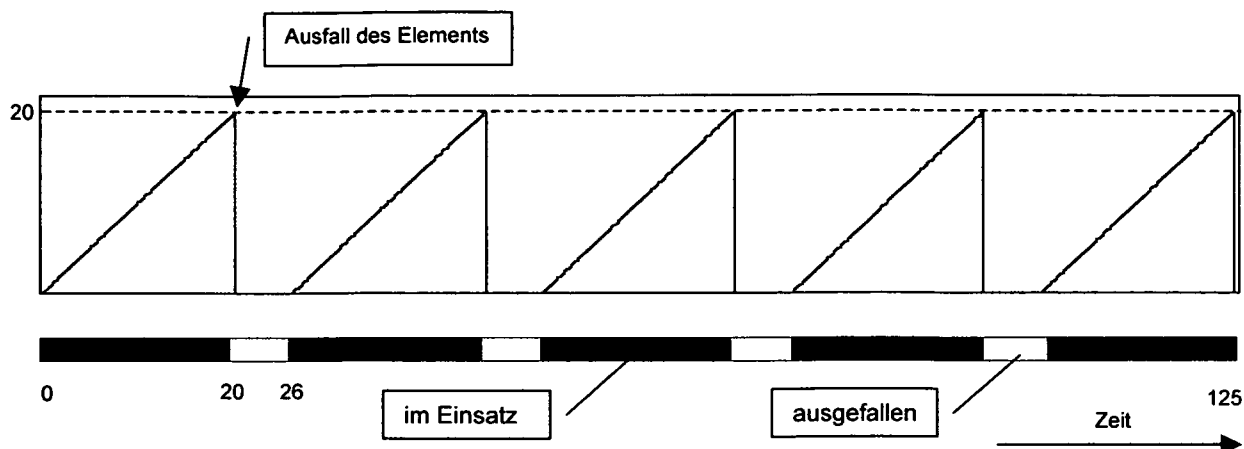


Abbildung 122: Störungsverhalten eines Einzelements

### 7.4.3 Störungen zweier parallel geschalteter Elemente

Im ungestörten Zustand wird der Förderstrom den beiden Elementen abwechselnd zugeteilt (die Anzahl der Fördereinheiten, die abwechselnd Element A und B zugeteilt werden, wird im Dialogfenster des Moduls eingegeben). Fällt ein Element aus, arbeitet das zweite wie bisher weiter, wobei dieses alle Fördereinheiten übernimmt.

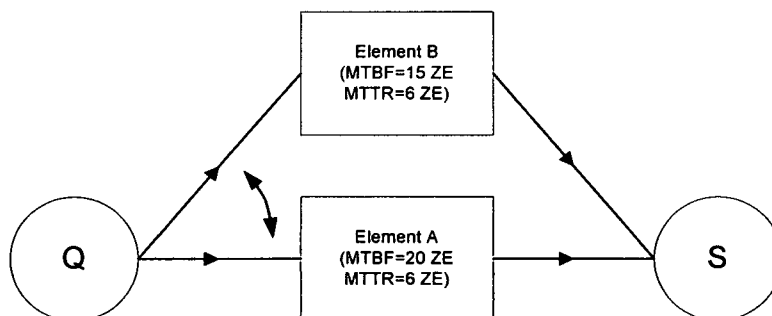


Abbildung 123: Störungsfestlegung zweier parallel geschalteter Elemente

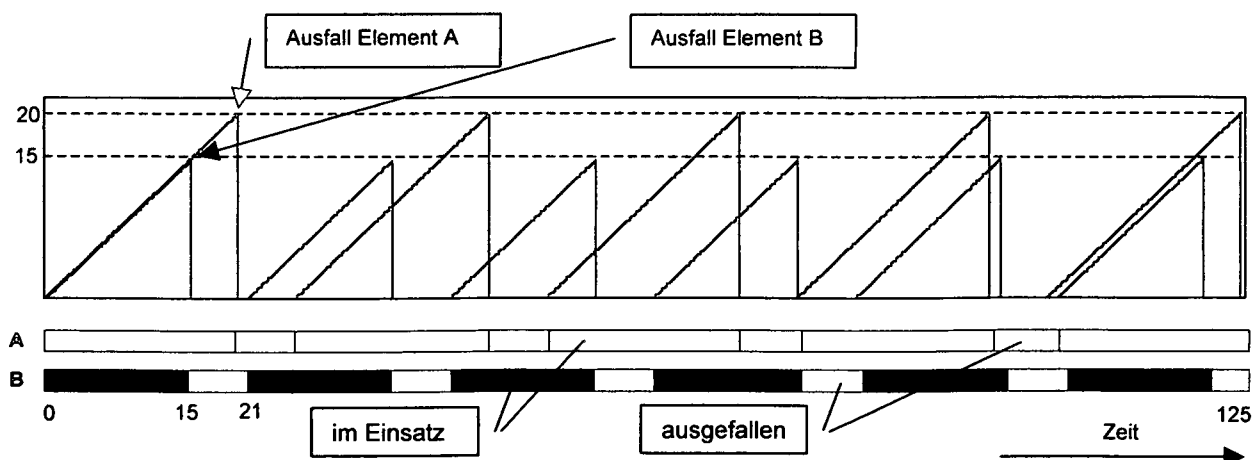


Abbildung 124: Störungsverhalten zweier parallel geschalteter Elemente

## 7.4.4 Störungen zweier Elemente in kalter Redundanz mit Rückschaltbetrieb

Fällt Element A aus (hier nach 20 Zeiteinheiten), dann übernimmt Element B. Nach Reparatur von Element A (hier nach 6 Zeiteinheiten) wird wieder auf dieses zurückgeschaltet. Der Puffer von Element B wird parallel dazu leer gefahren. Die Anlage ist erst dann nicht mehr verfügbar, wenn auch das Redundanzelement B ausfällt. Nach erfolgter Reparatur dieses Elements wird es ebenfalls leer gefahren.

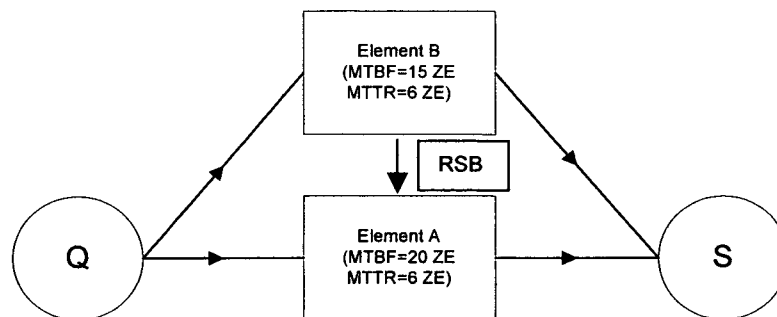


Abbildung 125: Störungsfestlegung zweier Elemente in kalter Redundanz - RSB

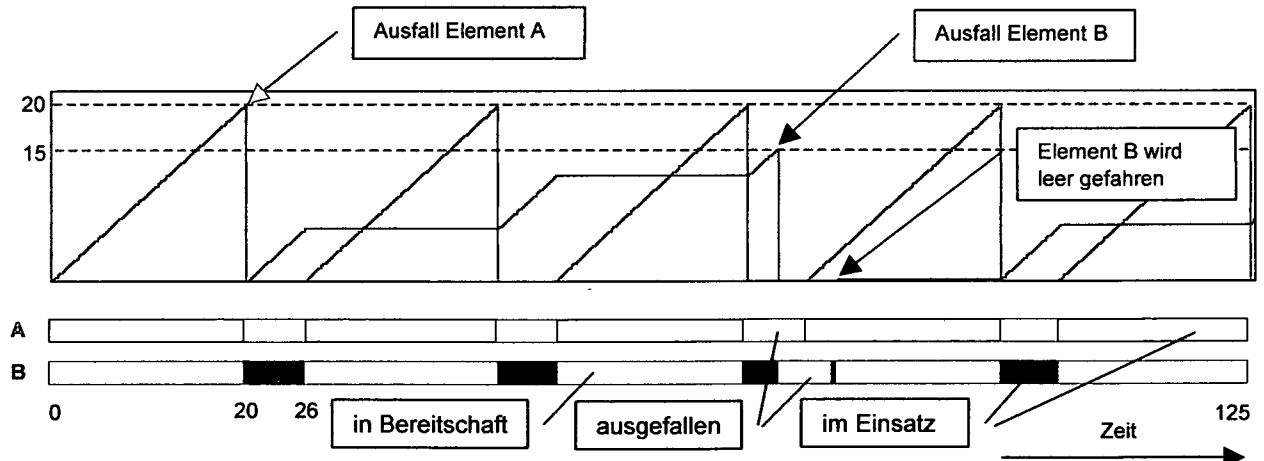


Abbildung 126: Störungsverhalten zweier Elemente in kalter Redundanz - RSB

### 7.4.5 Störungen zweier Elemente in kalter Redundanz mit Umschaltbetrieb

Fällt Element A aus (hier nach 20 Zeiteinheiten), dann übernimmt Element B. Nach Reparatur von Element A (hier nach 6 Zeiteinheiten) wird dieses leer gefahren. Element B arbeitet aber wie bisher weiter. Fällt schließlich Element B aus, dann wird wieder auf Element A umgeschaltet. Nach erfolgter Reparatur von Element B (hier ebenfalls nach 6 Zeiteinheiten) wird dieses ebenfalls leer gefahren.

Die Anlage ist erst dann nicht verfügbar, wenn beide Elemente ausgefallen sind.

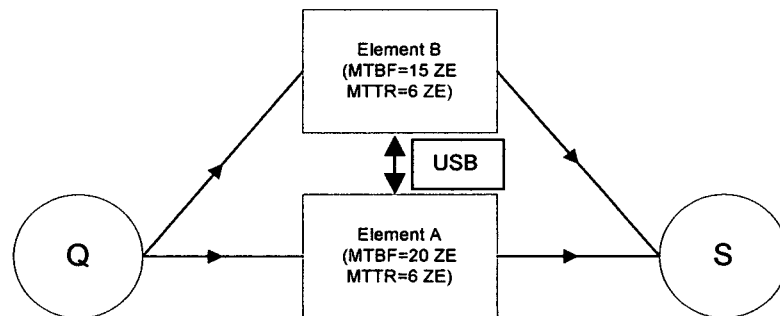


Abbildung 127: Störungfestlegung zweier Elemente in kalter Redundanz - USB

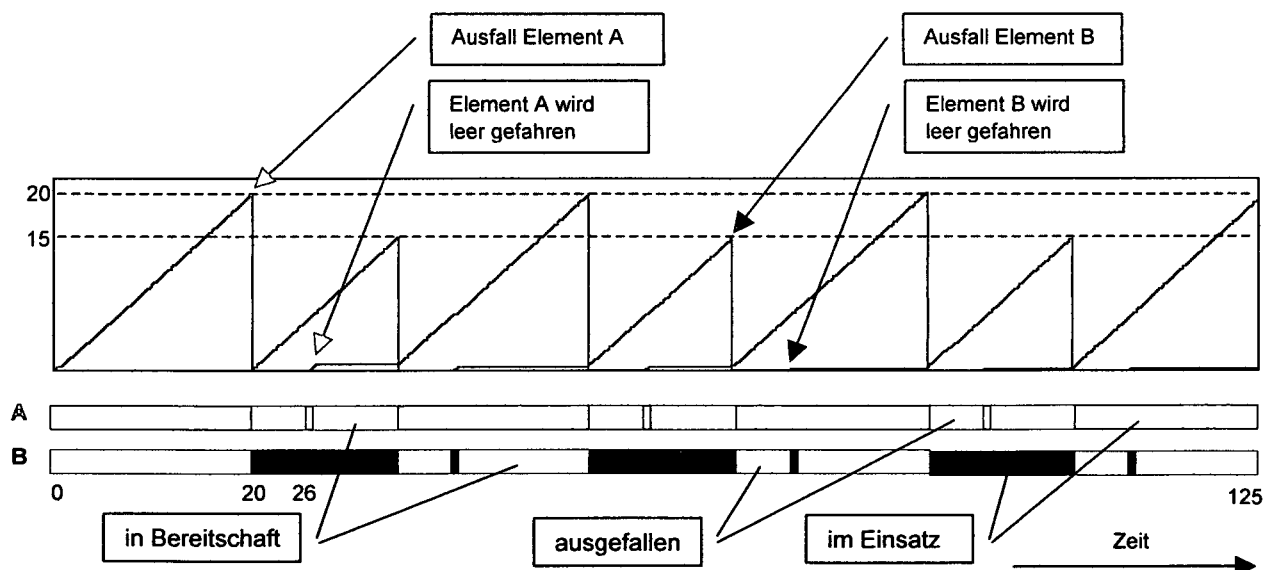


Abbildung 128: Störungsverhalten zweier Elemente in kalter Redundanz - USB

### 7.4.6 Störungen zweier Elemente in warmer Redundanz

Im Normalbetrieb arbeiten beide Elemente unter Teillast. Fällt ein Element aus, übernimmt das andere und arbeitet unter Volllast. Unter Volllast ist mit einer höheren Ausfallrate zu rechnen als im Teillastbetrieb, d.h. dass das unter Volllast arbeitende Element früher ausfällt als im Teillastbetrieb.

Um das Ausfallverhalten deutlicher darstellen zu können, wurden Elemente mit unterschiedlichen störungsfreien Zeiten für Teillast- und Volllastbetrieb gewählt (normalerweise werden MTBF\_VL und MTBF\_TL bei beiden Elementen gleich groß sein).

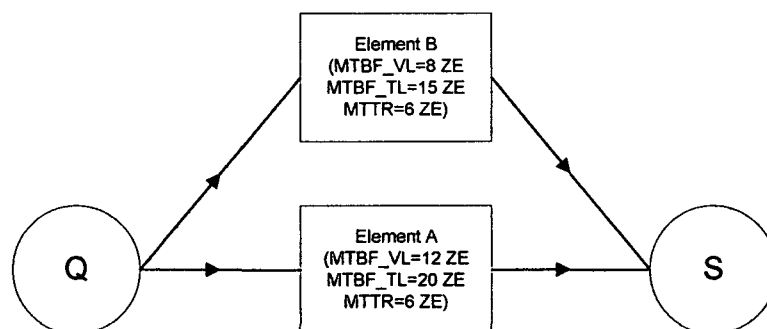


Abbildung 129: Störungselementfestlegung zweier Elemente in warmer Redundanz

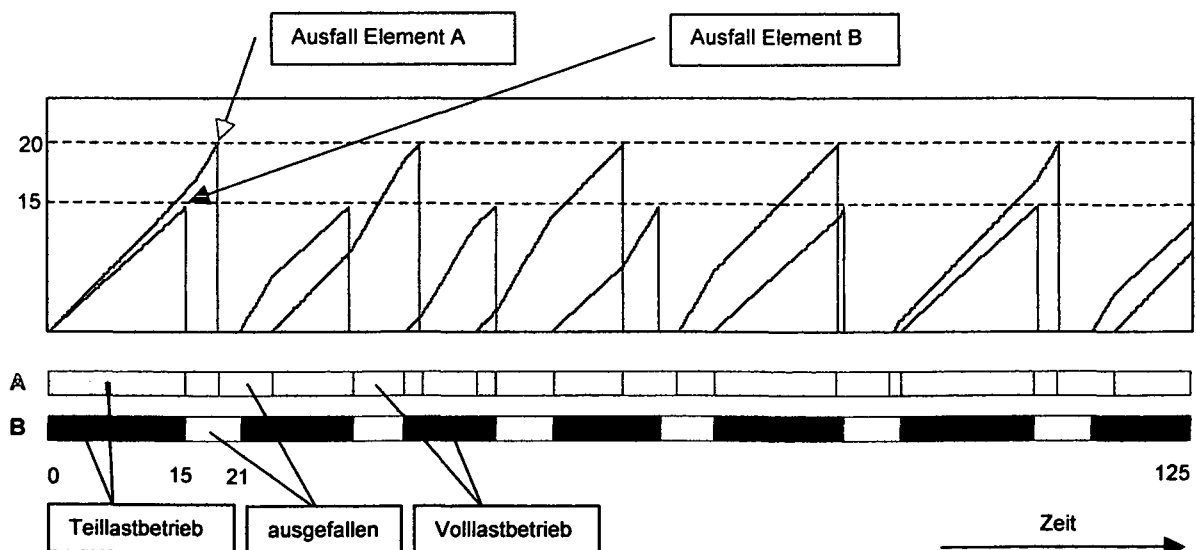


Abbildung 130: Störungsverhalten zweier Elemente in warmer Redundanz

Um das Störungsverhalten zweier Elemente in warmer Redundanz simulationstechnisch nachbilden zu können, muss bekannt sein, bei welcher Belastung welche störungsfreie Zeit zu erwarten ist. Es müssen also sowohl die Art der Verteilungsfunktion, als auch die entsprechenden Parameter eingegeben werden (z.B. Art der Verteilungsfunktion: Exponential; Parameter: mittlere störungsfreie Zeit MTBF).

Die nachfolgende Abbildung zeigt, wann es bei kombiniertem Voll- und Teillastbetrieb zu einem Ausfall kommt (siehe Resultierende aus zeitweiligem Voll- und Teillastbetrieb).

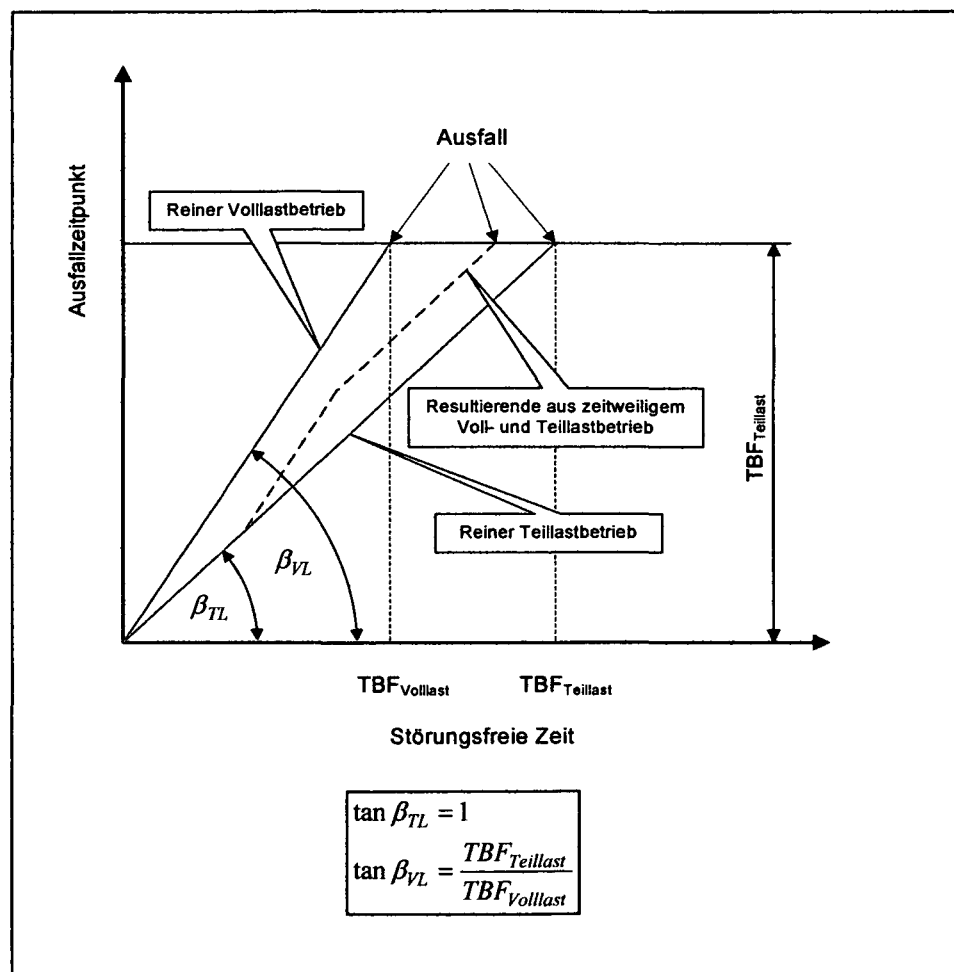


Abbildung 131: Ausfallverhalten einer warmen Redundanzschaltung



## 8 Validation der Simulationsmodule

### 8.1 Allgemeines

Um zu überprüfen, ob die entwickelten Module eine ausreichend gute Abbildung der Realität darstellen, werden die Simulationsergebnisse den Ergebnissen analytischer Verfahren gegenübergestellt.

Zunächst erfolgt die Validation von Einzelementen und Redundanzschaltungen. Schließlich wird das Systemverhalten von verketteten Elementen untersucht.

### 8.2 Validation von Einzelementen

#### 8.2.1 Validation von Einzelementen ohne Störungen

Hierbei werden die Simulationsergebnisse den Ergebnissen der Warteschlangentheorie gegenübergestellt.

Es wurden insgesamt fünf verschiedene Warteschlangenmodelle bei Variation des Auslastungsgrades untersucht. Dabei kamen Quellenmodul und Senkenmodul aus Bibliothek A zur Anwendung. Die entsprechenden Eingabeparameter sind in der nachfolgenden Tabelle angeführt.

Techn Durchsatz TS	1000000	Stk/ZE	es soll kein Transport stattfinden, deshalb Wert für den Durchsatz sehr groß gewählt (d.h. Transportdauer vernachlässigbar kurz)
TBF TS	1000000	ZE	keine Störungen des Transportmittels, deshalb Wert sehr groß gewählt
TTR TS	1	ZE	Wert beliebig, da es innerhalb des Betrachtungszeitraumes keine Störungen gibt
Pufferkapazität	1000000	Stk	die Pufferkapazität soll unbeschränkt sein, deshalb sehr großer Wert gewählt
TBF BS	1000000	ZE	keine Störungen der Bedienstation, deshalb Wert sehr groß gewählt
TTR BS	1	ZE	Wert beliebig, da es innerhalb des Betrachtungszeitraumes keine Störungen gibt
Simulationslänge	100000	ZE	im Vergleich zu den Zwischenankunfts- und Bedienzeiten entsprechend lange gewählt

Tabelle 14: Eingabeparameter für Warteschlangenmodelle

Die Zwischenankunftszeiten vor der Bedienstation sowie die Bedienzeiten können aus den nachfolgenden Tabellen entnommen werden.

**M|M|1 - Warteschlangenmodell**

M M 1 (Systemvariabilität $f_v = 0$ )		
Auslastungsgrad $\rho$	Ankunftsprozess	Bedienprozess
0,2	EXPO(5)	EXPO(1)
0,4	EXPO(2,5)	EXPO(1)
0,6	EXPO(1,666)	EXPO(1)
0,8	EXPO(1,25)	EXPO(1)
0,9	EXPO(1,111)	EXPO(1)
0,95	EXPO(1,05)	EXPO(1)

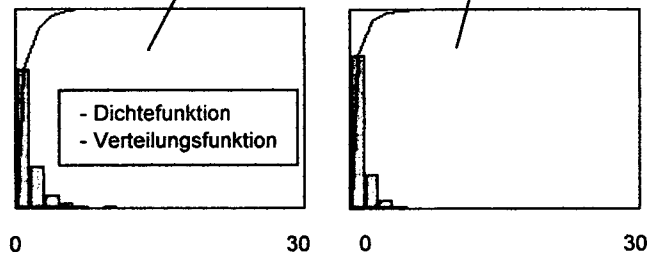


Tabelle 15: Eingabeparameter M|M|1 - Warteschlangenmodell

**M|Ek|1 - Warteschlangenmodell**

M Ek 1 (Systemvariabilität $f_v = 0,25$ )		
Auslastungsgrad $\rho$	Ankunftsprozess	Bedienprozess
0,2	EXPO(30)	ERLA(3,2)
0,4	EXPO(15)	ERLA(3,2)
0,6	EXPO(10)	ERLA(3,2)
0,8	EXPO(7,5)	ERLA(3,2)
0,9	EXPO(6,666)	ERLA(3,2)
0,95	EXPO(6,316)	ERLA(3,2)

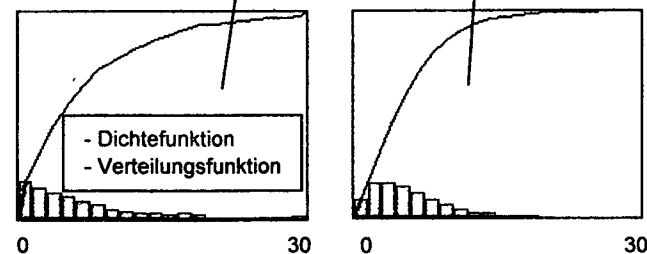


Tabelle 16: Eingabeparameter M|Ek|1 - Warteschlangenmodell

## M|D|1 - Warteschlangenmodell

M D 1 (Systemvariabilität $f_v = 0,5$ )		
Auslastungsgrad $\rho$	Ankunftsprozess	Bedienprozess
0,2	EXPO(5)	1
0,4	EXPO(2,5)	1
0,6	EXPO(1,666)	1
0,8	EXPO(1,25)	1
0,9	EXPO(1,111)	1
0,95	EXPO(1,05)	1

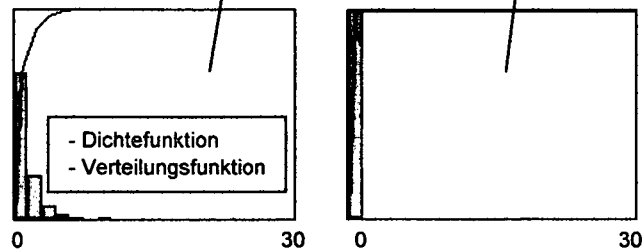


Tabelle 17: Eingabeparameter M|D|1 - Warteschlangenmodell

## G|G|1 – Warteschlangenmodell

G G 1 (Systemvariabilität $f_v = 0,75$ )		
Auslastungsgrad $\rho$	Ankunftsprozess	Bedienprozess
0,2	ERLA(0,505;4)	BETA(1,5;2,21)
0,4	ERLA(0,253;4)	BETA(1,5;2,21)
0,6	ERLA(0,168;4)	BETA(1,5;2,21)
0,8	ERLA(0,126;4)	BETA(1,5;2,21)
0,9	ERLA(0,112;4)	BETA(1,5;2,21)
0,95	ERLA(0,106;4)	BETA(1,5;2,21)

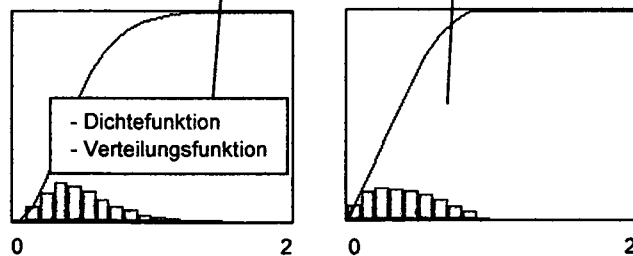


Tabelle 18: Eingabeparameter G|G|1 - Warteschlangenmodell

## D|D|1 – Warteschlangenmodell

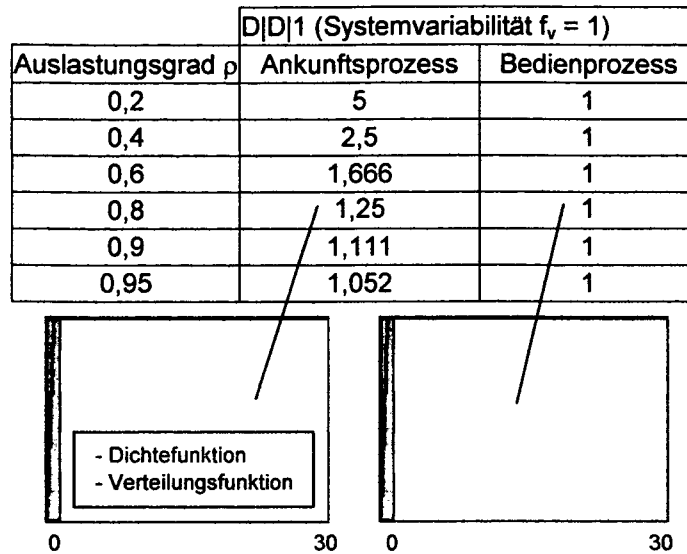


Tabelle 19: Eingabeparameter D|D|1 - Warteschlangenmodell

In den nachfolgenden Diagrammen werden die Simulationsergebnisse (Mittelwerte aus jeweils 5 Simulationsläufen) den Ergebnisse der Warteschlangentheorie gegenübergestellt.

In Abbildung 132 ist die mittlere Warteschlangenlänge in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad für die verschiedenen Warteschlangenmodelle dargestellt.

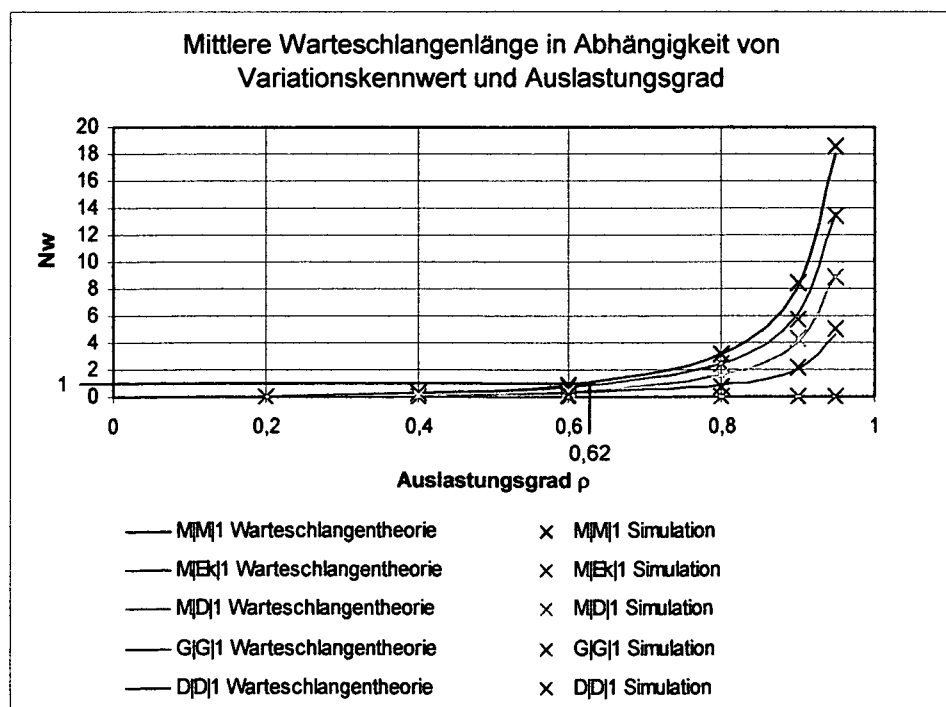


Abbildung 132: Gegenüberstellung Simulation – Warteschlangentheorie, Diagramm 1

In der nachfolgenden Abbildung ist die mittlere Warteschlangenlänge in Abhängigkeit vom Variationskennwert  $f_v$  für die verschiedenen Auslastungsgrade  $\rho$  dargestellt.

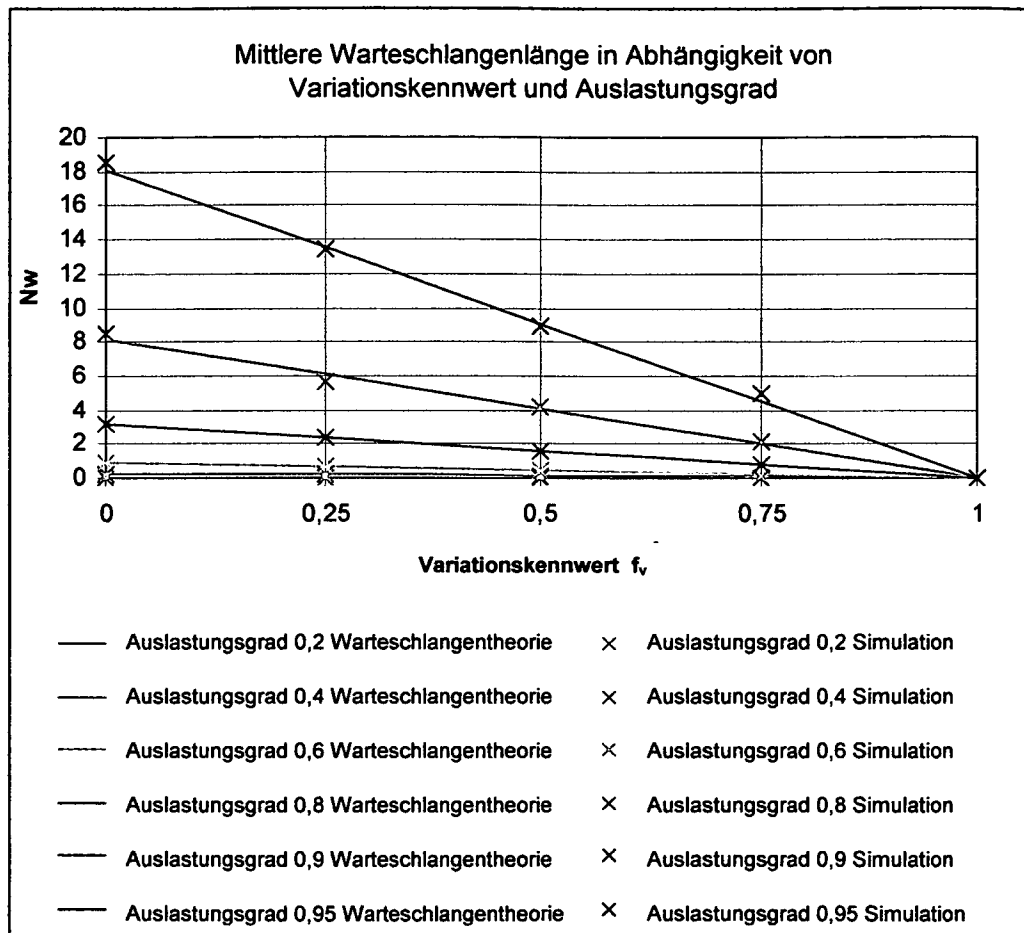


Abbildung 133: Gegenüberstellung Simulation – Warteschlangentheorie, Diagramm 2

Daraus lassen sich in Anlehnung an [17] folgende Aussagen ableiten:

- Die mittlere Warteschlangenlänge ist eine Funktion des Auslastungsgrades  $\rho$  und des Variationskennwertes  $f_v$ .
- Der Einfluss des Auslastungsgrades überwiegt.
- Die Staueffekte steigen überproportional mit dem Auslastungsgrad und linear mit dem Variationskennwert.
- Bei Auslastungsgraden kleiner 0,62 ist die mittlere Warteschlangenlänge, unabhängig vom Variationskennwert, kleiner als 1 (Ergebnisse für M|M|1 in Abbildung 132 stellen den ungünstigsten Fall dar, vgl. M|M|1-Modell auf Seite 12).
- Die Näherungslösung von Gudehus für allgemeine Verteilungen liefert gute Ergebnisse.
- Es sind keine signifikanten Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den Ergebnissen der Warteschlangentheorie feststellbar.

## 8.2.2 Validation von Einzelementen mit Störungen

Um zu überprüfen, ob das Ausfallverhalten der Puffer, Transportmittel und Bedienstationen durch die Simulationsmodule richtig nachgebildet wird, erfolgt ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den theoretischen Verfügbarkeitskennwerten.

Die Simulationenläufe erfolgen bei deterministischem Ankunfts-, Transport- bzw. Bedienprozess mit Auslastungsgraden von jeweils 100%. Für die störungsfreien Zeiten und die Reparaturzeiten werden jeweils Exponentialverteilungen angesetzt. Als Ergebnis erhält man das Durchsatzverhältnis  $\varphi$  der Anlage, welches der Verfügbarkeit  $\eta$  entspricht. Es kommen jeweils ein Quellenmodul und ein Senkenmodul aus Bibliothek A zur Anwendung, wobei nicht benötigte Komponenten durch entsprechende Parametereingaben unwirksam gemacht werden.

**Hinweis:** Wie bereits erwähnt besteht aus materialflusstechnischer Sicht zwischen einem Transportmittel- und einer Bedienstation kein Unterschied. Im Simulationssystem Arena werden diese allerdings, was das Einplanen von Störungen und die Animationselemente anbelangt, unterschiedlich behandelt. Deshalb müssen diese auch getrennt voneinander validiert werden.

### Ausfallverhalten der Bedienstation:

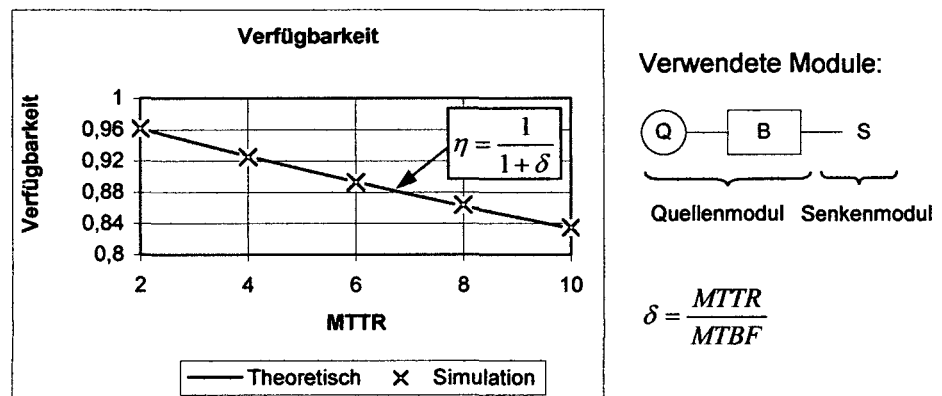


Abbildung 134: Störung der Bedienstation (MTBF=50 – Exponentialverteilung)

### Ausfallverhalten des Transportmittels:

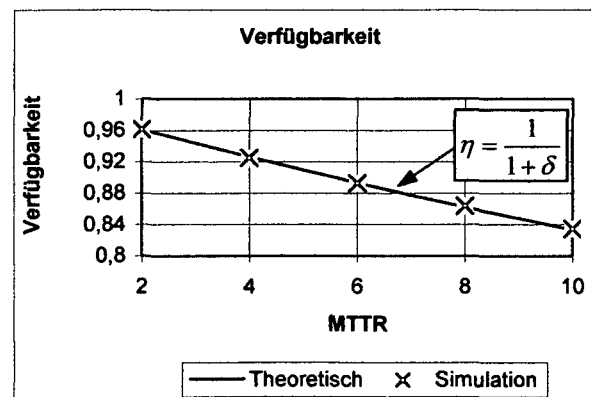


Abbildung 135: Störung des Transportmittels (MTBF=50 – Exponentialverteilung)

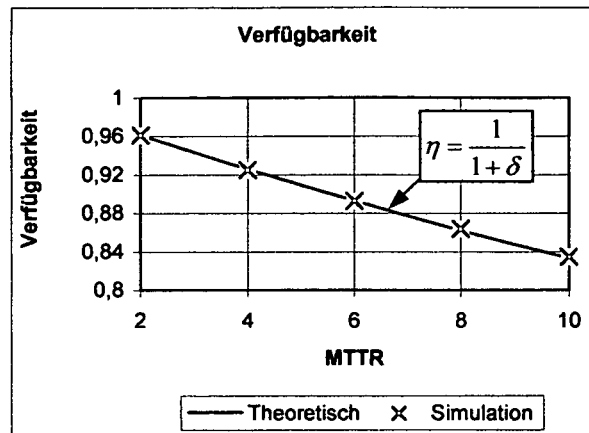
Ausfallverhalten des Puffers:

Abbildung 136: Störung des Puffers (MTBF=50 – Exponentialverteilung)

## 8.3 Validation von Redundanzschaltungen

### 8.3.1 Kalte Redundanz - Rückschaltbetrieb

Es wurde die Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in kalter Redundanz mit Rückschaltbetrieb untersucht. Dabei wurde MTBF=50 h gewählt und MTTR variiert, wobei jeweils Exponentialfunktionen angesetzt wurden.

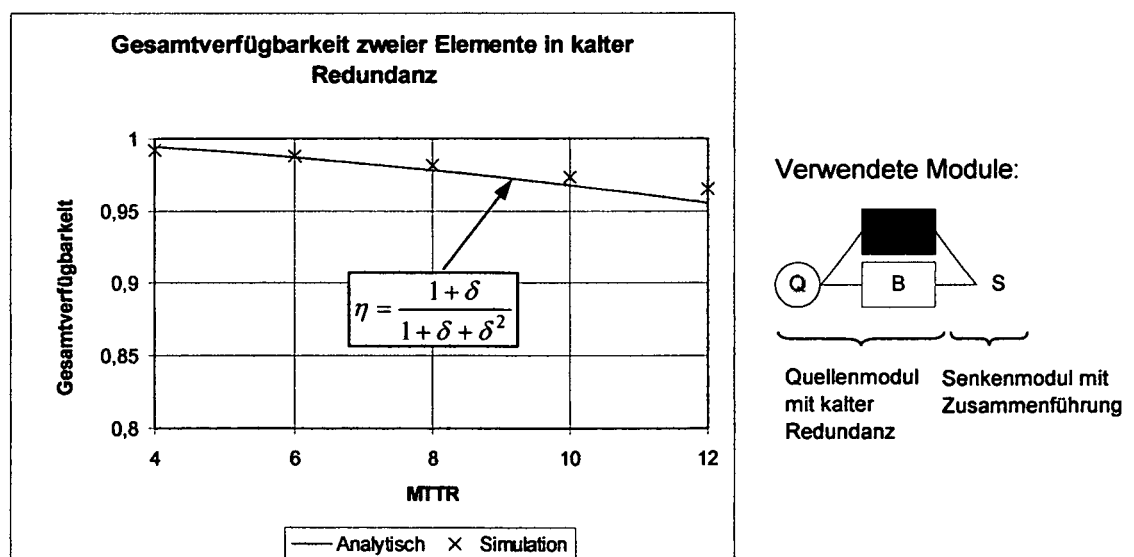


Abbildung 137: Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in kalter Redundanz

### 8.3.2 Warme Redundanz

Es wurde die Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in warmer Redundanz untersucht. Dabei wurde  $MTBF\_Volllast=50$  h und  $MTBF\_Teillast=150$  h gewählt und  $MTTR$  variiert, wobei jeweils Exponentialfunktionen angesetzt wurden.

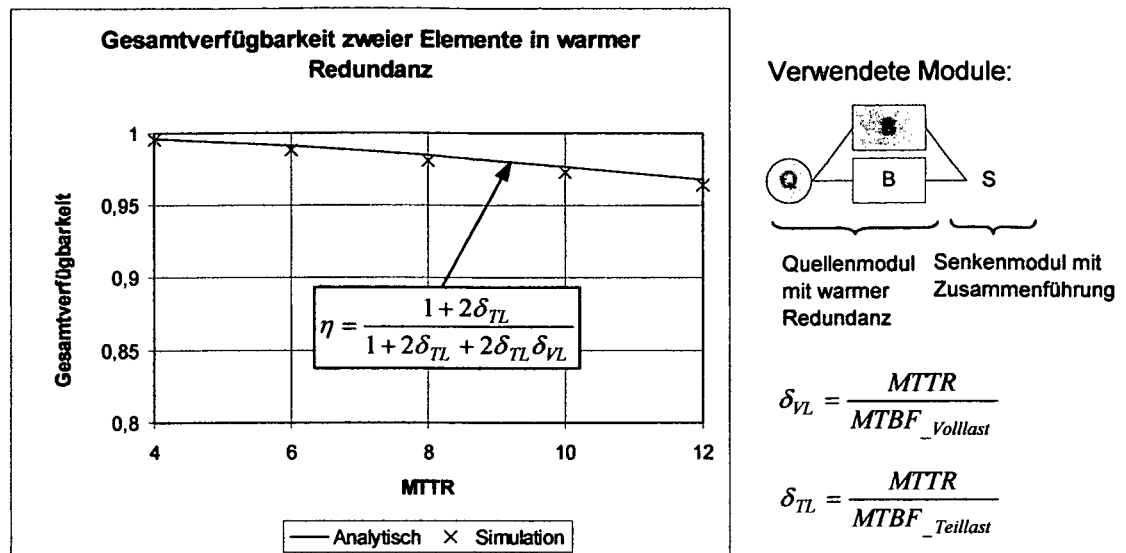


Abbildung 138: Gesamtverfügbarkeit zweier Elemente in warmer Redundanz

## 8.4 Validation von verketteten Elementen

### 8.4.1 Allgemeines

Um sicher zu stellen, dass die entwickelten Module fehlerfrei interagieren, werden Reihenschaltungen von jeweils 6 störungsbehafteten Elementen in unterschiedlichen Konfigurationen (mit und ohne Puffer, mit und ohne Redundanz) bei konstantem Förderstrom betrachtet.

Bei allen Untersuchungen wird ein Solldurchsatz von 100 Stk/h gefordert. Für die unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen kann der entsprechende technische Durchsatz der einzelnen Komponenten analytisch bestimmt werden (siehe Kapitel 4). Dieser wird den Elementen im Simulationsmodell zugewiesen. Durch Simulationsläufe kann dann überprüft werden, ob sich der geforderte Solldurchsatz von 100 Stk/h auch wirklich einstellt.

Dabei werden in der Simulation für die störungsfreien Zeiten und Reparaturzeiten jeweils Exponentialverteilungen angesetzt (Zeiteinheit Minuten). Je Anlagenkonfiguration werden 5 Simulationsläufe durchgeführt und daraus die 95% Konfidenzintervalle des Durchsatzes berechnet.



## 8.4.2 Reihenschaltung von 6 Elementen ohne Puffer und ohne Redundanz (Simulationsexperiment 1)

### Anlagenkonfiguration



Abbildung 139: 6 Elemente ohne Puffer und ohne Redundanz

mit den Verfügbarkeiten:  $\eta_1 = 0,9 / \eta_2 = 0,95 / \eta_3 = 0,93 / \eta_4 = 0,85 / \eta_5 = 0,97 / \eta_6 = 0,95$

### Analytische Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes

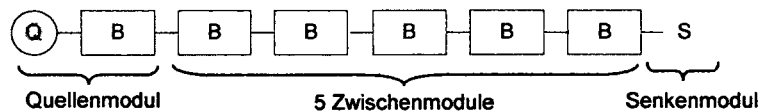
$$\phi_{soll} = 100 \text{ Stk/h}$$

$$\eta_{ges} = \prod_{i=1}^6 \eta_i = 0,6228$$

$$\phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0,6228} = 160,6 \text{ Stk/h}$$

### Überprüfung mittels Simulation mit den folgenden Eingabeparametern

Verwendete Module:



Störungsdefinition:

Element	Verfügbarkeit	MTBF	MTTR
1	0,9	270	30
2	0,95	570	30
3	0,93	398,6	30
4	0,85	170	30
5	0,97	970	30
6	0,95	570	30

Tabelle 20: MTBF und MTTR Simulationsexperiment 1

Prozesszeiten:

$$t = \frac{1}{\frac{\phi_{tech}}{60}} = \frac{60}{160,6} = 0,374 \text{ min}$$

Simulationslänge:

$$T = 100000 \text{ min}$$

Simulationsläufe:

$$5$$

Simulationsergebnisse:

Mittlerer Durchsatz

$$\bar{\phi} = 107,9 \text{ Stk/h} \quad (\phi_{soll} = 100 \text{ Stk/h})$$

Standardabweichung

$$s = 1,8 \text{ Stk/h}$$

95% Konfidenzintervall

$$105,4 \text{ Stk/h} < \phi < 110,4 \text{ Stk/h}$$

### 8.4.3 Reihenschaltung von 6 Elementen ohne Puffer mit kaltem Redundanzelement (Simulationsexperiment 2)

#### Anlagenkonfiguration

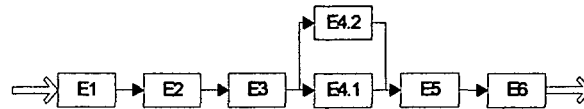


Abbildung 140: 6 Elemente ohne Puffer mit kaltem Redundanzelement

mit den Verfügbarkeiten:  $\eta_1 = 0,9 / \eta_2 = 0,95 / \eta_3 = 0,93 / \eta_{4.1} = \eta_{4.2} = 0,85 / \eta_5 = 0,97 / \eta_6 = 0,95$

#### Analytische Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes

$$\phi_{soll} = 100 \text{ Stk/h}$$

$$\eta_{4.1} = \eta_{4.2} = \frac{1}{1 + \delta_4} = 0,85 \Rightarrow \delta_4 = 0,177 \quad \text{mit} \quad \delta_4 = \frac{\alpha_4}{\beta_4}$$

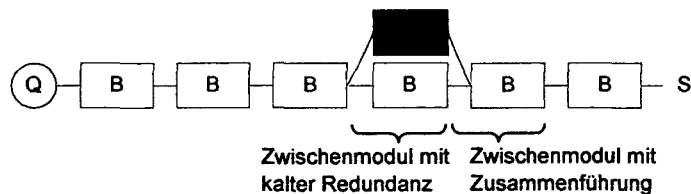
$$\eta_4 = \frac{1 + \delta_4}{1 + \delta_4 + \delta_4^2} = 0,974$$

$$\eta_{ges} = \prod_{i=1}^6 \eta_i = 0,714$$

$$\phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0,714} = 140,1 \text{ Stk/h}$$

#### Überprüfung mittels Simulation mit den folgenden Eingabeparametern

Verwendete Module:



Störungsdefinition:

Element	Verfügbarkeit	MTBF	MTTR
1	0,9	270	30
2	0,95	570	30
3	0,93	398,6	30
4.1	0,85	170	30
4.2	0,85	170	30
5	0,97	970	30
6	0,95	570	30

Tabelle 21: MTTR und MTBF Simulationsexperiment 2

Prozesszeiten:

$$t = \frac{1}{\frac{\phi_{tech}}{60}} = \frac{60}{140,1} = 0,428 \text{ min}$$

Simulationslänge:

$$T = 100000 \text{ min}$$

Simulationsläufe:	5	
Simulationsergebnisse:	Mittlerer Durchsatz	$\bar{\phi} = 105,6 \text{ Stk/h}$ ( $\phi_{soll} = 100 \text{ Stk/h}$ )
	Standardabweichung	$s = 1,3 \text{ Stk/h}$
	95% Konfidenzintervall	$103,9 \text{ Stk/h} < \phi < 107,4 \text{ Stk/h}$

#### 8.4.4 Reihenschaltung von 6 Elementen ohne Puffer mit warmem Redundanzelement (Simulationsexperiment 3)

##### Anlagenkonfiguration

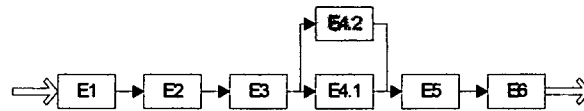


Abbildung 141: 6 Elemente ohne Puffer mit warmem Redundanzelement

mit den Verfügbarkeiten:

$$\eta_1 = 0,9 / \eta_2 = 0,95 / \eta_3 = 0,93 / \eta_5 = 0,97 / \eta_6 = 0,95$$

$$\alpha_{4.1Volllast} = \alpha_{4.2Volllast} = 0,00588 / \alpha_{4.1Halblast} = \alpha_{4.2Halblast} = 0,00196 / \beta_{4.1} = \beta_{4.2} = 0,033$$

##### Analytische Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes

$$\phi_{soll} = 100 \text{ Stk/h}$$

$$\alpha_I = 2 \cdot \alpha_{4Halblast}$$

$$\alpha_{II} = \alpha_{4Volllast}$$

$$\delta_{4Halblast} = \frac{\alpha_{4Halblast}}{\beta_4}$$

$$\delta_{4Volllast} = \frac{\alpha_{4Volllast}}{\beta_4}$$

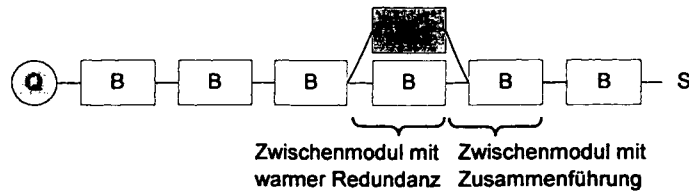
$$\eta_4 = \frac{1 + \frac{\alpha_I}{\beta_4}}{1 + \frac{\alpha_I}{\beta_4} + \frac{\alpha_I \cdot \alpha_{II}}{\beta_4^2}} = \frac{1 + 2 \cdot \delta_{4Halblast}}{1 + 2 \cdot \delta_{4Halblast} + 2 \cdot \delta_{4Halblast} \cdot \delta_{4Volllast}} = 0,981$$

$$\eta_{ges} = \prod_{i=1}^6 \eta_i = 0,7191$$

$$\phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0,7191} = 139,1 \text{ Stk/h}$$

### Überprüfung mittels Simulation mit folgenden Eingabeparametern

Verwendete Module:



Störungsdefinition:

Element	Verfügbarkeit	MTBF	MTBF_Volllast	MTBF_Halblast	MTTR
1	0,9	270	-	-	30
2	0,95	570	-	-	30
3	0,93	398,6	-	-	30
4.1	0,85 (Volllast)	-	170	510	30
4.2	0,85 (Volllast)	-	170	510	30
5	0,97	970	-	-	30
6	0,95	570	-	-	30

Tabelle 22: MTBF und MTTR Simulationsexperiment 3

Prozesszeiten: 
$$t = \frac{1}{\frac{\phi_{tech}}{60}} = \frac{60}{139,1} = 0,431 \text{ min}$$

Simulationslänge:  $T = 100000 \text{ min}$

Simulationsläufe: 5

Simulationsergebnisse: Mittlerer Durchsatz  $\bar{\phi} = 106 \text{ Stk/h}$  ( $\phi_{soll} = 100 \text{ Stk/h}$ )  
 Standardabweichung  $s = 0,83 \text{ Stk/h}$   
 95% Konfidenzintervall  $104,8 \text{ Stk/h} < \phi < 107,1 \text{ Stk/h}$

### 8.4.5 Reihenschaltung von 6 Elementen mit ausreichend großem Puffer zwischen den beiden Anlagenteilen (Simulationsexperiment 4)

#### Anlagenkonfiguration

Die beiden Anlagenteile werden durch einen Puffer mit ausreichender Kapazität vollständig entkoppelt.

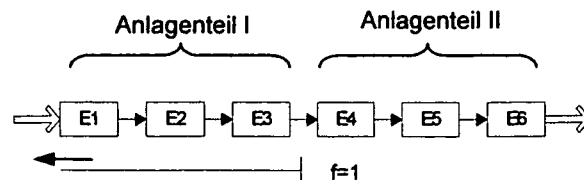


Abbildung 142: 6 Elemente mit unbeschränktem Puffer

mit den Verfügbarkeiten:  $\eta_1 = 0,9 / \eta_2 = 0,95 / \eta_3 = 0,93 / \eta_4 = 0,85 / \eta_5 = 0,97 / \eta_6 = 0,95$

Analytische Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes

$$\phi_{soll} = 100 \text{ Stk / h}$$


$$\eta_{Iges} = \prod_{i=1}^3 \eta_i = 0,795$$

$$\eta_{IIges} = \prod_{i=4}^6 \eta_i = 0,783$$

$$\phi_{Itech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{Iges}} = \frac{100}{0,795} = 125,8 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{IItech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{IIges}} = \frac{100}{0,783} = 127,7 \text{ Stk/h}$$

Überprüfung mittels Simulation mit folgenden Eingabeparametern

Verwendete Module: 

Störungsdefinition:

Element	Verfügbarkeit	MTBF	MTTR
1	0,9	270	30
2	0,95	570	30
3	0,93	398,6	30
4	0,85	170	30
5	0,97	970	30
6	0,95	570	30

Tabelle 23: MTBF und MTTR Simulationsexperiment 4

Prozesszeiten:  $t_I = \frac{1}{\frac{\phi_{Itech}}{60}} = \frac{60}{125,8} = 0,477 \text{ min}$   $t_{II} = \frac{1}{\frac{\phi_{IItech}}{60}} = \frac{60}{127,7} = 0,47 \text{ min}$

Simulationslänge:  $T = 100000 \text{ min}$

Simulationsläufe: 5

Simulationsergebnisse: Mittlerer Durchsatz  $\bar{\phi} = 101,3 \text{ Stk / h}$  ( $\phi_{soll} = 100 \text{ Stk / h}$ )

Standardabweichung  $s = 0,8 \text{ Stk / h}$

95% Konfidenzintervall  $100,2 \text{ Stk / h} < \phi < 102,3 \text{ Stk / h}$

### 8.4.6 Reihenschaltung von 6 Elementen mit beschränkter Kapazität des Puffers zwischen den beiden Anlagenteilen (Simulationsexperiment 5)

#### Anlagenkonfiguration

Zwischen den beiden Anlagenteile befindet sich ein Puffer mit beschränkter Kapazität. Diese wird so gewählt, dass 2/3 der Störzeiten überbrückt werden können.

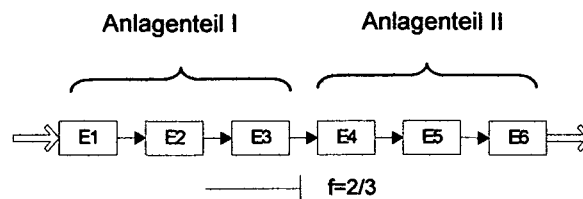


Abbildung 143: 6 Elemente mit beschränktem Puffer

mit den Verfügbarkeiten:  $\eta_1 = 0,9 / \eta_2 = 0,95 / \eta_3 = 0,93 / \eta_4 = 0,85 / \eta_5 = 0,97 / \eta_6 = 0,95$

#### Analytische Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes

$$\phi_{soll} = 100 \text{ Stk} / h$$

$$\eta_{I,0} = \prod_{i=1}^3 \eta_i = 0,795 \quad \eta_{II,0} = \prod_{i=4}^6 \eta_i = 0,783$$

$$\eta_{II,K} = \eta_0 + f(1 - \eta_0) = \eta_{II} + \frac{2}{3}(1 - \eta_{II}) = 0,783 + \frac{2}{3}(1 - 0,783) = 0,928$$

$$\eta_{Iges} = \eta_{I,0} \cdot \eta_{II,K} = 0,795 \cdot 0,928 = 0,738$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{Iges}} = \frac{100}{0,738} = 135,5 \text{ Stk/h} \quad K_I = MTTR_{II} \cdot \phi_{I,tech}$$

$$\eta_{I,K} = \eta_0 + f(1 - \eta_0) = \eta_I + \frac{2}{3}(1 - \eta_I) = 0,795 + \frac{2}{3}(1 - 0,795) = 0,932$$

$$\eta_{IIges} = \eta_{II,0} \cdot \eta_{I,K} = 0,783 \cdot 0,932 = 0,729$$

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{IIges}} = \frac{100}{0,729} = 137,1 \text{ Stk/h} \quad K_{II} = MTTR_I \cdot \phi_{II,tech}$$

$$K_{ges} = K_I + K_{II}$$

Überprüfung mittels Simulation mit folgenden Eingabeparametern

Verwendete Module: 

Störungsdefinition:

Element	Verfügbarkeit	MTBF	MTTR
1	0,9	270	30
2	0,95	570	30
3	0,93	398,6	30
4	0,85	170	30
5	0,97	970	30
6	0,95	570	30

Tabelle 24: MTBF und MTTR Simulationsexperiment 5

Prozesszeiten:  $t_I = \frac{1}{\frac{\phi_{I,tech}}{60}} = \frac{60}{135,5} = 0,443 \text{ min}$        $t_{II} = \frac{1}{\frac{\phi_{II,tech}}{60}} = \frac{60}{137,1} = 0,438 \text{ min}$

Pufferkapazität:  $K_I = MTTR_{II} \cdot \phi_{I,tech} = 68$        $K_{II} = MTTR_I \cdot \phi_{II,tech} = 69$

$$K_{ges} = K_I + K_{II} = 137$$

Simulationslänge: T = 100000 min

Simulationsläufe: 5

Simulationsergebnisse: Mittlerer Durchsatz  $\bar{\phi} = 101 \text{ Stk/h}$  ( $\phi_{soll} = 100 \text{ Stk/h}$ )  
 Standardabweichung  $s = 1,4 \text{ Stk/h}$   
 95% Konfidenzintervall  $99,1 \text{ Stk/h} < \phi < 103 \text{ Stk/h}$

### 8.4.7 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse aller 5 Anlagenkonfigurationen den Ergebnissen des analytischen Berechnungsverfahrens gegenübergestellt.

Aus Abbildung 144 ist ersichtlich, dass die Durchsätze der ersten drei Simulationsexperimente wesentlich vom theoretischen Solldurchsatz von 100 Stk/h abweichen. Die Experimente 4 und 5, bei denen jeweils ein Puffer zur Entkopplung zum Einsatz kommt, liefern hingegen sehr gute Ergebnisse.

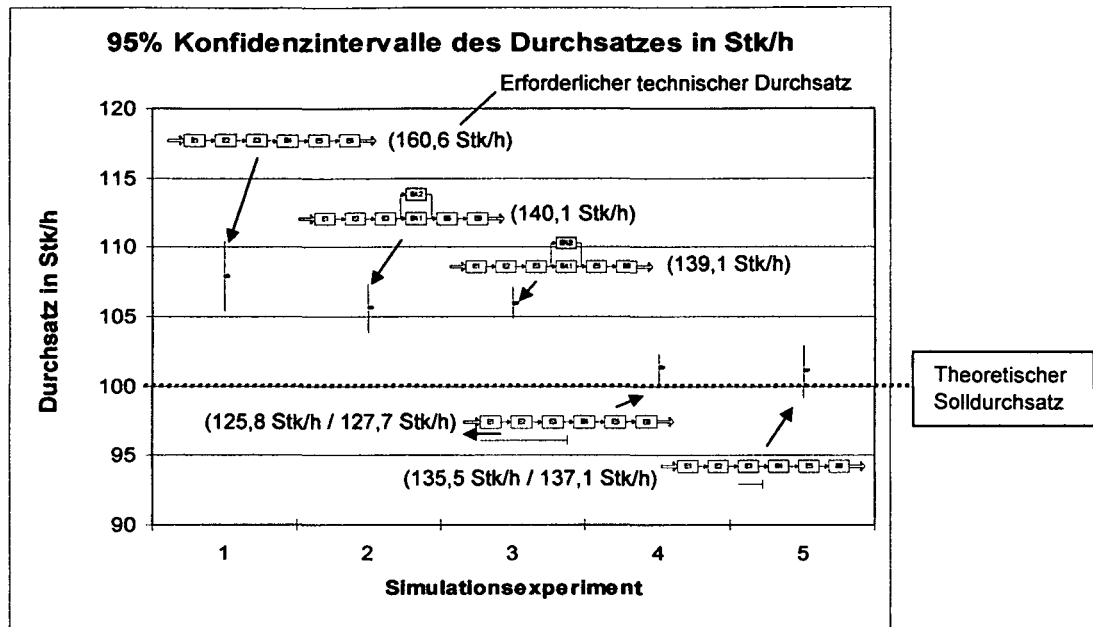


Abbildung 144: Gegenüberstellung der Ergebnisse verketteter Elemente

Die Begründung liegt darin, dass sich die Betriebsart des Realsystems (die im Simulationsmodell nachgebildet wird) wesentlich von jener unterscheidet, die der analytischen Betrachtung zugrunde liegt.

Bei der Berechnung des technischen Durchsatzes wird nämlich davon ausgegangen, dass keine Puffer vorhanden sind und bei Ausfall eines Elements sofort auch alle anderen Elemente außer Funktion gesetzt werden. Im Vergleich dazu wird man üblicherweise in Realsystemen auch Puffer mit einer Kapazität von mindestens einem Stück installieren, um die Fördereinheiten vor einem Transport- oder Bedienelement bereitstellen zu können. Dies ist mit den entwickelten Modulen auch nicht anders möglich. Bei Auftreten einer Störung eines Elements wird nicht sofort die gesamte Anlage abgeschaltet, sondern die übrigen Elemente werden noch solange weiterarbeiten, bis es zu Blockier- oder Leerzeiten kommt. Dadurch verlängert sich die nutzbare Zeit jeder Komponente im Vergleich zur analytischen Betrachtung, wodurch sich ein höherer Durchsatz ergibt.



In Abbildung 145 soll die Betriebsweise verdeutlicht werden, welche dem analytischen Berechnungsverfahren zugrunde liegt. Im Vergleich dazu wird in Abbildung 146 die übliche Arbeitsweise von Realsystemen dargestellt, die auch im Simulationsmodell nachgebildet wird. Hier ist vor jedem Element ein Puffer mit Kapazität 1 zur Bereitstellung der Fördereinheiten angeordnet.

Es sollen jeweils 6 Elemente betrachtet werden, die starr miteinander verknüpft sind, wobei zunächst Element 4, nach einer gewissen Zeit Element 6, und schließlich auch noch Element 2 ausfällt.

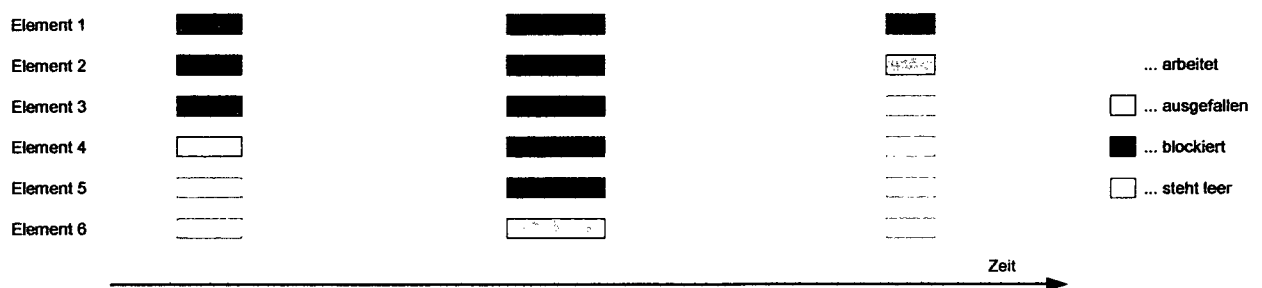


Abbildung 145: Arbeitsweise analytisches Berechnungsverfahren ohne Bereitstellungsplatz

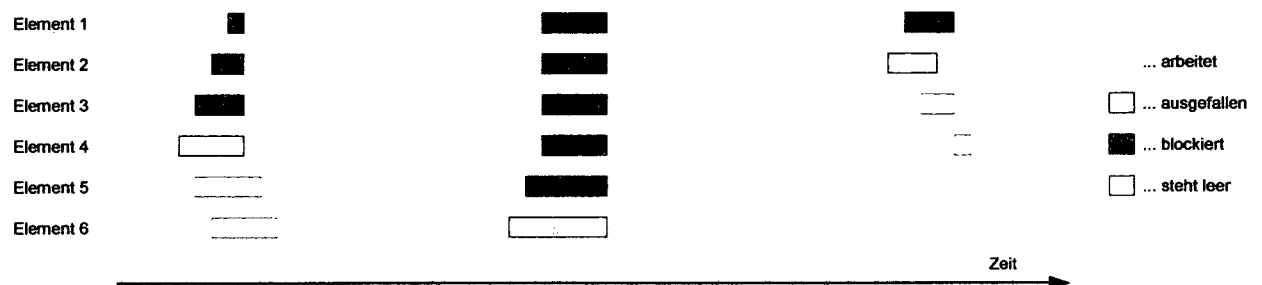


Abbildung 146: Arbeitsweise Realsystem mit Bereitstellungsplatz vor jedem Element (Pufferkapazität = 1)

Beim Vergleichen der beiden Abbildungen kann man eindeutig feststellen, dass die einzelnen Elemente des Realsystems (Simulationsmodells) länger nutzbar sind als bei der theoretischen Betrachtungsweise. Dies ist auch der Grund dafür, warum sich bei der Simulation der ersten drei Validationsexperimente höhere Durchsätze ergeben.

Bei Zwischenschaltung eines Puffers zur Entkopplung der beiden Anlagenteile, wie dies bei den Experimenten 4 und 5 der Fall ist, können nur mehr jeweils drei Elemente und die dazugehörigen Bereitstellungsplätze wechselseitig aufeinander einwirken, wodurch sich Durchsätze ergeben, die sehr gut mit jenen der theoretischen Betrachtung übereinstimmen.

Zum besseren Verständnis von Abbildung 146 wird auf der nächsten Seite das Systemverhalten aller Elemente über der Zeit, jeweils beginnend beim entsprechenden Ausfallzeitpunkt, veranschaulicht.

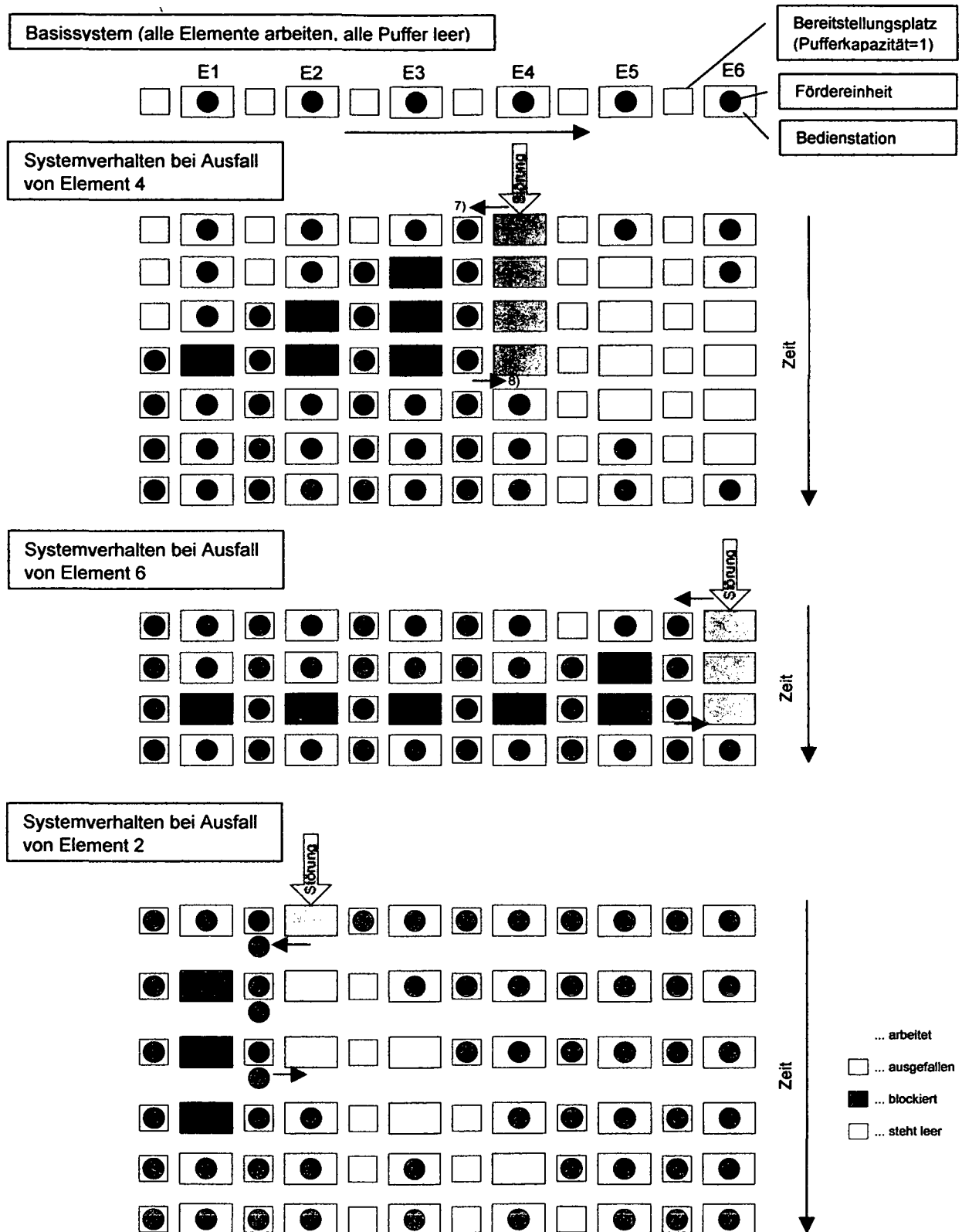


Abbildung 147: Darstellung der Betriebsweise des Realsystems (Simulationsmodells)

7) ... fällt ein Element aus, wird die Fördereinheit softwaremäßig im vorgelagerten Bereitstellungsplatz abgelegt

8) ... nach erfolgter Reparatur wird die Fördereinheit dem Element wieder zugeführt und verbleibt dort solange, wie es der restlichen Bediendauer entspricht

In den nachfolgenden Abbildungen sind für alle 5 Simulationsexperimente die verschiedenen Zeitanteile in % der gesamten Belegungszeit für jedes der 6 Elemente dargestellt. Dadurch sollen die Unterschiede im Systemverhalten verdeutlicht werden.

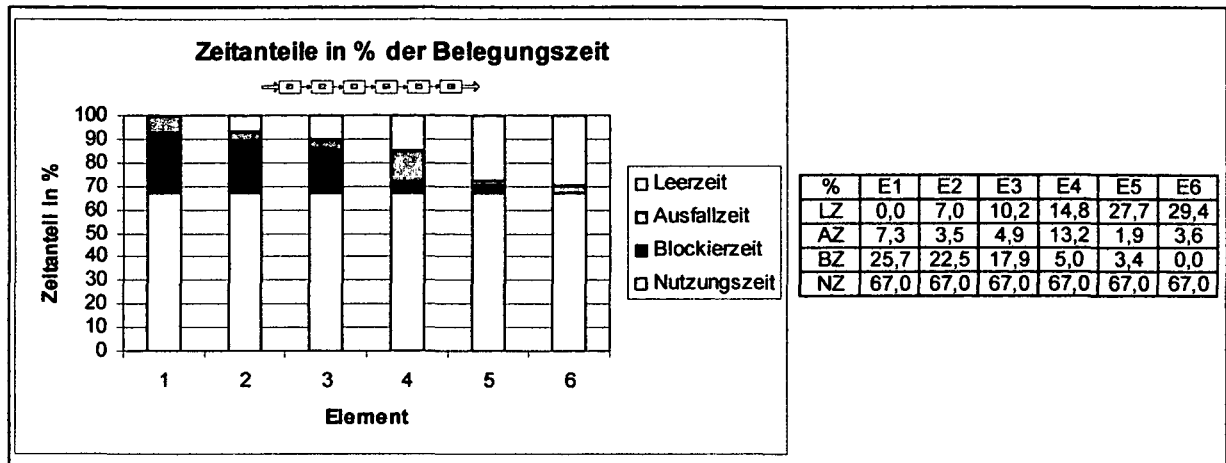


Abbildung 148: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 1

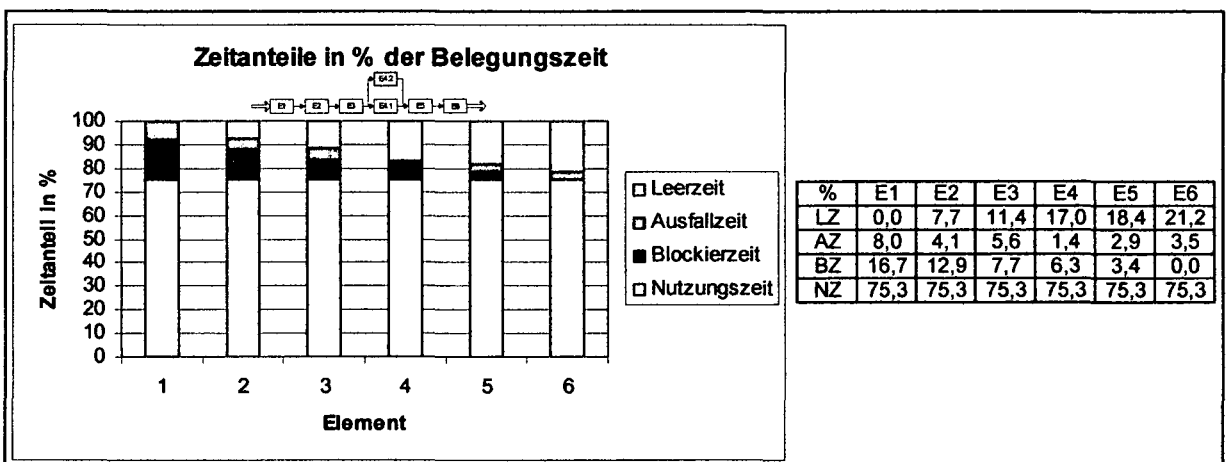


Abbildung 149: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 2

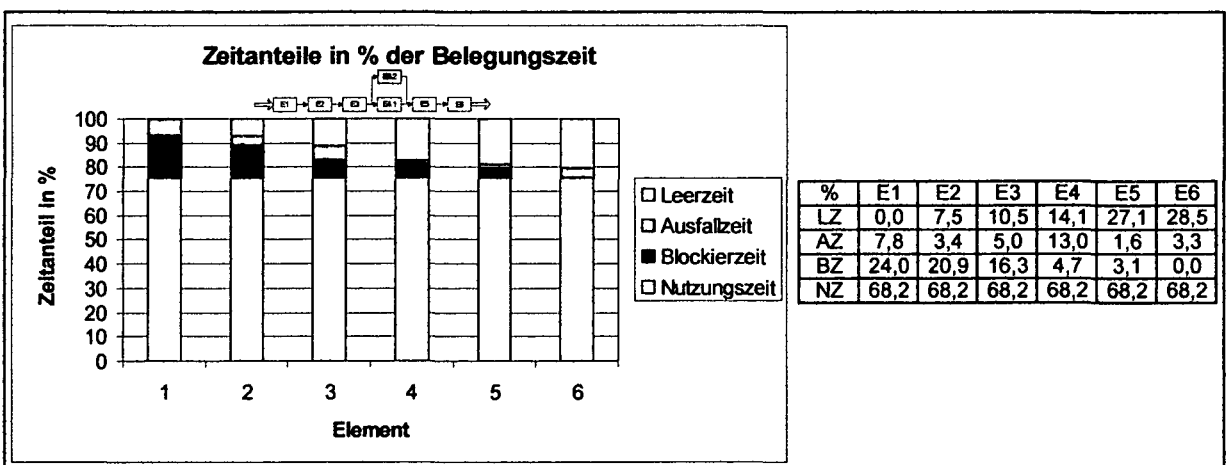


Abbildung 150: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 3

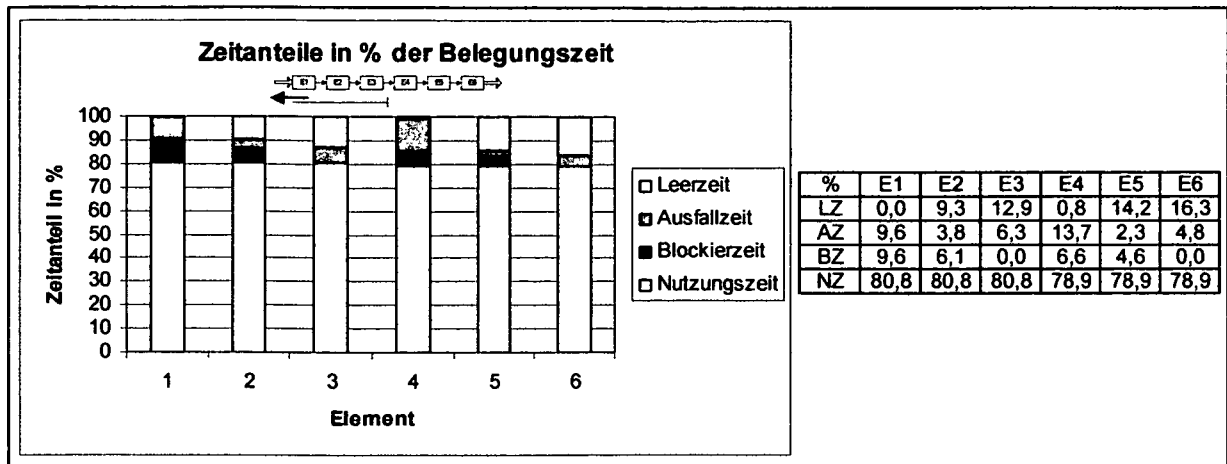


Abbildung 151: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 4

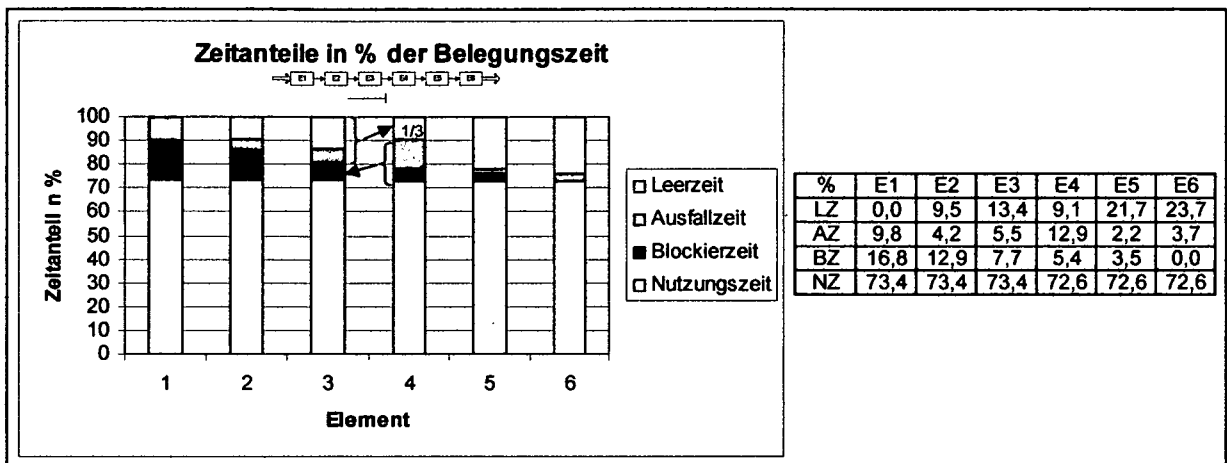


Abbildung 152: Zeitanteile je Element von Simulationsexperiment 5

Aus den Abbildungen 149 und 150 ist ersichtlich, dass sich die Ausfallzeit für Element 4 durch Anordnung eines kalten, bzw. warmen Redundanzelements im Vergleich zu Abbildung 148 stark verkürzt und dadurch die Nutzungszeit länger wird.

Abbildung 151 zeigt, dass die Zwischenschaltung eines ausreichend großen Puffers zur völligen Entkopplung der beiden Anlagenteile führt. Dies ist daran erkennbar, dass es in Element 4 nahezu keine Leerzeiten und in Element 3 keine Blockierzeiten gibt.

Wird hingegen ein Puffer mit beschränkter Kapazität verwendet, dann kann nur ein bestimmter Anteil (im konkreten Fall 2/3) der Störzeiten überbrückt werden (siehe Abbildung 152).

## 8.5 Bestimmung weiterer Einflussgrößen

In diesem Kapitel soll, aufbauend auf den Erkenntnissen, die während der Validation der Module gewonnen wurden, untersucht werden, ob es weitere Einflussgrößen auf den Durchsatz von Realsystemen mit Bereitstellungsplätzen gibt, die im vorgestellten Berechnungsverfahren (Kapitel 4) nicht berücksichtigt werden.

Zu diesem Zweck wurden Simulationsläufe bei Variation von Elementanzahl, Störungshäufigkeit und theoretischer Gesamtverfügbarkeit durchgeführt.

Es wurden Systeme mit unterschiedlicher Elementanzahl, aber der gleichen theoretischen Gesamtverfügbarkeit betrachtet, d.h., dass z. B. 2 Elemente die gleiche Gesamtverfügbarkeit besitzen, wie 6 Elemente in Serienschaltung. Vor jedem Element ist ein Bereitstellungsplatz (B) mit Kapazität 1 angeordnet.

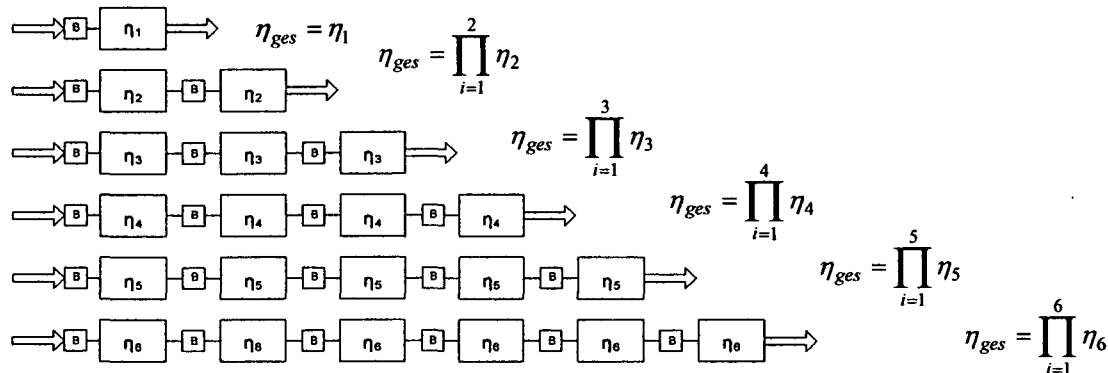


Abbildung 153: Variation der Elementanzahl

Jedem System wurden die theoretischen Gesamtverfügbarkeiten 80%, bzw. 90% zugewiesen und daraus die Elementverfügbarkeiten  $\eta_i$  berechnet (ohne Berücksichtigung der Bereitstellungsplätze).

In Kapitel 3.2.3 wurde bereits darauf hingewiesen, dass viele kurze Störungen zum gleichen Verfügbarkeitskennwert führen können, wie wenige lange Störungen. Deshalb wurden verschiedene Kombinationen von störungsfreien Zeiten und Reparaturzeiten untersucht, wobei angenommen wurde, dass diese aus Exponentialverteilungen stammen.

Die Verfügbarkeit ist definiert als:  $V = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$  daraus ergibt sich:  $MTBF = \frac{V}{1-V} \cdot MTTR$

Die Reparaturdauer MTTR wurde dabei als Vielfaches der Prozessdauer gewählt und für den entsprechenden Verfügbarkeitswert die jeweilige störungsfreie Zeit MTBF berechnet.

$$MTTR = \text{Prozessdauer} \cdot H \quad H = 10, 20, 30$$

Für die Prozessdauer  $t$  ergibt sich z. B. bei einer Gesamtverfügbarkeit von 0,8:

$$t = \frac{1}{\frac{\phi_{tech}}{60}} = \frac{60}{140,1} = 0,48 \text{ min} \quad \text{mit} \quad \phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0,8} = 125 \text{ Stk/h}$$

Die Störungshäufigkeit  $S$  (Anzahl der Störungen pro Stunde) sei folgendermaßen definiert:

$$S = \frac{60 \text{ min}}{MTBF(\text{min}) + MTTR(\text{min})}$$

In den nachfolgenden Tabellen sind die Werte der Parameter für die einzelnen Simulationsläufe eingetragen.

## Simulationsexperimente bei einer Gesamtverfügbarkeit V von 0,8

Soliddurchsatz in Stk/h	Soliddurchsatz in Stk/min	Gesamtverfügbarkeit in %	Prozessdauer in min	Simulationslänge in min
100	1,666	80	0,48	100000

Tabelle 25: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,8

Elementanzahl	Gesamtverfügbarkeit	Elementverfügbarkeit	Prozessdauer	H	MTTR	MTBF	S
1	0,8	0,800	0,480	10	4,8	19,2	2,50
2	0,8	0,894	0,480	10	4,8	40,7	1,32
3	0,8	0,928	0,480	10	4,8	62,2	0,90
4	0,8	0,946	0,480	10	4,8	83,7	0,68
5	0,8	0,956	0,480	10	4,8	105,2	0,55
6	0,8	0,963	0,480	10	4,8	126,7	0,46

Tabelle 26: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,8 und H=10

Elementanzahl	Gesamtverfügbarkeit	Elementverfügbarkeit	Prozessdauer	H	MTTR	MTBF	S
1	0,8	0,800	0,480	20	9,6	38,4	1,25
2	0,8	0,894	0,480	20	9,6	81,3	0,66
3	0,8	0,928	0,480	20	9,6	124,3	0,45
4	0,8	0,946	0,480	20	9,6	167,3	0,34
5	0,8	0,956	0,480	20	9,6	210,3	0,27
6	0,8	0,963	0,480	20	9,6	253,4	0,23

Tabelle 27: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,8 und H=20

Elementanzahl	Gesamtverfügbarkeit	Elementverfügbarkeit	Prozessdauer	H	MTTR	MTBF	S
1	0,8	0,800	0,480	30	14,4	57,6	0,83
2	0,8	0,894	0,480	30	14,4	122,0	0,44
3	0,8	0,928	0,480	30	14,4	186,5	0,30
4	0,8	0,946	0,480	30	14,4	251,0	0,23
5	0,8	0,956	0,480	30	14,4	315,5	0,18
6	0,8	0,963	0,480	30	14,4	380,0	0,15

Tabelle 28: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,8 und H=30

Die Simulationsergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung zusammengefasst.

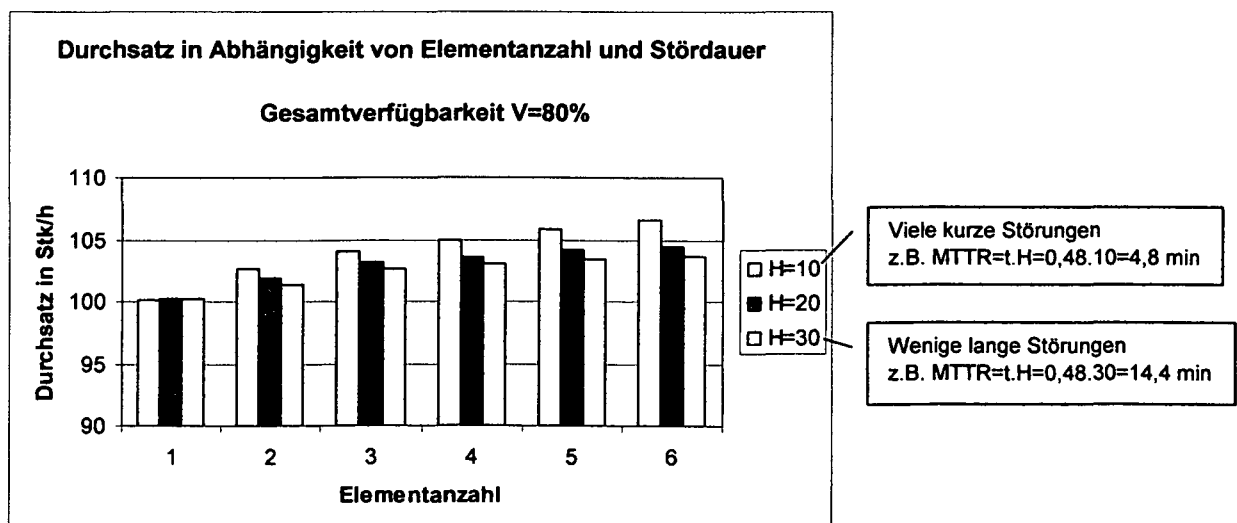


Abbildung 154: Simulationsergebnisse bei Gesamtverfügbarkeit 0,8

## Simulationsexperimente bei einer Gesamtverfügbarkeit V von 0,9

Solldurchsatz in Stk/h	Solldurchsatz in Stk/min	Gesamtverfügbarkeit in %	Prozessdauer in min	Simulationslänge in min
100	1,666	90	0,54	100000

Tabelle 29: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,9

Elementanzahl	Gesamtverfügbarkeit	Elementverfügbarkeit	Prozessdauer	H	MTTR	MTBF	S
1	0,9	0,900	0,540	10	5,4	48,6	1,11
2	0,9	0,949	0,540	10	5,4	99,8	0,57
3	0,9	0,965	0,540	10	5,4	151,1	0,38
4	0,9	0,974	0,540	10	5,4	202,3	0,29
5	0,9	0,979	0,540	10	5,4	253,6	0,23
6	0,9	0,983	0,540	10	5,4	304,8	0,19

Tabelle 30: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,9 und H=10

Elementanzahl	Gesamtverfügbarkeit	Elementverfügbarkeit	Prozessdauer	H	MTTR	MTBF	S
1	0,9	0,900	0,540	20	10,8	97,2	0,56
2	0,9	0,949	0,540	20	10,8	199,7	0,29
3	0,9	0,965	0,540	20	10,8	302,1	0,19
4	0,9	0,974	0,540	20	10,8	404,6	0,14
5	0,9	0,979	0,540	20	10,8	507,1	0,12
6	0,9	0,983	0,540	20	10,8	609,6	0,10

Tabelle 31: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,9 und H=20

Elementanzahl	Gesamtverfügbarkeit	Elementverfügbarkeit	Prozessdauer	H	MTTR	MTBF	S
1	0,9	0,900	0,540	30	16,2	145,8	0,37
2	0,9	0,949	0,540	30	16,2	299,5	0,19
3	0,9	0,965	0,540	30	16,2	453,2	0,13
4	0,9	0,974	0,540	30	16,2	607,0	0,10
5	0,9	0,979	0,540	30	16,2	760,7	0,08
6	0,9	0,983	0,540	30	16,2	914,5	0,06

Tabelle 32: Simulationsparameter bei Gesamtverfügbarkeit 0,9 und H=30

Die Simulationsergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung zusammengefasst.

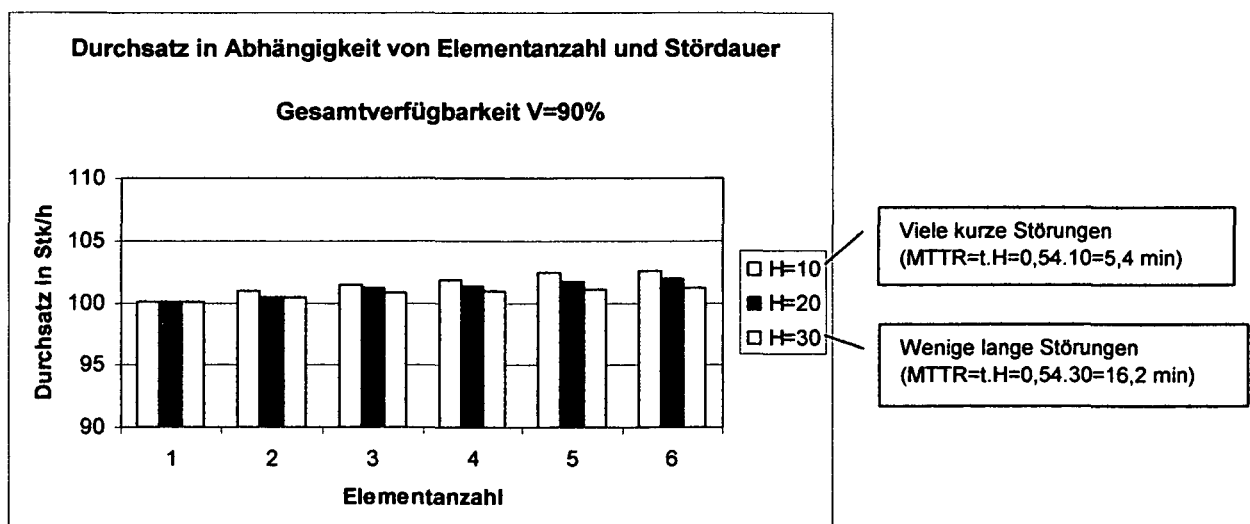


Abbildung 155: Simulationsergebnisse bei Gesamtverfügbarkeit 0,9

## Interpretation der Ergebnisse:

Betrachtet man die Simulationsergebnisse, so kann im Vergleich zur theoretischen Betrachtungsweise, bei der keine Bereitstellungsplätze berücksichtigt werden, folgendes festgehalten werden:

Wie die Abbildungen 154 und 155 zeigen, nimmt der erreichte Anlagendurchsatz bei konstanter theoretischer Gesamtverfügbarkeit mit der Elementanzahl zu, da dabei auch die Anzahl der Bereitstellungsplätze zunimmt und diese eine Erhöhung der nutzbaren Zeitanteile und somit des Durchsatzes bewirken.

Wird bei einer bestimmten Elementanzahl und Verfügbarkeit die Stördauer variiert, so zeigt sich, dass der Durchsatz mit der Anzahl der Störungen (H wird kleiner und somit MTTR kürzer) ebenfalls zunimmt. Die Begründung liegt darin, dass bei Erhöhung der Störungshäufigkeit die Überbrückungswirkung der Bereitstellungsplätze immer stärker zum Tragen kommt.

Und schließlich beeinflusst auch die theoretische Gesamtverfügbarkeit des Systems den Anlagendurchsatz. Bei höherer Gesamtverfügbarkeit, aber gleicher Elementanzahl, erhöht sich auch die Einzelelementverfügbarkeit, d.h. es treten weniger Störungen auf. Dadurch reduziert sich die Wirkung der Bereitstellungsplätze und der Durchsatz sinkt.

Die gewonnenen Erkenntnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:

$$\phi_{\text{tat}} = \phi_{\text{theo}} \cdot \varepsilon$$

mit

$\varepsilon = f(\text{Elementanzahl, Stördauer, theoretische Gesamtverfügbarkeit})$

$\phi_{\text{theo}}$  ... theoretischer Solldurchsatz bei Vernachlässigung der Bereitstellungsplätze

$\phi_{\text{tat}}$  ... tatsächlicher Anlagendurchsatz mit Berücksichtigung der Bereitstellungsplätze

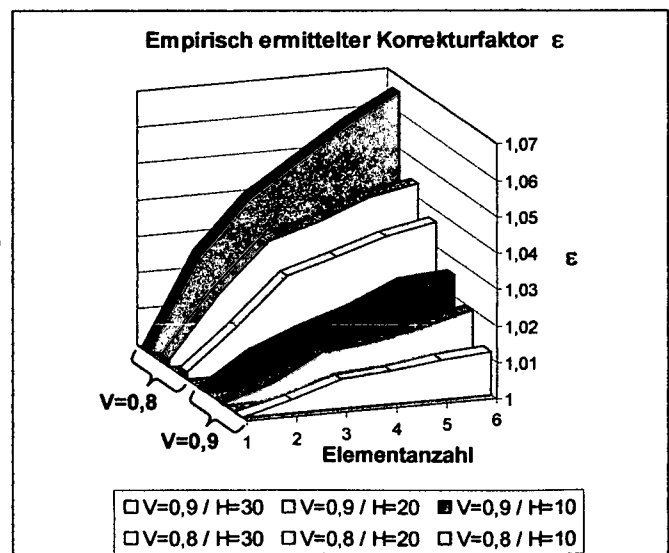


Abbildung 156: Empirisch ermittelter Korrekturfaktor

Die analytische Bestimmung des Faktors  $\varepsilon$  in Abhängigkeit der oben angeführten Größen, um eine Ergebniskorrektur des Berechnungsverfahrens durchführen zu können, wenn dieses für die Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes von Systemen mit Bereitstellungsplätzen herangezogen wird, erschien durch die Komplexität der Einflüsse kaum möglich und bedürfte weiterer Untersuchungen.



## 9 Planung von Simulationsexperimenten

### 9.1 Allgemeines

Ganz allgemein können bei der Planung von Materialflusssystemen folgende Fragestellungen von Interesse sein:

**Kategorie A** ... Es soll die Frage beantwortet werden, welcher Durchsatz sich bei einer bestimmten Parameterkonfiguration ergibt („klassische“ Simulationsuntersuchungen). Solche Untersuchungen werden in der vorliegenden Arbeit im Rahmen der Validation der Simulationsmodelle durchgeführt, indem die Ergebnisse von Berechnungsverfahren den Simulationsergebnissen gegenübergestellt werden.

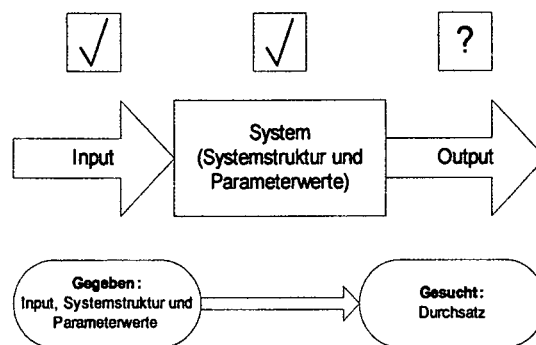


Abbildung 157: Simulationsexperimente Kategorie A

**Kategorie B** ... Es soll die Frage beantwortet werden, wie die einzelnen Parameterwerte gewählt werden müssen, um einen bestimmten Durchsatz zu erreichen. Die Beantwortung dieser Fragestellung stellt den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar.

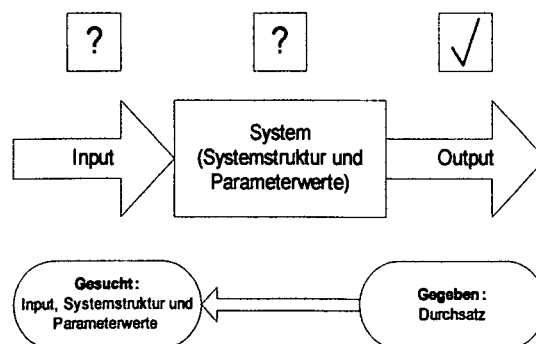


Abbildung 158: Simulationsexperimente Kategorie B

Um die Parameterwerte mittels Simulation möglichst rasch bestimmen zu können, wurde auf die iterative Parametervariation zurückgegriffen. Diese wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

## 9.2 Iterative Parametervariation

In der Informatik wird von Iteration (lat. iterare ... wiederholen) gesprochen, wenn ein Zugriff iterativ, d. h. schrittweise, bzw. wiederholt, auf Datenstrukturen erfolgt.

Im Zusammenhang mit der Planung und Durchführung von Simulationsexperimenten bedeutet dies, dass ein noch unbekannter Parameter solange variiert wird, bis die Zielgröße den gewünschten Wert annimmt. In Materialflusssystemen soll beispielsweise der Durchsatz (=Zielgröße) einen bestimmten Wert erreichen. Der noch unbekannte Parameter, z. B. die Transportdauer der Fördersysteme, soll nun schrittweise solange variiert werden, bis der gewünschte Anlagendurchsatz gewährleistet ist. Dabei müssen die Pufferkapazitäten und technischen Verfügbarkeiten bekannt sein.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht das Schema der iterativen Parametervariation. Die 1. Iteration startet mit dem Wert  $P_{It1} = (P_{\max} + P_{\min})/2$ . Abhängig von diesem Ergebnis wird der neue Wert des Parameters für die 2. Iteration wiederum durch Halbieren des entsprechenden Intervalls gewählt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis der Wert der Ergebnisgröße des Simulationslaufes im gewünschten Bereich liegt.

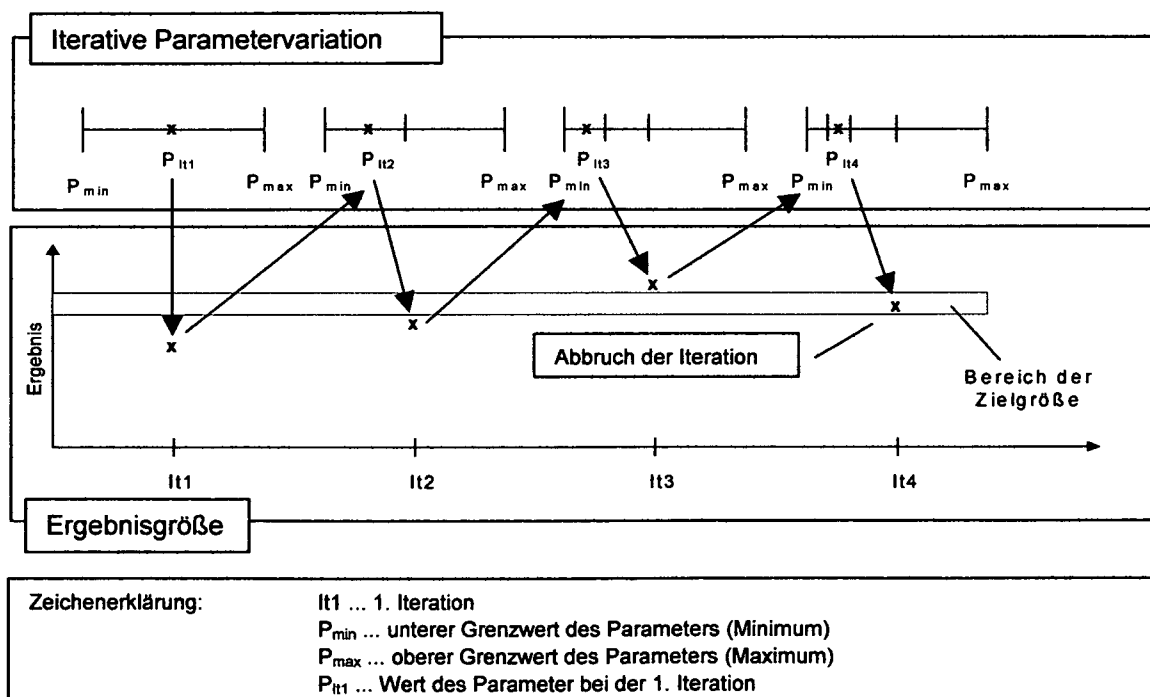


Abbildung 159: Schema der iterativen Parametervariation

Um die einzelnen Iterationsschritte automatisiert ablaufen zu lassen, wurde ein VBA-Programm entwickelt, das abhängig vom Ergebnis des vorhergehenden Simulationslaufes den Wert des Parameters für die neue Iteration berechnet. Liegt der Wert der Ergebnisgröße innerhalb des gewünschten Bereiches, wird die Simulation beendet. Die Ergebnisse werden dann in einer Excel-Tabelle ausgegeben (siehe Anhang B).

Das Planungstool setzt sich somit aus den drei Softwareprogrammen Arena, VBA und Excel zusammen. Wie diese interagieren, wird auf der nächsten Seite beschrieben.

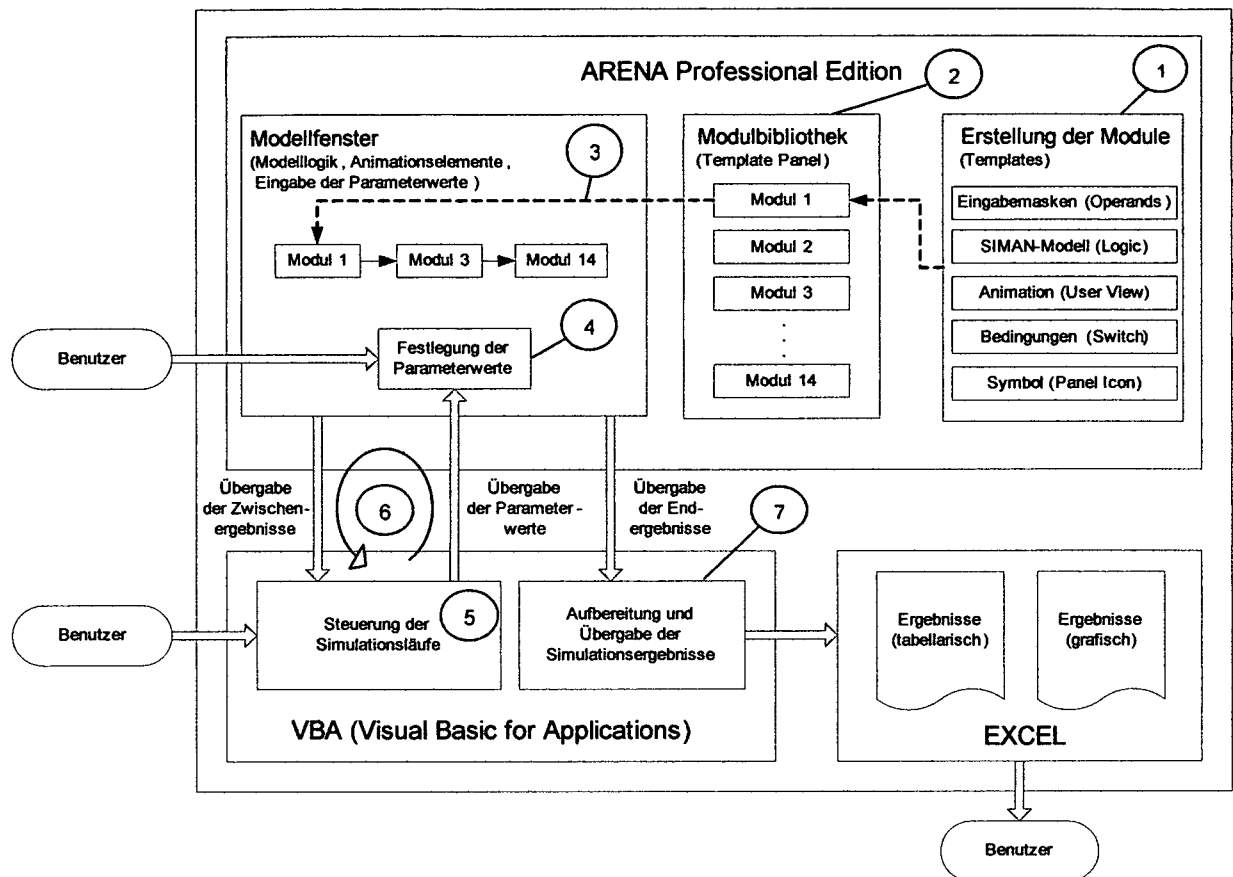


Abbildung 160: Interaktion der verwendeten Softwareprogramme

Erstellung der Module	{	1	Erstellung der Module mit dem, im Simulationspaket ARENA, integrierten Entwicklungstool (siehe Kapitel 7)
		2	Generieren einer Modulbibliothek
Erstellung des Modells	{	3	Platzieren der Module auf dem Modellfenster
Durchführung der Simulationsexperimente	{	4	Festlegung der Parameterwerte mittels Dialogboxen durch den Benutzer, bzw. mittels VBA-Code
		5	Planung und Steuerung der Simulationsläufe mittels VBA (es können Parameterwerte an ARENA übergeben und Zwischenergebnisse abgefragt werden)
		6	Iterationsroutine entsprechend Abbildung 160
Auswertung	{	7	Übernahme aus ARENA, Aufbereitung und Übergabe der Endergebnisse an Excel

## 10 Durchgeführte Simulationsexperimente

### 10.1 Kategorie A – klassische Simulation

#### 10.1.1 Simulationsbeispiel Taktprozess

Das in Kapitel 4.2.2 angeführte Berechnungsbeispiel wurde auch simulationstechnisch untersucht. Dabei dienten die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens als Eingabeparameter für die Simulation (vgl. Tabelle 33 mit Tabelle 2 auf Seite 34). Im Simulationsmodell sollte sich somit ein Anlagendurchsatz von 100 Stk/h einstellen.

Simulationsexperiment	1	2	3	4	5
f in %	25,6	52,2	64,4	73,5	90,6
Pufferkapazität in Stk	8	20	28	36	62
technischer Durchsatz $\phi_{\text{tech}}$ in Stk/h	126,3	122,8	121,2	120,1	118

Tabelle 33: Zusammenfassung der Parameter der Simulationsexperimente

In der nachfolgenden Abbildung sind die Simulationsergebnisse in Form von Konfidenzintervallen (Konfidenzniveau 95%, N=5) dargestellt.

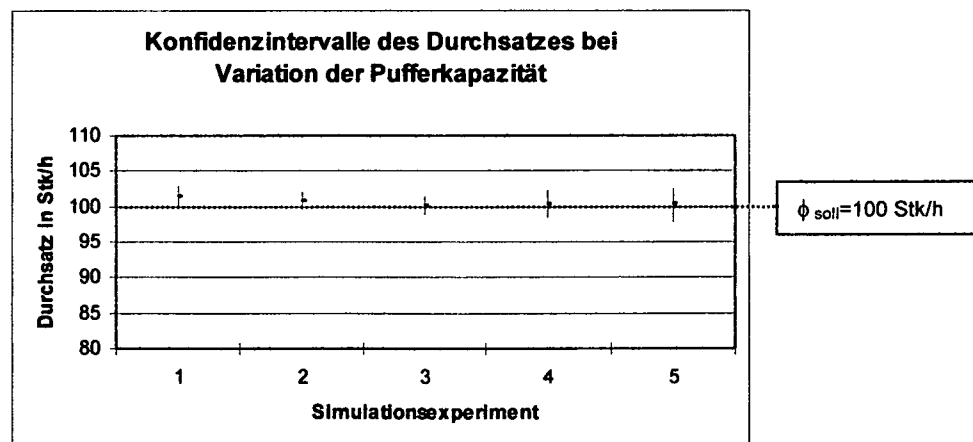


Abbildung 161: Simulationsergebnisse Taktprozess

Aus Abbildung 161 ist erkennbar, dass sich im Simulationsmodell der erwartete Durchsatz von 100 Stk/h an der Senke auch tatsächlich einstellt.

### 10.1.2 Simulationsbeispiel stochastischer Prozess

Das in Kapitel 4.3.2 angeführte Berechnungsbeispiel wurde ebenfalls simulationstechnisch untersucht, wobei die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens als Eingabeparameter für die Simulation (vgl. Tabelle 34 mit Tabelle 3 auf Seite 42) dienten. Auch bei diesem Beispiel sollte sich im Simulationsmodell ein Anlagendurchsatz von 100 Stk/h einstellen.

Simulationsexperiment	1	2	3	4	5
f in %	58	83,4	93,4	98,9	99,8
Pufferkapazität in Stk	2	4	6	8	12
technischer Durchsatz $\phi_{1,tech}$ in Stk/h	107,1	104,7	103,3	101,7	100,8
technischer Durchsatz $\phi_{2,tech}$ in Stk/h	119	116,3	114,7	113	112

Tabelle 34: Zusammenfassung der Parameter der Simulationsexperimente

In der nachfolgenden Abbildung sind die Simulationsergebnisse in Form von Konfidenzintervallen (Konfidenzniveau 95%, N=5) dargestellt.

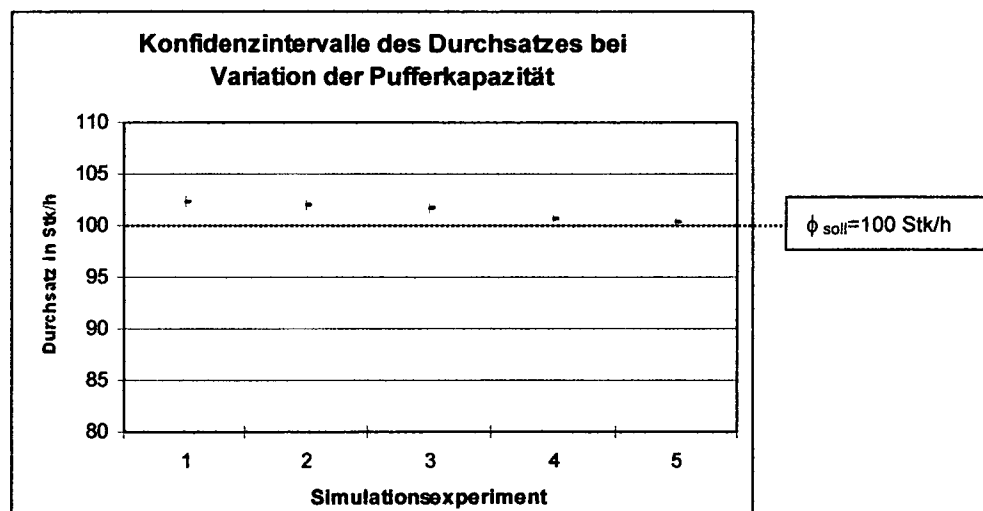


Abbildung 162: Simulationsergebnisse stochastischer Prozess

Die Abweichungen zwischen dem theoretischen Solldurchsatz von 100 Stk/h und den erreichten Anlagendurchsätzen in der Simulation sind darauf zurückzuführen, dass die Pufferkapazitäten im Zuge der Berechnung aufgerundet werden, was sich bei kleinen Kapazitäten natürlich stärker auswirkt (z.B. Pufferkapazität=2 bei Simulationsexperiment 1, Pufferkapazität=12 bei Simulationsexperiment 5).

## 10.2 Kategorie B – Parametervariation

### 10.2.1 Aufgabenstellung

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Planungstools zur simulationstechnischen Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels Iteration soll an folgendem Beispiel demonstriert werden:

Ein Produktionssystem ist mit einer Montagestation starr verknüpft. Das Basissystem setzt sich aus insgesamt 7 Elementen zusammen:

- 3 Fördersysteme
- 2 Puffer
- 1 Produktionssystem
- 1 Montagestation

Jedem dieser Elemente wird eine technische Verfügbarkeit zugeordnet.

Die Aufgabe besteht nun darin, für alle technisch möglichen Anlagenkonfigurationen den erforderlichen technischen Durchsatz mittels Simulation zu ermitteln. Dabei sollen zunächst alle Prozesse als deterministisch angenommen werden (Anlagenkonfiguration 1 – 9). Als Vergleich werden die erforderlichen technischen Durchsätze analytisch bestimmt (Berechnungsverfahren laut Kapitel 4). Schließlich soll untersucht werden, welchen Einfluss ein stochastischer Montageprozess (Montagezeiten entstammen einer Exponentialverteilung) auf den technischen Durchsatz hat (Anlagenkonfiguration 10 – 18). Die störungsfreien Zeiten und die Reparaturzeiten sollen dabei aus Exponentialverteilungen stammen.

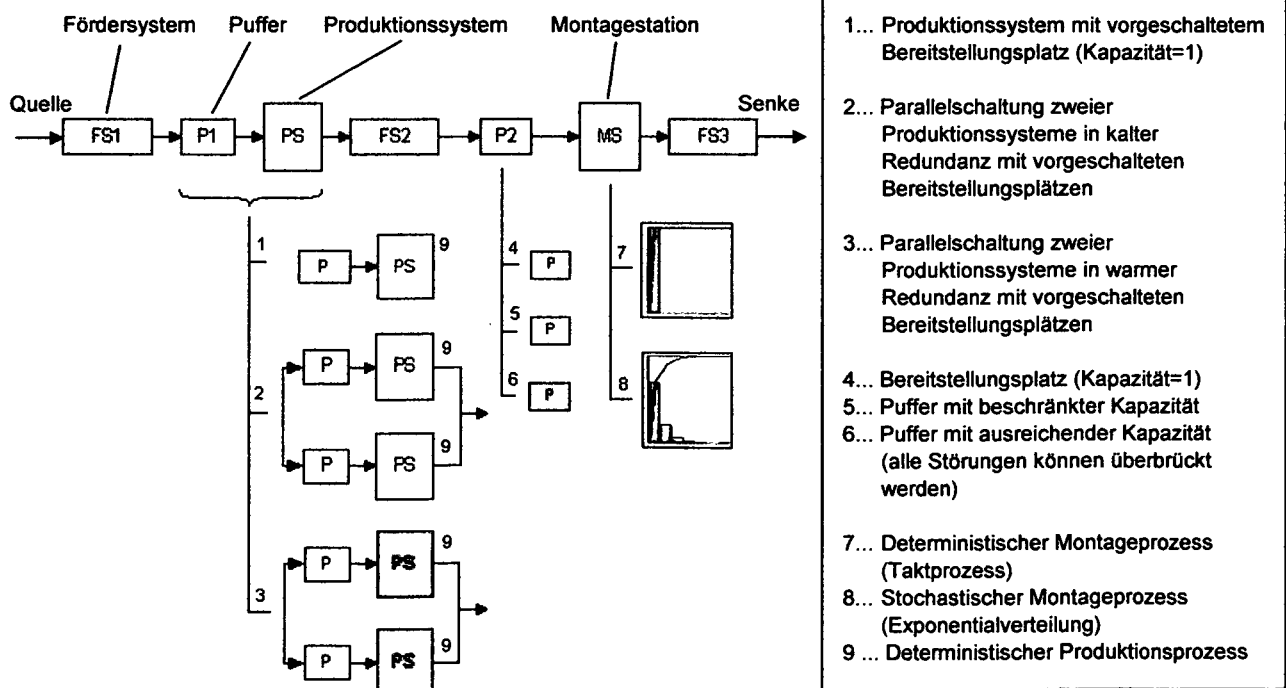
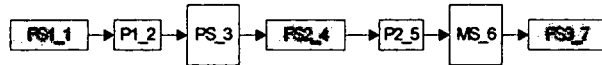


Abbildung 163: Basissystem und Anlagenkonfigurationen

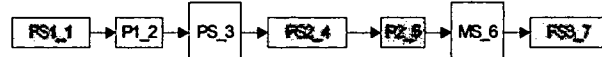
## 10.2.2 Durchgeführt Untersuchungen

Auf dieser Seite sind alle untersuchten Anlagenkonfigurationen im Überblick dargestellt. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens und der Simulation gegenübergestellt.

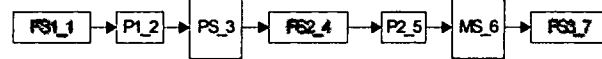
Anlagenkonfiguration 1 bzw. 10:



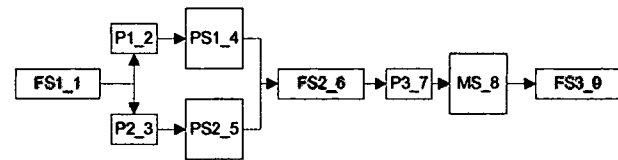
Anlagenkonfiguration 2 bzw. 11:



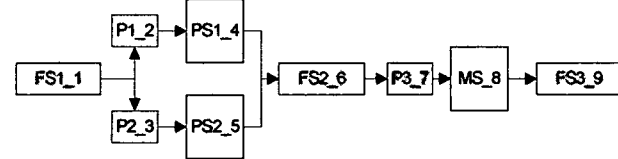
Anlagenkonfiguration 3 bzw. 12:



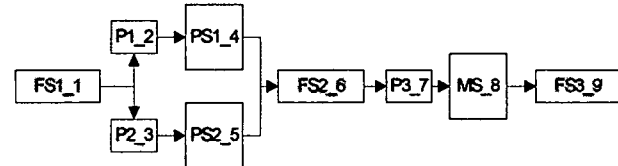
Anlagenkonfiguration 4 bzw. 13:



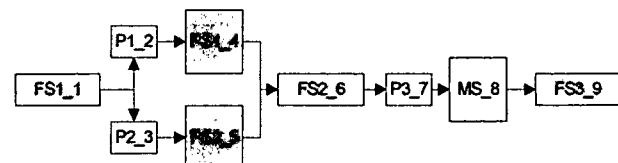
Anlagenkonfiguration 5 bzw. 14:



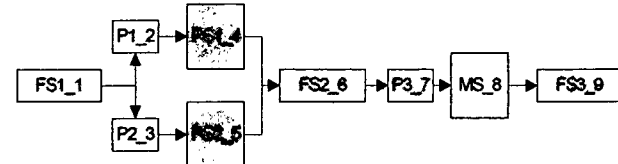
Anlagenkonfiguration 6 bzw. 15:



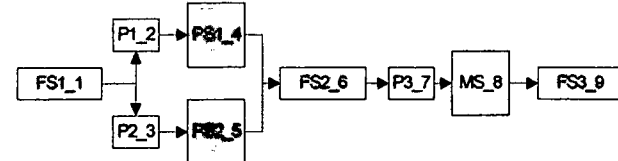
Anlagenkonfiguration 7 bzw. 16:



Anlagenkonfiguration 8 bzw. 17:



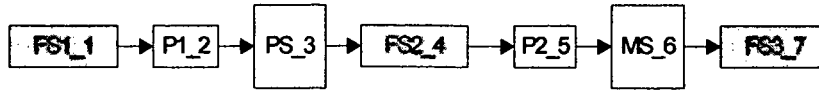
Anlagenkonfiguration 9 bzw. 18:



Anlagenkonfiguration 1 – 9: Produktionsprozess und Montageprozess als Taktprozess ausgeführt

Anlagenkonfiguration 10 – 18: Produktionsprozess als Taktprozess, Montageprozess als stochastischer Prozess ausgeführt

## Anlagenkonfiguration 1



FS1, FS2, FS3, PS, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
PS	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{ges} = \prod_{i=1}^7 \eta_i = 0,98 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 0,94 \cdot 0,95 = 0,772$$

$$\phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0,772} = 129,6 \text{ Stk/h}$$

## Simulation

## Eingabeparameter:

Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
PS	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

## Simulationsergebnis:

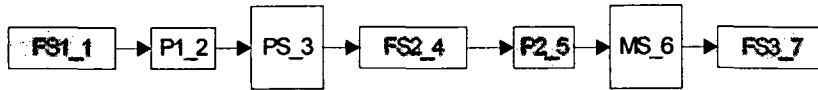
$$\phi_{tech} = 126,3 \text{ Stk/h}$$

**Ergebnis:**  $\phi_{tech\_analyt} = 129,6 \text{ Stk/h}$

**Ergebnis:**  $\phi_{tech\_sim} = 126,3 \text{ Stk/h}$



## Anlagenkonfiguration 2



FS1, FS2, FS3, PS, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	0,97
PS	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	ausreichend

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{I,0} = \prod_{i=1}^4 \eta_i = 0,98 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,98 = 0,864$$

$$\eta_{II,0} = \prod_{i=6}^7 \eta_i = 0,94 \cdot 0,95 = 0,893$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,864 \cdot 0,97} = 119,2 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{II,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,893 \cdot 0,97} = 115,4 \text{ Stk/h}$$

## Simulation

## Eingabeparameter:

Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P2	0,97	60	1920
PS	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

## Simulationsergebnis:

 $\phi_{I,tech} = 118,5 \text{ Stk/h}$  (vor Puffer P2) $\phi_{II,tech} = 114,6 \text{ Stk/h}$  (nach Puffer P2)

**Ergebnis:**  $\phi_{I,tech\_analyt} = 119,2 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_analyt} = 115,4 \text{ Stk/h}$

**Ergebnis:**  $\phi_{I,tech\_sim} = 118,5 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_sim} = 114,6 \text{ Stk/h}$

## Anlagenkonfiguration 3



FS1, FS2, FS3, PS, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	0,97
PS	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	beschränkt

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{I,0} = \prod_{i=1}^4 \eta_i = 0,98 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,98 = 0,864$$

$$\eta_{II,0} = \prod_{i=6}^7 \eta_i = 0,94 \cdot 0,95 = 0,893$$

$$f = 1 - e^{-\beta \cdot x} = 1 - e^{-\frac{1}{30} \cdot 30} = 0,63$$

$$\eta_{I,K} = \eta_{I,0} + f(1 - \eta_{I,0}) = 0,949$$

$$\eta_{II,K} = \eta_{II,0} + f(1 - \eta_{II,0}) = 0,960$$

$$\eta_{I,KP} = \eta_{I,K} \cdot \eta_{P,2} = 0,921$$

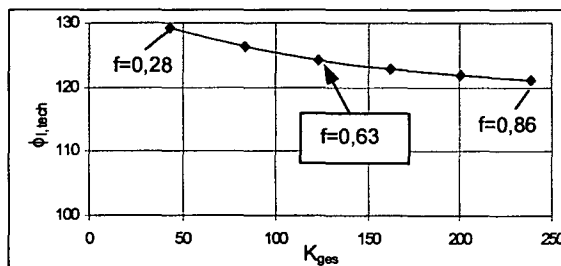
$$\eta_{II,KP} = \eta_{II,K} \cdot \eta_{P,2} = 0,931$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{II,KP}} = 124,2 \text{ STK/h}$$

$$K_I = x \cdot \phi_{I,tech} = 30 \cdot \frac{124,2}{60} = 62$$

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,KP} \cdot \eta_{II,0}} = 121,5 \text{ STK/h}$$

$$K_{II} = x \cdot \phi_{II,tech} = 30 \cdot \frac{121,5}{60} = 61 \quad K_{ges} = 123$$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_analyt} = 124,2 \text{ Stk/h}$  $\phi_{II,tech\_analyt} = 121,5 \text{ Stk/h}$ bei  $K_{ges}=123$  ( $f=0,63$ )

## Simulation

## Eingabeparameter:

## Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P2	0,97	60	1920
PS	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

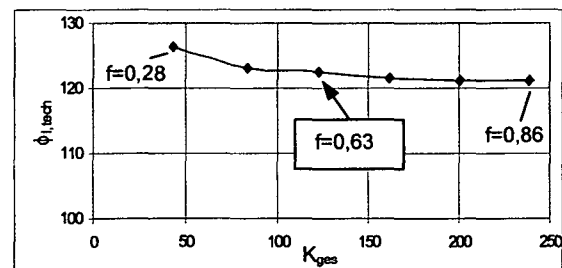
## Pufferkapazität:

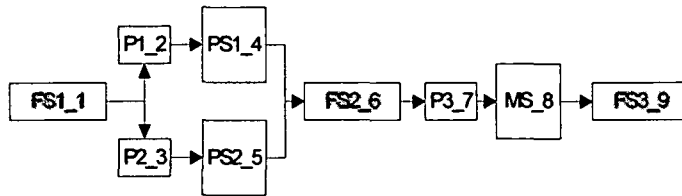
x in min	10	20	30	40	50	60
$K_{ges}$ in Stk	43	84	123	162	200	239

Simulationsergebnis für  $K_{ges} = 123$  ( $f=0,63$ ):

$$\phi_{I,tech} = 123,1 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = 120,4 \text{ Stk/h}$$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_sim} = 123,1 \text{ Stk/h}$  $\phi_{II,tech\_sim} = 120,4 \text{ Stk/h}$

**Anlagenkonfiguration 4**

FS1, FS2, FS3, PS1, PS2, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	1
PS1	0,90
PS2	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	1

**Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels****Berechnungsverfahren**

$$\eta_4 = \eta_5 = \frac{1}{1 + \delta} = 0,9 \Rightarrow \delta = 0,111$$

$$\eta_{45} = \frac{1 + \delta}{1 + \delta + \delta^2} = 0,989$$

$$\eta_{ges} = \prod \eta_i = 0,98 \cdot 0,989 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 0,94 \cdot 0,95 = 0,848$$

$$\phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0,848} = 117,9 \text{ Stk/h}$$

**Simulation****Eingabeparameter:**

Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
PS1	0,90	20	180
PS2	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

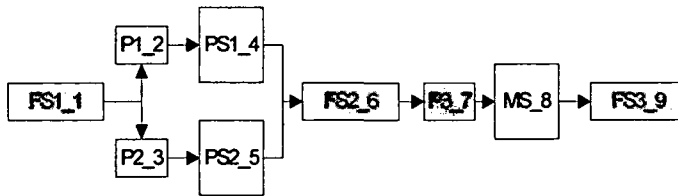
Simulationsdauer : T = 100000 min

**Simulationsergebnis:**

$$\phi_{tech} = 116,2 \text{ Stk/h}$$

**Ergebnis:**  $\phi_{tech\_analyt} = 117,9 \text{ Stk/h}$ **Ergebnis:**  $\phi_{tech\_sim} = 116,2 \text{ Stk/h}$

## Anlagenkonfiguration 5



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	0,97
PS	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	ausreichend

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{45} = 0,989$$

$$\eta_{I,0} = \prod \eta_i = 0,98 \cdot 0,989 \cdot 0,98 = 0,949$$

$$\eta_{II,0} = \prod \eta_i = 0,94 \cdot 0,95 = 0,893$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,949 \cdot 0,97} = 108,6 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{II,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,894 \cdot 0,97} = 115,3 \text{ Stk/h}$$

## Simulation

## Eingabeparameter:

Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P3	0,97	60	1920
PS1	0,90	20	180
PS2	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

## Simulationsergebnis:

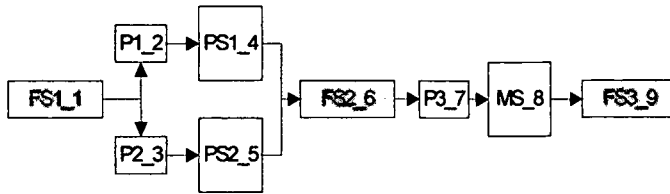
$$\phi_{I,tech} = 107,2 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = 114,6 \text{ Stk/h}$$

**Ergebnis:**  $\phi_{I,tech\_analyt} = 108,6 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_analyt} = 115,3 \text{ Stk/h}$

**Ergebnis:**  $\phi_{I,tech\_sim} = 107,2 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_sim} = 114,6 \text{ Stk/h}$

## Anlagenkonfiguration 6



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

## Verfügbarkeit

FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	0,97
PS	0,90
MS	0,94

## Pufferkapazität

P1	1
P2	1
P3	beschränkt

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{45} = 0,989$$

$$\eta_{I,0} = \prod \eta_i = 0,98 \cdot 0,989 \cdot 0,98 = 0,949$$

$$\eta_{II,0} = \prod \eta_i = 0,94 \cdot 0,95 = 0,893$$

$$f = 1 - e^{-\beta \cdot x} = 1 - e^{-\frac{1}{30} \cdot 30} = 0,63$$

$$\eta_{I,K} = \eta_{I,0} + f(1 - \eta_{I,0}) = 0,981$$

$$\eta_{II,K} = \eta_{II,0} + f(1 - \eta_{II,0}) = 0,960$$

$$\eta_{I,KP} = \eta_{I,K} \cdot \eta_{P,3} = 0,952$$

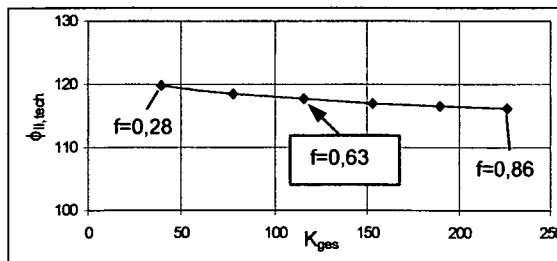
$$\eta_{II,KP} = \eta_{II,K} \cdot \eta_{P,3} = 0,931$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{II,KP}} = 113,2 \text{ Stk/h}$$

$$K_I = x \cdot \phi_{I,tech} = 30 \cdot \frac{113,2}{60} = 57$$

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,KP} \cdot \eta_{II,0}} = 117,6 \text{ Stk/h}$$

$$K_{II} = x \cdot \phi_{II,tech} = 30 \cdot \frac{117,6}{60} = 59 \quad K_{ges} = 116$$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_analyt} = 113,2 \text{ Stk/h}$  $\phi_{II,tech\_analyt} = 117,6 \text{ Stk/h}$ bei  $K_{ges}=116$  ( $f=0,63$ )

## Simulation

## Eingabeparameter:

Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P3	0,97	60	1920
PS1	0,90	20	180
PS2	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

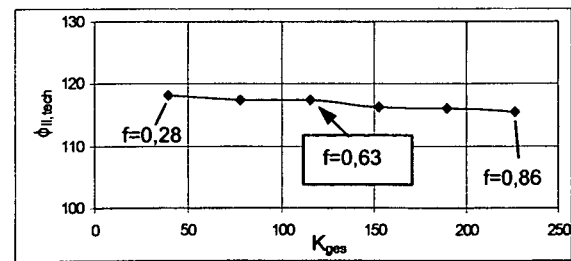
Pufferkapazität:

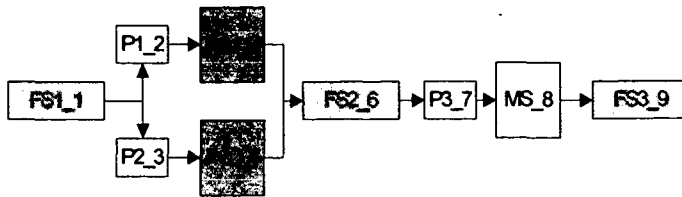
x in min	10	20	30	40	50	60
K <sub>ges</sub> in Stk	40	78	116	153	190	227

Simulationsergebnis für  $K_{ges} = 116$  ( $f=0,63$ ):

$$\phi_{I,tech} = 112,6 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = 116,2 \text{ Stk/h}$$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_sim} = 112,6 \text{ Stk/h}$  $\phi_{II,tech\_sim} = 116,2 \text{ Stk/h}$

**Anlagenkonfiguration 7**

FS1, FS2, FS3, PS1, PS2, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	1
PS1	0,90 (VL)
PS2	0,90 (VL)
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	1

**Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels****Berechnungsverfahren**

$$\beta_4 = \beta_5 = \beta = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{20} = 0,05$$

$$\alpha_{HL} = \frac{1}{MTBF_{HL}} = \frac{1}{540} = 0,00185$$

$$\alpha_{VL} = \frac{1}{MTBF_{VL}} = \frac{1}{180} = 0,00555$$

$$\delta_{HL} = \frac{\alpha_{HL}}{\beta} = 0,037$$

$$\delta_{VL} = \frac{\alpha_{VL}}{\beta} = 0,111$$

$$\eta_{45} = \frac{1 + 2 \cdot \delta_{HL}}{1 + 2 \cdot \delta_{HL} + 2 \cdot \delta_{HL} \cdot \delta_{VL}} = 0,992$$

$$\eta_{ges} = \prod \eta_i = 0,98 \cdot 0,992 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 0,94 \cdot 0,95 = 0,851$$

$$\phi_{tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{ges}} = \frac{100}{0,851} = 117,5 \text{ Stk/h}$$

**Simulation****Eingabeparameter:****Störungen:**

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
PS1	0,90	20	180/540
PS2	0,90	20	180/540
MS	0,94	30	470

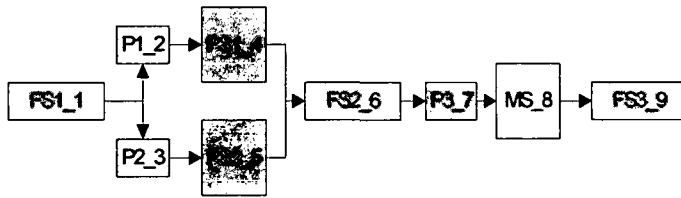
Simulationsdauer : T = 100000 min

**Simulationsergebnis:**

$$\phi_{tech} = 115,9 \text{ Stk/h}$$

**Ergebnis:**  $\phi_{tech\_analyt} = 117,5 \text{ Stk/h}$ **Ergebnis:**  $\phi_{tech\_sim} = 115,9 \text{ Stk/h}$

## Anlagenkonfiguration 8



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

## Verfügbarkeit

FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	0,97
PS1	0,90 (VL)
PS2	0,90 (VL)
MS	0,94

## Pufferkapazität

P1	1
P2	1
P3	ausreichend

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{45} = 0,992$$

$$\eta_{I,0} = \prod \eta_i = 0,98 \cdot 0,992 \cdot 0,98 = 0,953$$

$$\eta_{II,0} = \prod \eta_i = 0,94 \cdot 0,95 = 0,893$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,953 \cdot 0,97} = 108,2 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{II,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,894 \cdot 0,97} = 115,3 \text{ Stk/h}$$

## Simulation

## Eingabeparameter:

## Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P3	0,97	60	1920
PS1	0,90	20	180/540
PS2	0,90	20	180/540
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

## Simulationsergebnis:

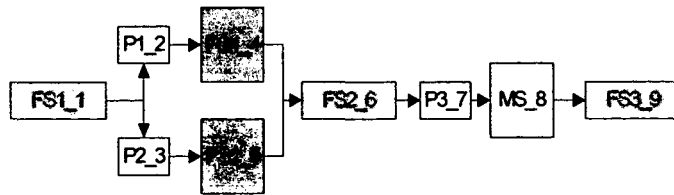
$$\phi_{I,tech} = 107,6 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = 116 \text{ Stk/h}$$

**Ergebnis:**  $\phi_{I,tech\_analyt} = 108,2 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_analyt} = 115,3 \text{ Stk/h}$

**Ergebnis:**  $\phi_{I,tech\_sim} = 107,6 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_sim} = 116 \text{ Stk/h}$

## Anlagenkonfiguration 9



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2, MS ... DETERMINISTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	0,97
PS1	0,90 (VL)
PS2	0,90 (VL)
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	beschränkt

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{45} = 0,992$$

$$\eta_{I,0} = \prod \eta_i = 0,98 \cdot 0,992 \cdot 0,98 = 0,952$$

$$\eta_{II,0} = \prod \eta_i = 0,94 \cdot 0,95 = 0,893$$

$$f = 1 - e^{-\beta \cdot x} = 1 - e^{-\frac{1}{30} \cdot 30} = 0,63$$

$$\eta_{I,K} = \eta_{I,0} + f(1 - \eta_{I,0}) = 0,982$$

$$\eta_{II,K} = \eta_{II,0} + f(1 - \eta_{II,0}) = 0,960$$

$$\eta_{I,KP} = \eta_{I,K} \cdot \eta_{P,3} = 0,952$$

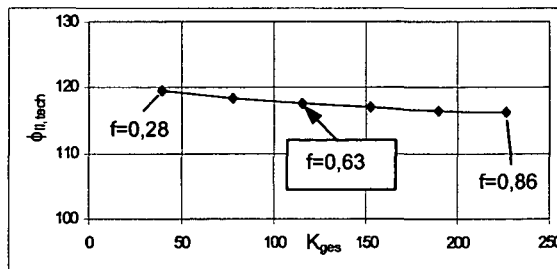
$$\eta_{II,KP} = \eta_{II,K} \cdot \eta_{P,3} = 0,931$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{II,KP}} = 112,8 \text{ Stk/h}$$

$$K_I = x \cdot \phi_{I,tech} = 30 \cdot \frac{112,8}{60} = 57$$

$$\phi_{II,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,KP} \cdot \eta_{II,0}} = 117,6 \text{ Stk/h}$$

$$K_{II} = x \cdot \phi_{II,tech} = 30 \cdot \frac{117,6}{60} = 59 \quad K_{ges} = 116$$



## Simulation

## Eingabeparameter:

## Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P3	0,97	60	1920
PS1	0,90	20	180/540
PS2	0,90	20	180/540
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

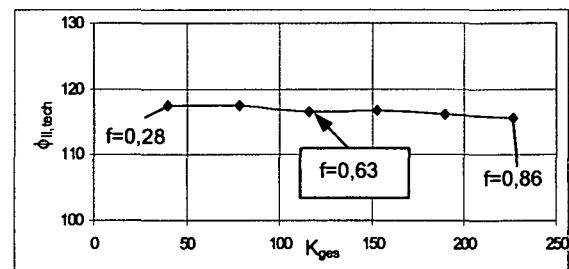
## Pufferkapazität:

x in min	10	20	30	40	50	60
K_ges in Stk	40	78	116	153	190	227

## Simulationsergebnis für K\_ges = 116 (f=0,63):

$$\phi_{I,tech} = 111,9 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = 116,5 \text{ Stk/h}$$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_analyt} = 112,8 \text{ Stk/h}$ 

$$\phi_{II,tech\_analyt} = 117,6 \text{ Stk/h}$$

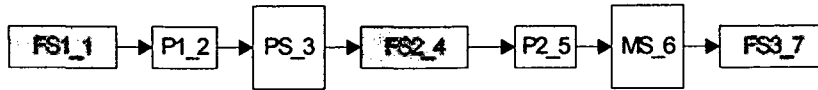
bei K\_ges=116 (f=0,63)

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_sim} = 111,9 \text{ Stk/h}$ 

$$\phi_{II,tech\_sim} = 116,5 \text{ Stk/h}$$



## Anlagenkonfiguration 10



FS1, FS2, FS3, PS ... DETERMINISTISCH

MS ... STOCHASTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0.98
FS2	0.98
FS3	0.95
P1	1
P2	1
PS	0.90
MS	0.94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

Die in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungsverfahren sind, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht anwendbar !

## Simulation

## Eingabeparameter:

## Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0.98	15	735
FS2	0.98	15	735
FS3	0.95	30	570
PS	0.90	20	180
MS	0.94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

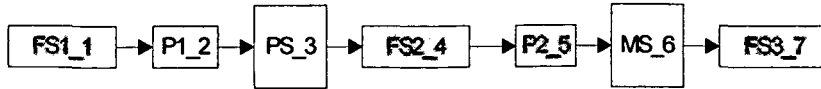
## Simulationsergebnis:

$$\phi_{tech} = 163,9 \text{ Stk / h}$$

Ergebnis: \_\_\_\_\_

Ergebnis:  $\phi_{tech\_sim} = 163,9 \text{ Stk / h}$

## Anlagenkonfiguration 11



FS1, FS2, FS3, PS ... DETERMINISTISCH      MS ... STOCHASTISCH  
 FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	0,97
PS	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	ausreichend

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{I,0} = \prod_{i=1}^4 \eta_i = 0,98 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,98 = 0,864$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,864 \cdot 0,97} = 119,2 \text{ Stk/h}$$

Der erforderliche technische Durchsatz des Anlagenteiles II kann mit den Berechnungsverfahren nach Kapitel 4, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht bestimmt werden !

## Simulation

## Eingabeparameter:

## Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P2	0,97	60	1920
PS	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

## Simulationsergebnis:

$$\phi_{I,tech} = 118,4 \text{ Stk/h}$$

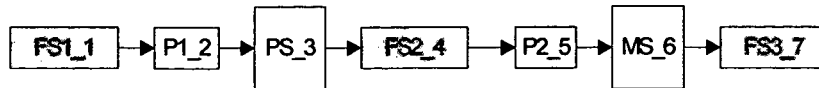
$$\phi_{II,tech} = 153,6 \text{ Stk/h}$$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_analyt} = 119,2 \text{ Stk/h}$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_sim} = 118,4 \text{ Stk/h}$

$$\phi_{II,tech\_sim} = 153,6 \text{ Stk/h}$$

## Anlagenkonfiguration 12



FS1, FS2, FS3, PS ... DETERMINISTISCH

MS ... STOCHASTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0.98
FS2	0.98
FS3	0.95
P1	1
P2	0.97
PS	0.90
MS	0.94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	beschränkt

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

Die in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungsverfahren sind, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht anwendbar !

## Simulation

## Eingabeparameter:

Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0.98	15	735
FS2	0.98	15	735
FS3	0.95	30	570
P2	0.97	60	1920
PS	0.90	20	180
MS	0.94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

Pufferkapazität:  $K_{ges} = 123$ 

## Simulationsergebnis:

$$\phi_{I,tech} = 129,4 \text{ Stk/h}$$

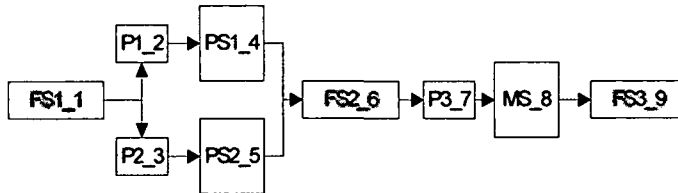
$$\phi_{II,tech} = 155,8 \text{ Stk/h}$$

## Ergebnis:

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_sim} = 129,4 \text{ Stk/h}$ 

$$\phi_{II,tech\_sim} = 155,8 \text{ Stk/h}$$

## Anlagenkonfiguration 13



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2 ... DETERMINISTISCH MS ... STOCHASTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	1
PS1	0,90
PS2	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	1

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

Die in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungsverfahren sind, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht anwendbar !

## Simulation

## Eingabeparameter:

## Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
PS1	0,90	20	180
PS2	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

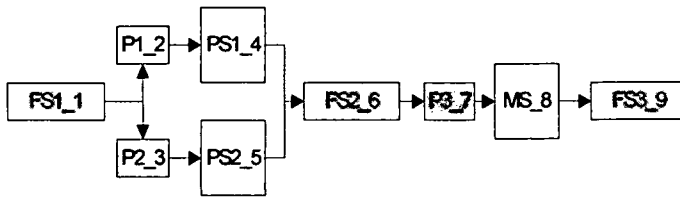
Simulationsdauer : T = 100000 min

## Simulationsergebnis:

$$\phi_{tech} = 153,8 \text{ Stk} / h$$

Ergebnis: \_\_\_\_\_

Ergebnis:  $\phi_{tech\_sim} = 153,8 \text{ Stk} / h$

**Anlagenkonfiguration 14**

FS1, FS2, FS3, PS1, PS2 ... DETERMINISTISCH MS ... STOCHASTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	0,97
PS	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	ausreichend

**Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels****Berechnungsverfahren**

$$\eta_{45} = 0,989$$

$$\eta_{I,0} = \prod \eta_i = 0,98 \cdot 0,989 \cdot 0,98 = 0,949$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,949 \cdot 0,97} = 108,6 \text{ Stk/h}$$

**Der erforderliche technische Durchsatz des Anlagenteiles II kann mit den Berechnungsverfahren nach Kapitel 4, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht bestimmt werden !**

**Simulation****Eingabeparameter:****Störungen:**

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P3	0,97	60	1920
PS1	0,90	20	180
PS2	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

**Simulationsergebnis:**

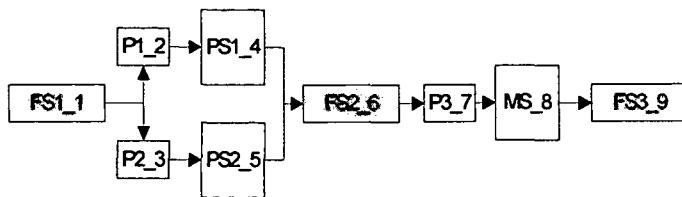
$$\phi_{I,tech} = 107,6 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = 150,9 \text{ Stk/h}$$

**Ergebnis:**  $\phi_{I,tech\_analyt} = 108,6 \text{ Stk/h}$ 

**Ergebnis:**  $\phi_{I,tech\_sim} = 107,6 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_sim} = 150,9 \text{ Stk/h}$

## Anlagenkonfiguration 15



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2 ... DETERMINISTISCH MS ... STOCHASTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	0,97
PS	0,90
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	beschränkt

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

Die in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungsverfahren sind, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht anwendbar!

## Simulation

## Eingabeparameter:

Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P3	0,97	60	1920
PS1	0,90	20	180
PS2	0,90	20	180
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

Pufferkapazität:  $K_{ges} = 116$

## Simulationsergebnis:

$$\phi_{I,tech} = 114 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = 152,3 \text{ Stk/h}$$

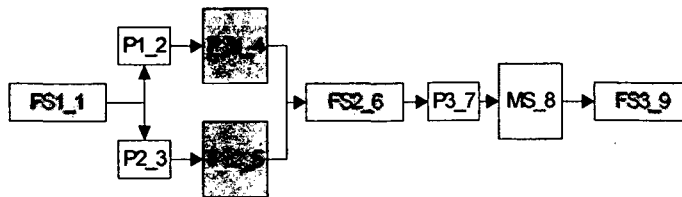
## Ergebnis:

\_\_\_\_\_

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_sim} = 114 \text{ Stk/h}$

$$\phi_{II,tech\_sim} = 152,3 \text{ Stk/h}$$

## Anlagenkonfiguration 16



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2 ... DETERMINISTISCH MS ... STOCHASTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0.98
FS2	0.98
FS3	0.95
P1	1
P2	1
P3	1
PS1	0.90 (VL)
PS2	0.90 (VL)
MS	0.94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	1

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

Die in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungsverfahren sind, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht anwendbar !

## Simulation

## Eingabeparameter:

## Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
PS1	0,90	20	180/540
PS2	0,90	20	180/540
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

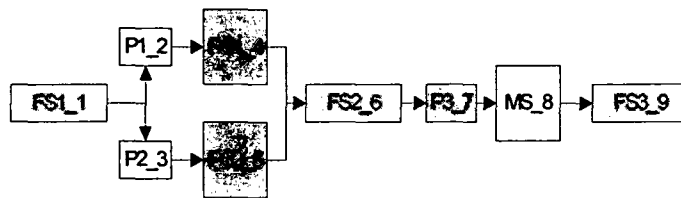
## Simulationsergebnis:

$$\phi_{tech} = 152,9 \text{ Stk/h}$$

Ergebnis: \_\_\_\_\_

Ergebnis:  $\phi_{tech\_sim} = 152,9 \text{ Stk/h}$

## Anlagenkonfiguration 17



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2 ... DETERMINISTISCH MS ... STOCHASTISCH  
 FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	0,97
PS1	0,90 (VL)
PS2	0,90 (VL)
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	ausreichend

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

$$\eta_{45} = 0,992$$

$$\eta_{I,0} = \prod \eta_i = 0,98 \cdot 0,992 \cdot 0,98 = 0,953$$

$$\phi_{I,tech} = \frac{\phi_{soll}}{\eta_{I,0} \cdot \eta_{p,2}} = \frac{100}{0,953 \cdot 0,97} = 108,2 \text{ Stk/h}$$

Der erforderliche technische Durchsatz des Anlagenteiles II kann mit den Berechnungsverfahren nach Kapitel 4, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht bestimmt werden !

## Simulation

## Eingabeparameter:

## Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P3	0,97	60	1920
PS1	0,90	20	180/540
PS2	0,90	20	180/540
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

## Simulationsergebnis:

$$\phi_{I,tech} = 107,8 \text{ Stk/h}$$

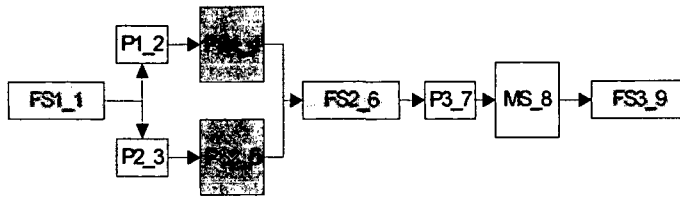
$$\phi_{II,tech} = 151,9 \text{ Stk/h}$$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_analyt} = 108,2 \text{ Stk/h}$

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_sim} = 107,8 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_sim} = 151,9 \text{ Stk/h}$



## Anlagenkonfiguration 18



FS1, FS2, FS3, PS1, PS2 ... DETERMINISTISCH MS ... STOCHASTISCH

FS...Fördersystem / P...Puffer / PS...Produktionssystem / MS...Montagesystem

	Verfügbarkeit
FS1	0,98
FS2	0,98
FS3	0,95
P1	1
P2	1
P3	0,97
PS1	0,90 (VL)
PS2	0,90 (VL)
MS	0,94
	Pufferkapazität
P1	1
P2	1
P3	beschränkt

## Ermittlung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels

## Berechnungsverfahren

Die in Kapitel 4 vorgestellten Berechnungsverfahren sind, aufgrund des stochastischen Montageprozesses, nicht anwendbar !

## Simulation

## Eingabeparameter:

Störungen:

	Verfügbarkeit	MTTR in min	MTBF in min
FS1	0,98	15	735
FS2	0,98	15	735
FS3	0,95	30	570
P3	0,97	60	1920
PS1	0,90	20	180/540
PS2	0,90	20	180/540
MS	0,94	30	470

Simulationsdauer : T = 100000 min

Pufferkapazität:  $K_{ges} = 116$

## Simulationsergebnis:

$$\phi_{I,tech} = 112,6 \text{ Stk/h}$$

$$\phi_{II,tech} = 152,7 \text{ Stk/h}$$

## Ergebnis:

\_\_\_\_\_

Ergebnis:  $\phi_{I,tech\_sim} = 112,6 \text{ Stk/h}$   
 $\phi_{II,tech\_sim} = 152,7 \text{ Stk/h}$

### 10.2.3 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Im nachfolgenden Diagramm sind die Ergebnisse aller untersuchten Anlagenkonfigurationen zusammengefasst.

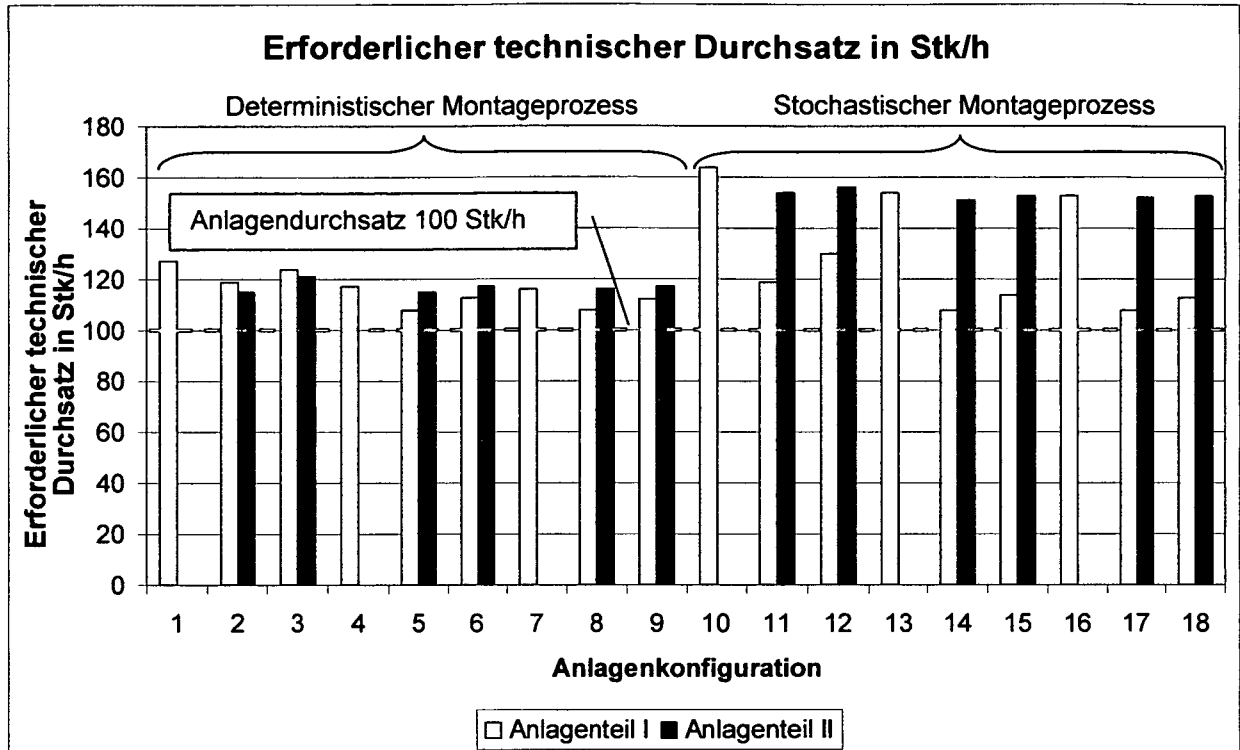


Abbildung 164: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse aller Anlagenkonfigurationen

Um die Ergebnisse zu überprüfen, wurden je Anlagenkonfiguration, mit den entsprechenden technischen Durchsätzen aus Abbildung 164, jeweils 5 Simulationsläufe durchgeführt. Die berechneten Konfidenzintervalle sind in Abbildung 165 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der geforderte Anlagendurchsatz von 100 Stk/h auch tatsächlich erreicht wird.

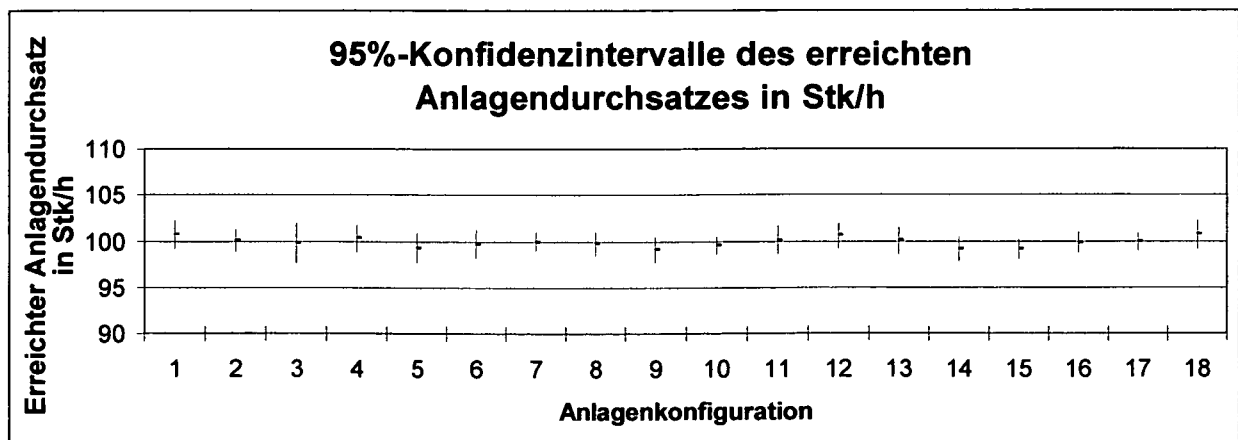


Abbildung 165: Erreichter Anlagendurchsatz für jede Anlagenkonfiguration

Aus Abbildung 164 ist erkennbar, dass sich für die Anlagenkonfigurationen 10 bis 18, bei denen ein stochastischer Montageprozess vorgesehen wurde, im Vergleich zu den Anlagen 1 bis 9 mit reinen Taktprozessen wesentliche höhere technische Durchsätze ergeben. Wie es zu diesen Durchsatzerhöhungen kommt, soll im folgenden Abschnitt erläutert werden. Hierfür wird immer eine Anlagenkonfiguration mit reinen Taktprozessen mit der entsprechenden Anlagenkonfiguration mit stochastischem Montageprozess verglichen.

### Vergleich der Anlagenkonfigurationen 1 und 10:

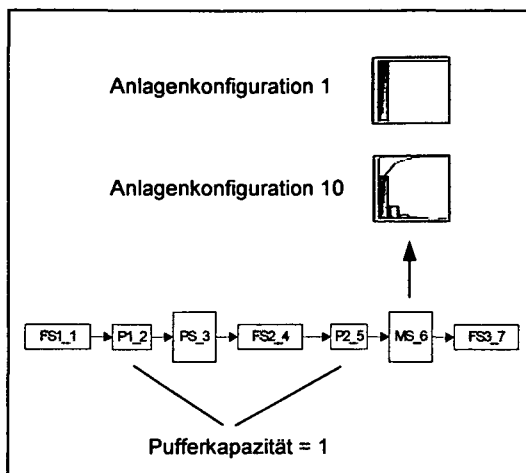


Abbildung 166: Anlagenkonfiguration 1 / 10

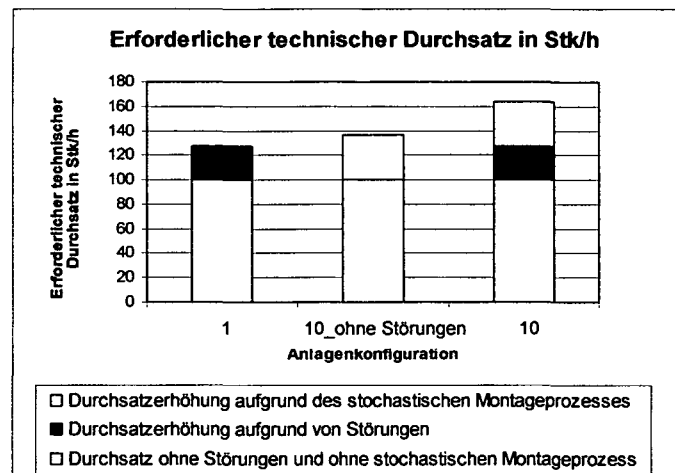


Abbildung 167: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 1 / 10

Die erforderliche Durchsatzerhöhung bei Anlagenkonfiguration 1, bei der alle Prozesse als Taktprozesse ausgeführt sind, wird durch die Störungen der einzelnen Elemente verursacht (siehe Abbildung 167).

Wird ein ungestörtes System mit stochastischem Montageprozess betrachtet (Anlagenkonfiguration 10\_ohne Störungen), so führt dies ebenfalls zu einer Erhöhung des erforderlichen technischen Durchsatzes.

Bei Anlagenkonfiguration 10 kommen beide Effekte zum Tragen, d.h. dass sich die Durchsatzerhöhung aus einem störungsbedingten und einem, durch einen stochastischen Prozess hervorgerufenen, Anteil zusammensetzt. Deshalb sind die, in Kapitel 4 angeführten Berechnungsverfahren nicht anwendbar.

In analoger Weise erklären sich die Durchsatzerhöhungen der Anlagenkonfigurationen 13 und 16, gegenüber den Anlagen 4 und 7. Bei diesen Anlagenkonfigurationen ist das Produktionssystem redundant ausgeführt (siehe nachfolgende Abbildungen).

### Vergleich der Anlagenkonfigurationen 4 und 13:

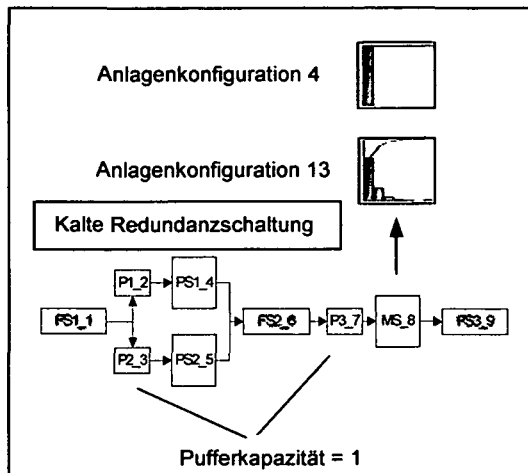


Abbildung 168: Anlagenkonfiguration 4 / 13

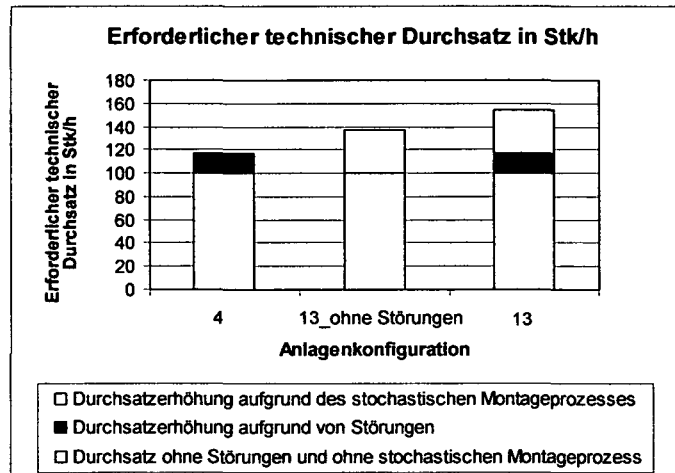


Abbildung 169: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 4 / 13

### Vergleich der Anlagenkonfigurationen 7 und 16:

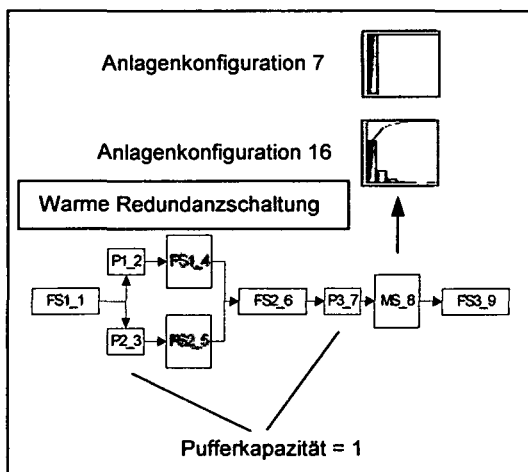


Abbildung 170: Anlagenkonfiguration 7 / 16

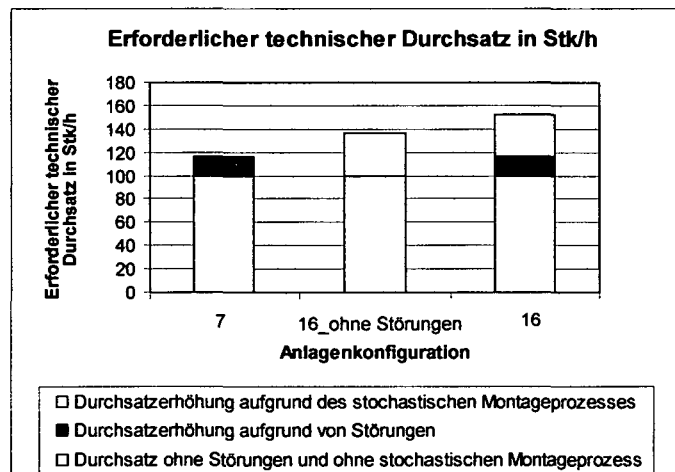


Abbildung 171: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 7 / 16

Aus Abbildung 164 kann ebenfalls entnommen werden, dass sich für die technischen Durchsätze im Anlagenteil II der Anlagenkonfigurationen 11, 14 und 17 im Vergleich zu den Anlagen 2, 5, und 8 wesentlich höhere Werte ergeben. Bei all diesen Konfigurationen ist jeweils ein ausreichend großer Puffer vor der Montagestation installiert. Würde man in den Anlagenkonfigurationen 11, 14 und 17 mit stochastischem Montageprozess auch einen ausreichend großen Puffer nach der Montagestation anordnen, würden die technischen Durchsätze im Anlagenteil II vergleichbare Werte annehmen, wie bei den Anlagen 2, 5 und 8. Dies soll auf der nachfolgenden Seite erläutert werden.

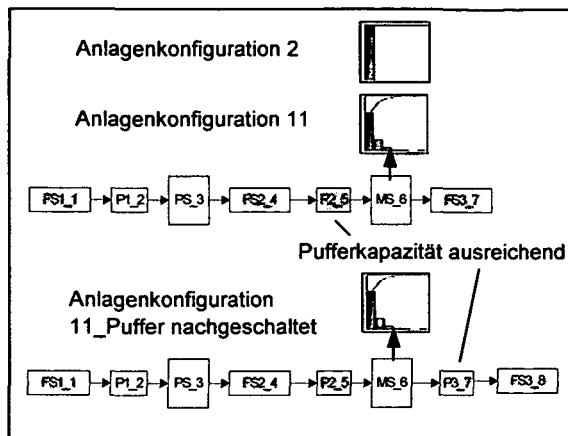
**Vergleich der Anlagenkonfigurationen 2 und 11:**

Abbildung 172: Anlagenkonfigurationen 2 / 11

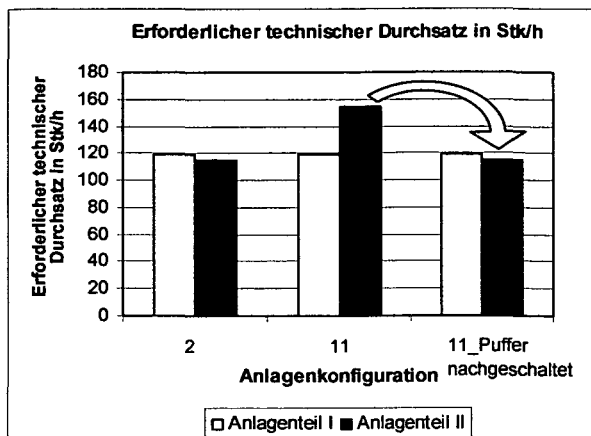


Abbildung 173: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 2 / 11

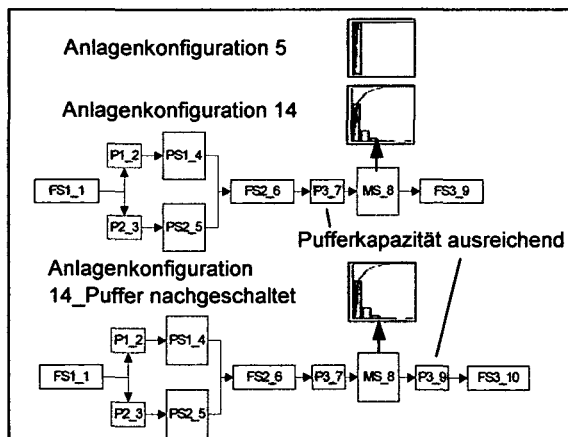
**Vergleich der Anlagenkonfigurationen 5 und 14:**

Abbildung 174: Anlagenkonfiguration 5 / 14

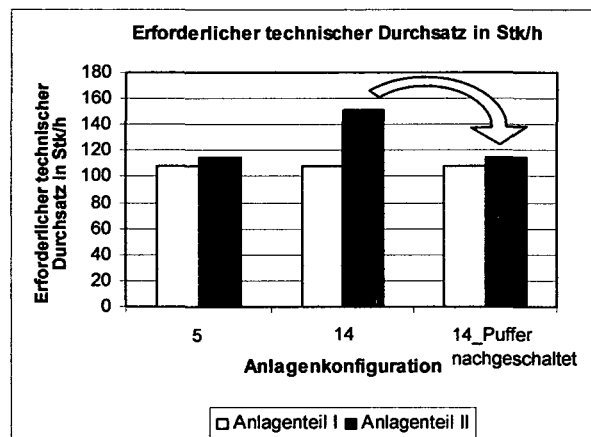


Abbildung 175: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 5 / 14

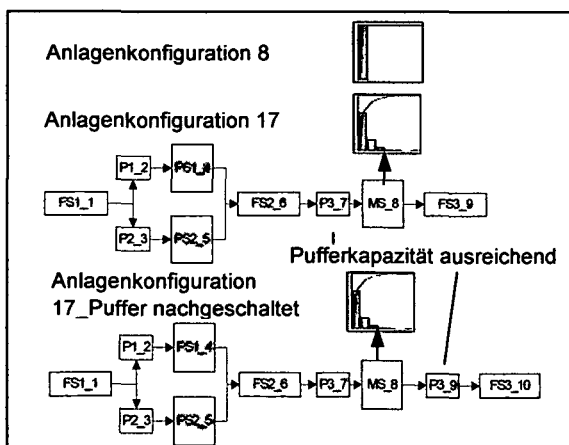
**Vergleich der Anlagenkonfigurationen 8 und 17:**

Abbildung 176: Anlagenkonfiguration 8 / 17

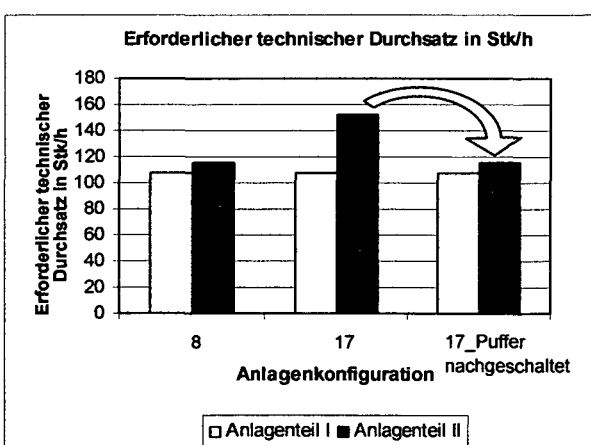


Abbildung 177: Ergebnisse der Anlagenkonfiguration 8 / 17

Schließlich soll noch der Einfluss der Pufferanordnung im Materialflusssystem auf den erforderlichen technischen Durchsatz der Elemente untersucht werden. Hierfür werden die Anlagenkonfigurationen 2 und 11 herangezogen. Bei diesen ist jeweils ein Puffer mit ausreichend großer Kapazität vor der Montagestation angeordnet. Mittels Simulation soll untersucht werden, welche Auswirkung das Anbringen eines ausreichend großen Puffers vor dem Produktionssystem auf den erforderlichen technischen Durchsatz hat.

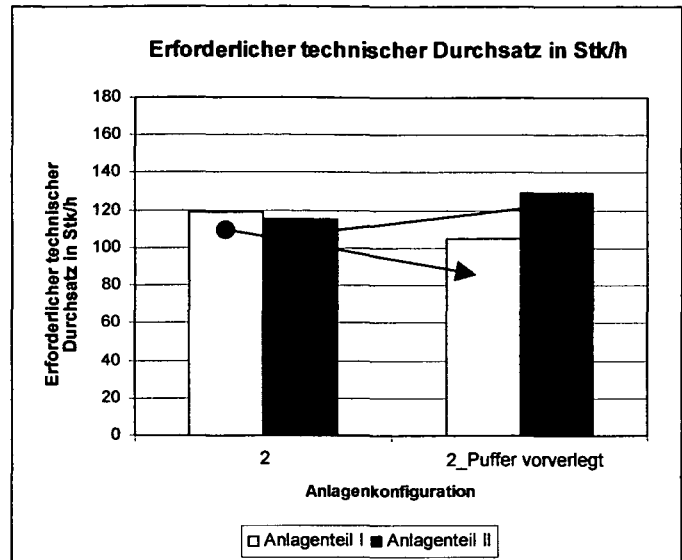
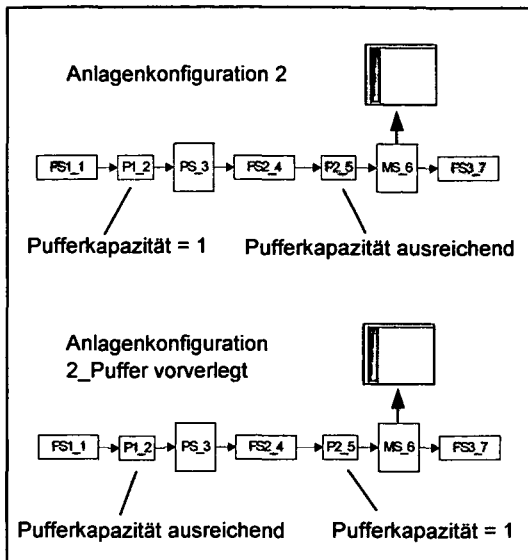


Abbildung 178: Anlagenkonfiguration 2

Abbildung 179: Ergebnisse Pufferanordnung 2

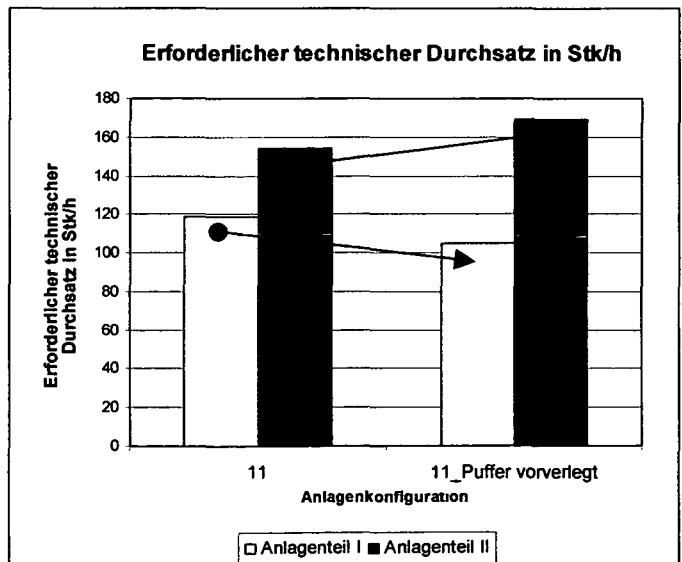
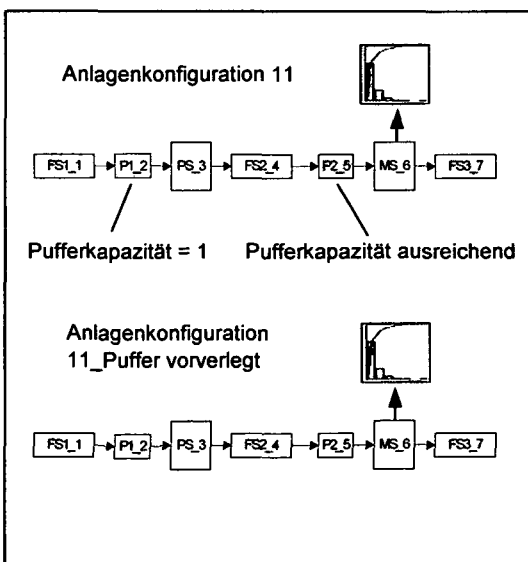


Abbildung 180: Anlagenkonfiguration 11

Abbildung 181: Ergebnisse Pufferanordnung 11

Aus den Abbildungen 179 und 181 geht hervor, dass sich durch das Vorverlegen des Puffers der erforderliche technische Durchsatz im Anlagenteil I verringert. Im Anlagenteil II wäre allerdings ein höherer technischer Durchsatz erforderlich.

## 11 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Planungswerkzeug entwickelt, mit dem es sowohl möglich ist „klassische“ Simulationsläufe durchzuführen, als auch den erforderlichen technischen Durchsatz von Materialflusselementen iterativ zu ermitteln, damit die Anlage an der Senke einen geforderten Durchsatz ausstößt. Dieses Tool basiert auf der diskreten Simulationstechnik. Als Simulationswerkzeug wurde das Simulationspaket Arena 7.01 Professional Edition gewählt.

Damit das Erstellen der Simulationsmodelle möglichst wenig Zeit in Anspruch nimmt, wurden Module entwickelt, die in einer Bibliothek abgelegt und somit immer wieder verwendet werden können. Dabei erfolgte die Programmierung der Computermodele mittels der Simulationssprache SIMAN, die in Arena eingebettet ist. Dies hat, gegenüber den bereits vordefinierten Arenakonstrukten, den Vorteil, dass nur jene Funktionen im Modell abgebildet werden, die unbedingt notwendig sind. Dadurch nimmt die Validationsphase weniger Zeit in Anspruch und die Rechenzeiten während der Simulation verkürzen sich.

Die entwickelten Module ermöglichen es, offene Materialflusssysteme in einem Computermodelel abzubilden und zu untersuchen. Dabei können Transportmittel, Bedienstationen, warme und kalte Redundanzschaltungen, sowie Puffer mit beschränkten Kapazitäten und Störungen aller Materialflussskomponenten berücksichtigt werden. Die Eingabe der Parameterwerte erfolgt in übersichtlich gestalteten Dialogboxen.

Damit die Versuchsplanung und -durchführung möglichst wenig Zeit in Anspruch nimmt, wurde ein VBA-Programm entwickelt, das den noch unbekannten Parameterwert (technischen Durchsatz) entsprechend einer Iterationsroutine solange variiert und an das Simulationsprogramm übergibt, bis die Ergebnisgröße (Anlagendurchsatz) innerhalb eines festgelegten Bereiches liegt. Die Ergebnisse werden dann an das Tabellenkalkulationsprogramm MS-Excel übergeben und aufbereitet.

Somit konnte ein sehr einfach zu handhabendes Planungsinstrument realisiert werden, mit dem es möglich ist, rasch den erforderlichen technischen Durchsatz von Materialflusselementen zu bestimmen.

In der Arbeit wird aber auch, in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3649 und 3978, ein einfaches Berechnungsverfahren vorgestellt, mit dem der erforderliche technische Durchsatz von Taktprozessen analytisch bestimmt werden kann. Des weiteren wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, mit dem die Auswirkung eines stochastischen Prozesses auf den erforderlichen technischen Durchsatz ermittelt werden kann.

Diese Verfahren wurden unter anderem für die Validation der Simulationsmodelle herangezogen.

Hierbei stellte sich heraus, dass sich bei bestimmten Anlagenkonfigurationen größere Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den Ergebnissen des Berechnungsverfahrens für Taktprozesse ergeben. Die Begründung dafür liegt darin, dass ein System untersucht wurde, bei dem, so wie in der Praxis üblich, vor jedem Element zumindest ein Pufferplatz für die Bereitstellung der Fördereinheiten zur Verfügung steht.

Diese Betriebsweise wurde im Simulationsmodell nachgebildet. Das Berechnungsverfahren geht hingegen von der Annahme aus, dass keine Bereitstellungsplätze vorhanden sind und bei Ausfall eines Elements sofort die gesamte Anlage stillsteht. Somit ergeben sich im Simulationsmodell im Vergleich zum Berechnungsverfahren höhere technische Durchsätze.

In weiteren Untersuchungen konnten jene Einflussgrößen auf den erforderlichen technischen Durchsatz in Systemen mit Bereitstellungsplätzen bestimmt werden, die bei der Anwendung des Berechnungsverfahrens keine Berücksichtigung finden. Dies sind Elementanzahl, Stördauer und theoretische Gesamtverfügbarkeit des Systems.

Für eine exakte Bestimmung des technischen Durchsatzes wäre somit eine Korrektur der analytischen Ergebnisse notwendig, wobei der Korrekturfaktor von den drei oben angeführten Größen abhängt. Die analytische Bestimmung dieses Korrekturfaktors schien durch die Komplexität der Einflüsse kaum möglich und wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Planungsinstruments wurde schließlich an einem Beispiel demonstriert. Es wurde ein Produktionssystem, das starr mit einer Montagestation verknüpft ist, untersucht. Die Aufgabe bestand darin, die erforderlichen technischen Durchsätze der Anlagenteile bei verschiedenen Anlagenkonfigurationen (mit und ohne Puffer, mit und ohne redundantem Produktionssystem, mit und ohne stochastischem Montageprozess,...) mittels Simulation zu bestimmen. Als Vergleich wurden die erforderlichen technischen Durchsätze auch mit dem vorgestellten Berechnungsverfahren ermittelt. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den analytisch gewonnenen Ergebnissen.

Aus den Ergebnissen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Soll in einem System der erforderliche technische Durchsatz reduziert werden, so können beispielsweise Elemente mit besonders schlechter technischer Verfügbarkeit redundant ausgeführt werden, d.h. dass diese Elemente durch kalte oder warme Redundanzen ersetzt werden. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und somit zu einer Verringerung des erforderlichen technischen Durchsatzes.
- Wird in einem System ein Puffer angeordnet, so kann dadurch der erforderliche technische Durchsatz sowohl im vorgelagerten, als auch im nachfolgenden Anlagenteil reduziert werden, da der Puffer Störzeiten überbrücken kann. Der erforderliche technische Durchsatz ist dabei von der Pufferkapazität abhängig.



- Ist in einem System ein stochastischer Prozess vorhanden, so würde ein vorgelagerter Puffer durch seine Überbrückungswirkung ebenfalls zu einer Verringerung des erforderlichen technischen Durchsatzes im davor liegenden Anlagenteil führen. Soll auch der technische Durchsatz im nachfolgenden Anlagenteil reduziert werden, müsste zusätzlich ein Puffer nach dem stochastischen Prozess angeordnet werden. Die erforderlichen technischen Durchsätze sind in diesem Fall von der Kapazität des vor- und nachgelagerten Puffers abhängig.
- Wird ein möglichst gleich großer technischer Durchsatz in beiden Anlagenteilen gewünscht, muss der Puffer so angeordnet werden, dass die Gesamtverfügbarkeit des vorgelagerten und nachfolgenden Anlagenteiles näherungsweise gleich groß sind. Wird der Puffer weiter nach vorne verlegt, würde dies eine Reduktion des erforderlichen technischen Durchsatzes im vorgelagerten Anlagenteil bewirken. Im nachfolgenden Anlagenabschnitt würde dies allerdings zu einer Erhöhung des technischen Durchsatzes führen.

Anhand dieses Beispiels konnte sehr anschaulich gezeigt werden, wie der erforderliche technische Durchsatz von Anlagenkomponenten beeinflusst werden kann. Abschließend seien noch einmal die wichtigsten Einflussgrößen zusammengefasst:

- Störungsverhalten der Materialflusselemente  
(Verteilungsfunktion der störungsfreien Zeiten und der Reparaturzeiten)
- Puffer (Pufferanordnung, Pufferkapazität)
- Verteilungsfunktionen der Prozesszeiten
- Systemstruktur (mit/ohne Redundanz)

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] VDI 3300: Materialfluss-Untersuchungen, Beuth-Vertrieb GmbH, 1959
- [2] VDI Berichte 833: Verfügbarkeit von Materialfluss-Systemen, VDI Verlag GmbH, 1990
- [3] Jünemann, R.: Materialfluss und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen, Springer-Verlag, 1989
- [4] Arnold, D. / Isermann, H. / Kuhn, A. / Tempelmeier, H.: Handbuch Logistik, Springer Verlag, 2002
- [5] Law, A. / Kelton, D.: Simulation Modeling and Analysis, McGraw-Hill, 2000
- [6] Pegden, C. D. / Shannon, R. E. / Sadowski, R. P.: Introduction to Simulation Using SIMAN, McGraw-Hill, 1990
- [7] Kelton, W. D. / Sadowski, R. P. / Sturrock D. T.: Simulation with Arena, McGraw-Hill, 2004
- [8] Banks, J. / Carson II, J. S. / Nelson, B. L. / Nicol, D. M.: Discrete-Event System Simulation, Prentice-Hall, 2001
- [9] Koether, R.: Technische Logistik, Carl Hanser Verlag, 1993
- [10] Tempelmeier, H.: Simulation mit SIMAN, Physica-Verlag Heidelberg, 1991
- [11] Arena Professional Reference Guide, Rockwell Software Inc., 2000
- [12] VDI 4004, Blatt4: Zuverlässigkeitskenngrößen – Verfügbarkeitskenngrößen, VDI Verlag GmbH, 1986
- [13] VDI 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen – Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung, Beuth Verlag GmbH, 1998
- [14] Gnedenko, B. W. / Kowalenko, I. N.: Einführung in die Bedienungstheorie, Akademie-Verlag Berlin, 1971
- [15] König, D. / Stoyan, D.: Methoden der Bedienungstheorie, Akademie-Verlag Berlin, 1976
- [16] Arnold, D.: Materialfluss in Logistiksystemen, 3. Auflage, Springer-Verlag, 2003
- [17] Gudehus, T.: Logistik 1 – Grundlagen, Verfahren und Strategien, Springer-Verlag, 2000

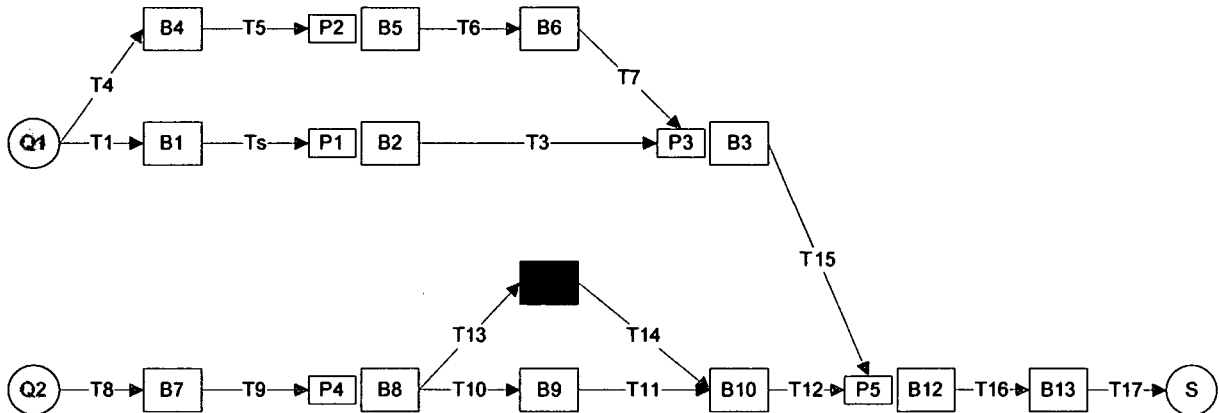
- [18] VDI 3649: Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme, Beuth Verlag GmbH, 1992
- [19] Birolini, A.: Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen, Springer-Verlag, 1997
- [20] Salzer, K. W.: Wie wichtig ist die Verfügbarkeit?, VDI Berichte 636 - Verfügbarkeit von Materialflusssystemen, VDI Verlag, 1987
- [21] VDI 3978: Durchsatz und Spielzeiten in Stückgut-Fördersystemen, Beuth Verlag GmbH, 1998
- [22] Spiegel, M. R.: Statistik – Überblick/Aufgaben, McGraw-Hill, 1985

## Anhang A

---

Illustrationsbeispiel

Mittels diskreter Simulation soll der Durchsatz des folgenden Materialflusssystems ermittelt werden:



Das Materialflusssystem setzt sich aus 17 Transportmitteln (T1 bis T17), 13 Bedienstationen (B1 bis B13) und 5 Puffern (P1 bis P5) zusammen, wobei jedes Element störungsbehaftet ist. Die Elemente B9 und B11 sind in Form einer kalten Redundanzschaltung miteinander verknüpft.

Es werden 3 Produkte gefertigt. Jedes Produkt durchläuft verschiedene Bedienstationen:

Produkt A : B4 → B5 → B6 → B3 → B12 → B13

Produkt B : B1 → B2 → B3 → B12 → B13

Produkt C : B7 → B8 → B6 → B9/B11 → B10 → B12 → B13

Die Eingabeparameter, bzw. Pufferkapazitäten wurden so gewählt, dass sich der Anlagendurchsatz auf die 3 Produkte folgendermaßen aufteilt:

Produkt A: 25 %

Produkt B: 25 %

Produkt C: 50 %

Aus den Tabellen auf der nachfolgenden Seite können die Parameter der einzelnen Elemente entnommen werden. Bis auf den Prozess B12 (Exponentialverteilung) sind alle Prozesse als Taktprozesse ausgeführt. Den störungsfreien Zeiten und Reparaturzeiten werden jeweils Exponentialverteilungen zugrunde gelegt.

	Technischer Durchsatz Stk/min	MTBF min	MTTR min	Verfügbarkeit %
T1	0,5	1250	25,5	98
T2	0,5	1800	18,2	99
T3	0,5	2100	21,2	99
T4	0,5	1250	25,5	98
T5	0,5	1800	18,2	99
T6	0,5	1800	18,2	99
T7	0,5	2100	21,2	99
T8	1	1800	18,2	99
T9	1	1800	18,2	99
T10	1	1250	25,5	98
T11	1	2100	21,2	99
T12	1	2100	21,2	99
T13	1	1250	25,5	98
T14	1	2100	21,2	99
T15	1	2100	21,2	99
T16	2,5	1800	18,2	99
T17	2,5	1800	18,2	99

Tabelle 35: Illustrationsbeispiel - Eingabeparameter Transportmittel

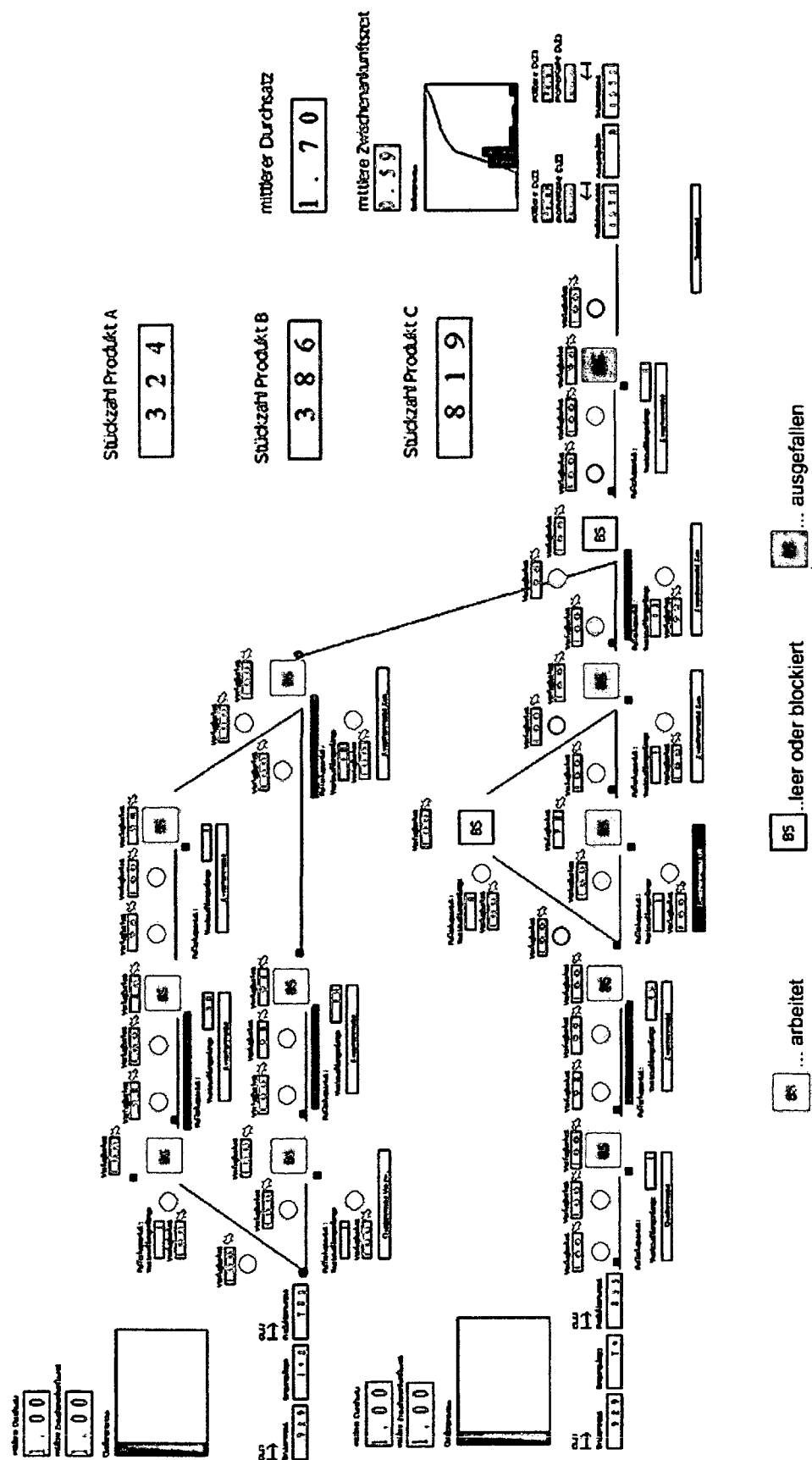
	Bediendauer min	MTBF min	MTTR min	Verfügbarkeit %
B1	2	3200	32,3	99
B2	2	2600	53,1	98
B3	1	1990	61,5	97
B4	2	3200	32,3	99
B5	2	1200	37,1	97
B6	2	3400	34,3	99
B7	1	3400	34,3	99
B8	1	2880	58,8	98
B9	1	3000	157,9	95
B10	1	2900	29,3	99
B11	1	3000	157,9	95
B12	EXPO(0,35)	1400	43,3	97
B13	0,35	2900	29,3	99

Tabelle 36: Illustrationsbeispiel - Eingabeparameter Bedienstationen

	Pufferkapazität Stk	MTBF min	MTTR min	Verfügbarkeit %
P1	15	1200	12,1	99
P2	20	1200	12,1	99
P3	20	1200	12,1	99
P4	15	1200	12,1	99
P5	20	1200	12,1	99

Tabelle 37: Illustrationsbeispiel - Eingabeparameter Puffer

Auf der nachfolgenden Seite ist ein Screenshot der Animationselemente des Simulationsmodells abgebildet (bei einer verstrichenen Simulationszeit von 1000 min).



Die Simulationsergebnisse für verschiedene Systemkonfigurationen werden einander in Tabelle 38 und in Abbildung 182 gegenübergestellt (Mittelwerte aus 5 Simulationsläufen bei einer Simulationslänge von jeweils 100.000 min).

	ohne Störungen	mit Störungen	ohne Puffer	mit Puffer	B12 Taktprozess	B12 Stochastischer Prozess	Durchsatz in Stk/h
Simulationsexperiment 1	x		x		x		120
Simulationsexperiment 2	x		x			x	111
Simulationsexperiment 3		x	x			x	100
Simulationsexperiment 4		x		x		x	107

Tabelle 38: Illustrationsbeispiel - Simulationsergebnisse

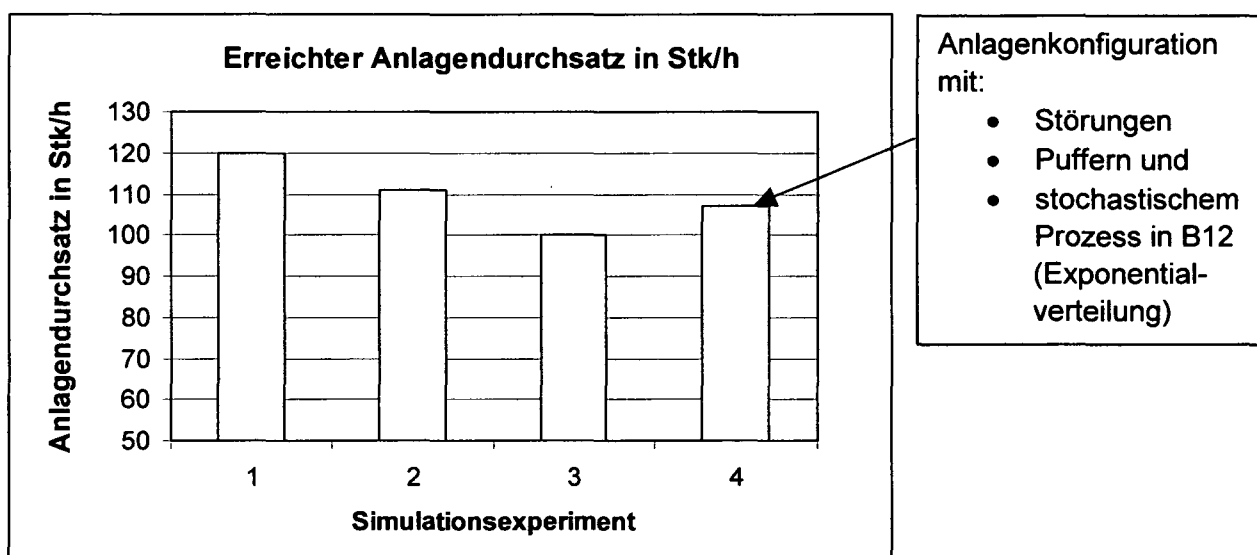


Abbildung 182: Illustrationsbeispiel – Simulationsergebnisse



## Anhang B

---

SIMAN - Submodelle

### Submodell 1 – Quelle:

Die Transaktionen werden erzeugt und mit Attributen versehen, um die Durchlaufzeiten und Zwischenankunftszeiten berechnen zu können. Es wird der mittlere Durchsatz erfasst und die Anzahl der in das System eintretenden Transaktionen gezählt. Des Weiteren wird jedem Entity ein Bild zugewiesen, um dieses in der Animation darstellen zu können.

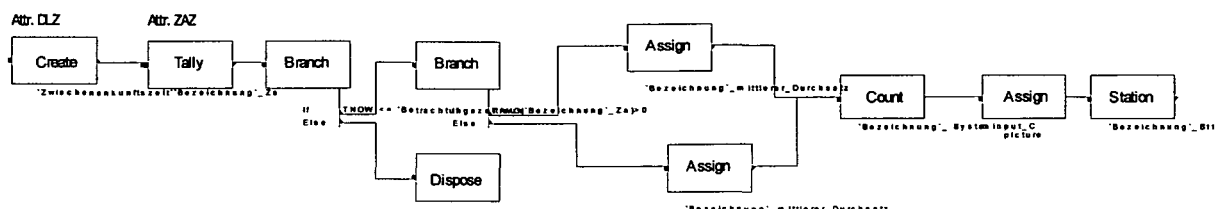


Abbildung 183: Submodell 1 – Quelle

### Submodell 2 – Conveyor Quellenmodul

Die Transaktionen treffen vor einem Conveyor-Fördermittel ein. Dieses wird belegt, wenn es frei ist. Ansonsten kommt es zu Wartezeiten in einer Queue (Eingangslager). Es wird die Anzahl der transportierten Einheiten erfasst und der Transport durchgeführt. Das Fördermittel wird erst wieder für den nächsten Transport frei gegeben, wenn die Anzahl der Fördereinheiten im Puffer der folgenden Bedienstation kleiner ist als die Pufferkapazität.

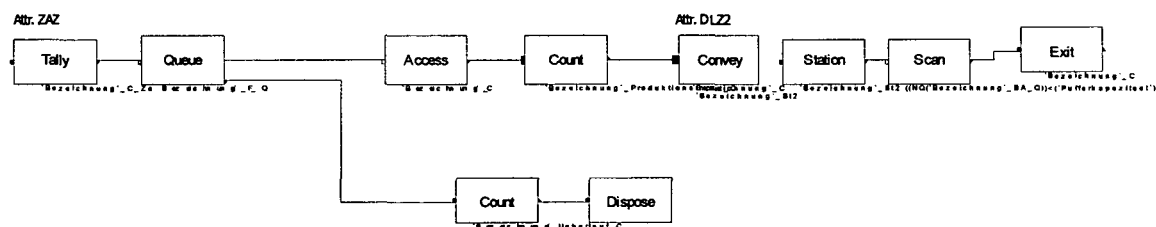


Abbildung 184: Submodell 2 – Conveyor Quellenmodul

### Submodell 3 – Bedienstation

Die Transaktionen werden mit Attributen versehen, um Durchlauf- und Wartezeiten erfassen zu können. Wenn die Bedienstation frei ist, wird diese belegt. Ansonsten kommt es zu Wartezeiten in einer Queue (Puffer).

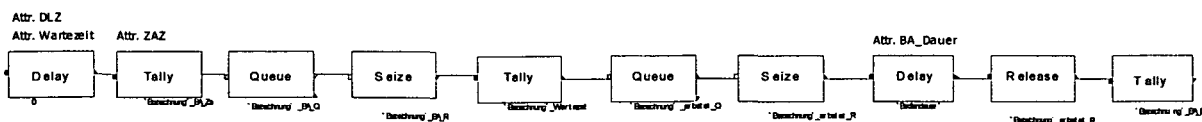
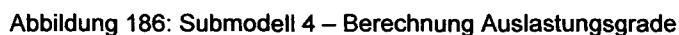


Abbildung 185: Submodell 3 - Bedienstation

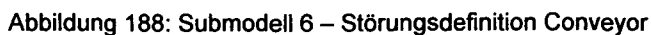
Es werden die Auslastungsgrade des Fördermittels und der Bedienstation berechnet (Quotient aus Transportdauer und Zwischenankunftszeit bzw. Quotient aus Bediendauer und Zwischenankunftszeit).



Es wird festgelegt, wie viele Transaktionen sich zu Beginn des Simulationslaufes in den Puffern befinden sollen, d.h. es wird eine bestimmte Anzahl von Transaktionen erzeugt, die dann in der entsprechenden Warteschlange (Puffer) eingefügt werden.



Es wird ein „Störungsentity“ erzeugt, das nach Ablauf der störungsfreien Zeit TBF den Conveyor abschaltet und nach der Reparaturzeit TTR diesen wieder einschaltet.



### Submodell 7 – Störungsdefinition Bedienstation

Die Störungsdefinition der Bedienstation erfolgt über das SIMAN-Element Failures.

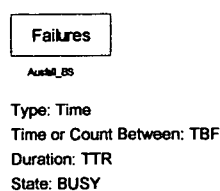


Abbildung 189: Submodell 7 – Störungsdefinition Bedienstation

### Submodell 8 – Berechnung Zeiten Conveyor

Es erfolgt die Aufsummierung der Zeiten, in denen der Conveyor leer, in Betrieb, blockiert oder ausgefallen ist.

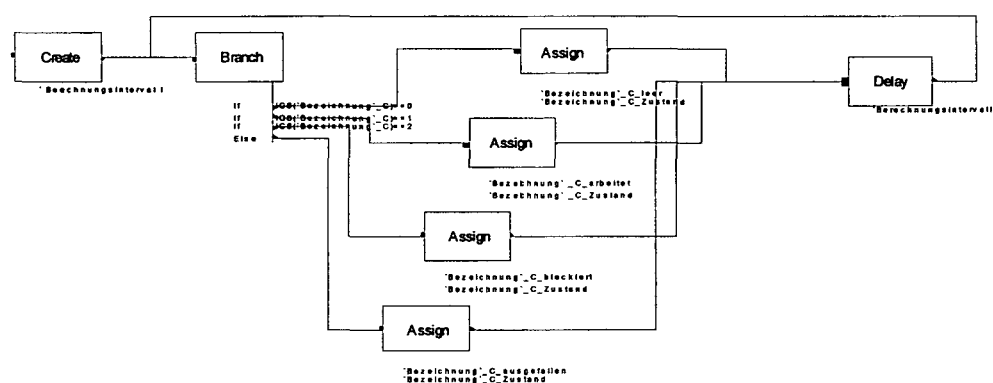


Abbildung 190: Submodell 8 – Berechnung Zeiten Conveyor

### Submodell 9 – Berechnung Zeiten Bedienstation

Es erfolgt die Aufsummierung der Zeiten, in denen die Bedienstation leer, in Betrieb, blockiert oder ausgefallen ist.

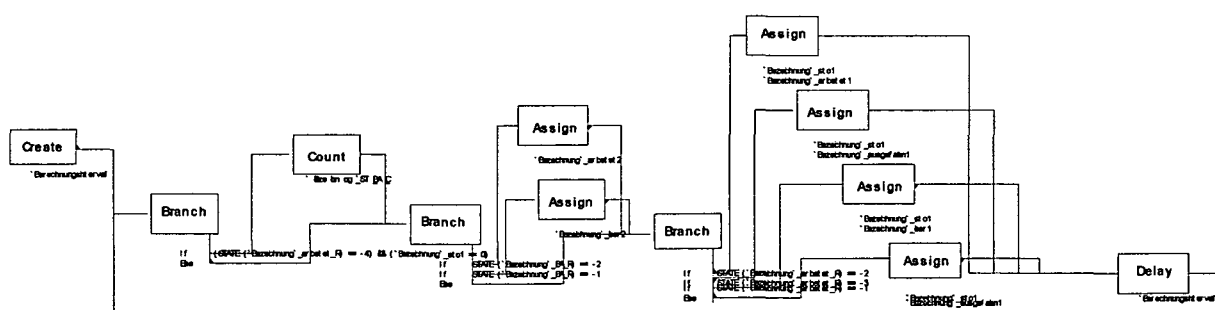


Abbildung 191: Submodell 9 – Berechnung Zeiten Bedienstation

### Submodell 10 – Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Conveyor

Es erfolgt die Berechnung der Zeitanteile (leer, arbeitet, blockiert, ausgefallen) in Prozent der Simulationsdauer und der technischen Verfügbarkeit des Conveyor-Fördermittels.

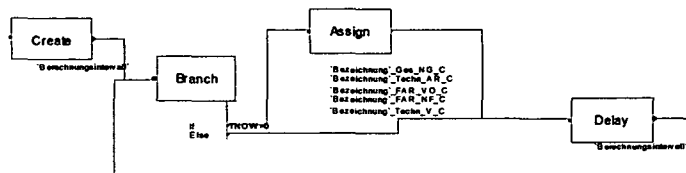


Abbildung 192: Submodell 10 – Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Conveyor

### Submodell 11 – Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Bedienstation

Es erfolgt die Berechnung der Zeitanteile (leer, arbeitet, blockiert, ausgefallen) in Prozent der Simulationsdauer und der technischen Verfügbarkeit der Bedienstation.

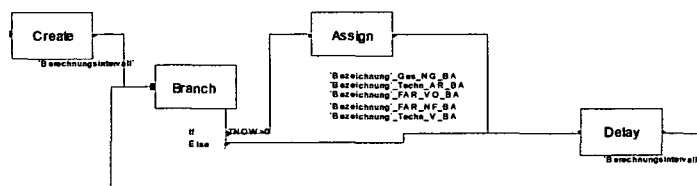


Abbildung 193: Submodell 11 – Berechnung Zeitanteile/Verfügbarkeit Bedienstation

### Submodell 12 – Berechnung Zeitanteile Puffer leer/voll

Es werden jene Zeiten aufsummiert, in denen der Puffer leer bzw. voll ist.

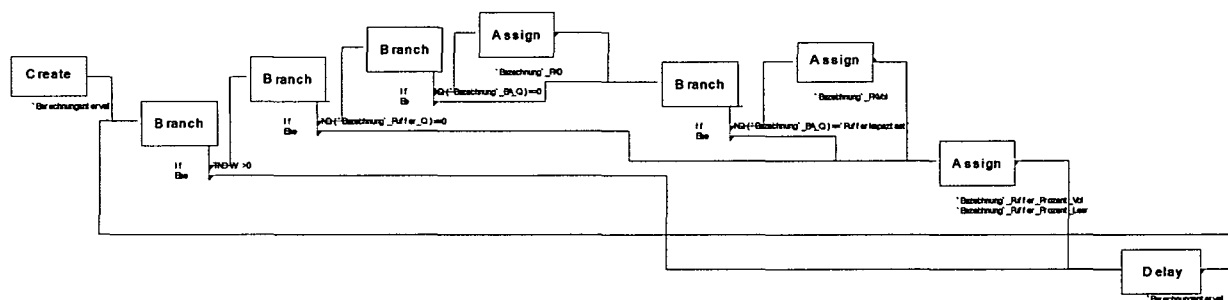


Abbildung 194: Submodell 13 – Berechnung Zeitanteile Puffer leer/voll

### Submodell 13 – Berechnung mittlere Warteschlangenlänge

Es wird die mittlere Warteschlangenlänge berechnet, die in der Animation ausgegeben wird.

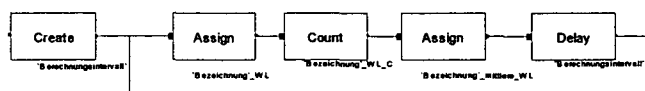
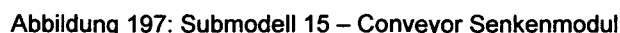


Abbildung 195: Submodell 13 – Berechnung mittlere Warteschlangenlänge

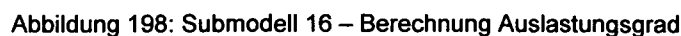
Wenn das Conveyor-Fördermittel belegt werden kann, wird die vorhergehende Bedienstation frei gegeben. Der Transport wird durchgeführt und das Fördermittel erst wieder frei gegeben, wenn die Anzahl der Fördereinheiten im Puffer der nachfolgenden Bedienstation kleiner ist als die Pufferkapazität.



Das Conveyor-Fördermittel wird belegt und die vorhergehende Bedienstation frei gegeben.  
Dann wird der Transport durchgeführt und das Fördermittel frei gegeben.



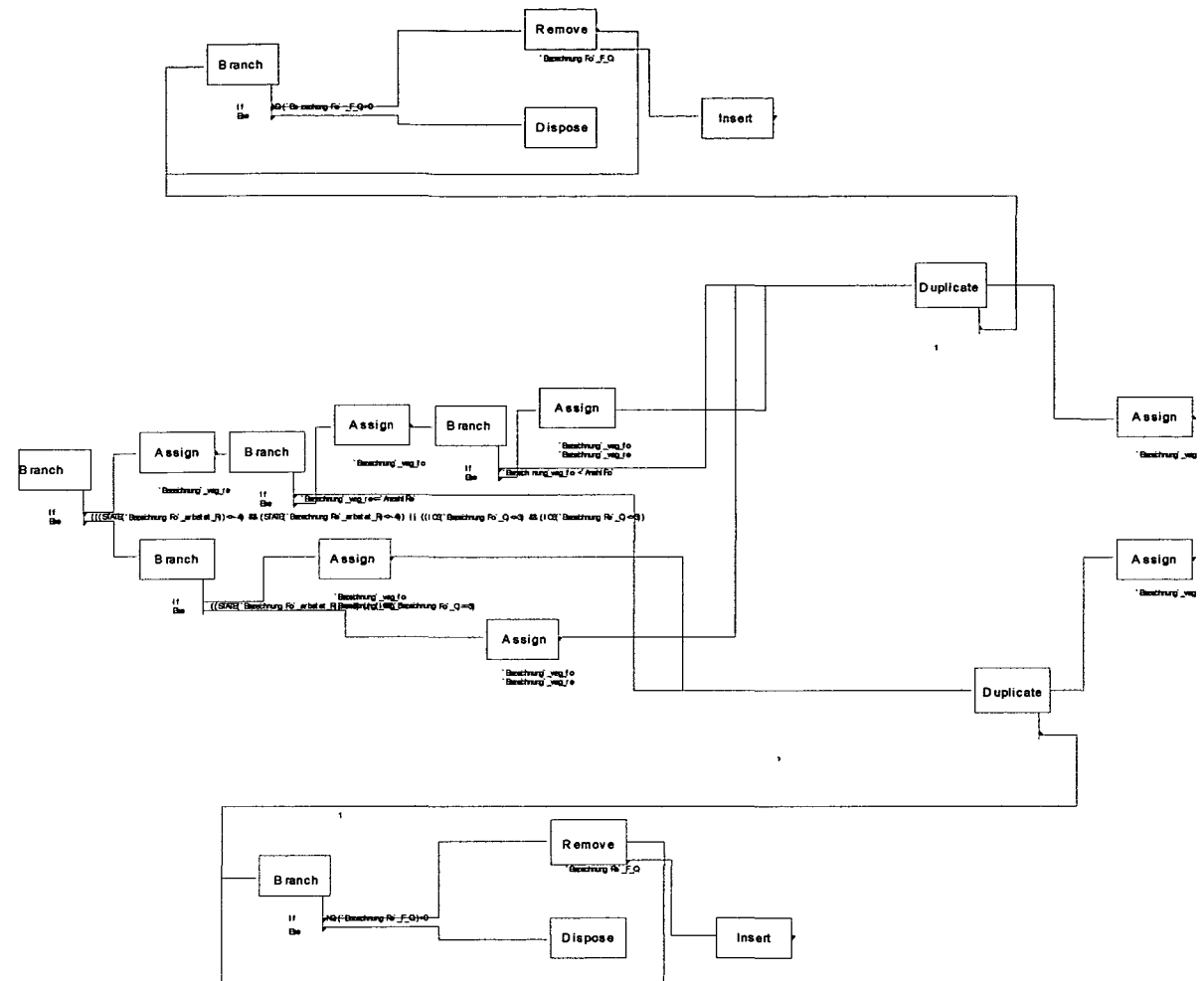
Es wird der Auslastungsgrad des Fördermittels berechnet (Quotient aus Transportdauer und Zwischenankunftszeit).





### Submodell 19 – Verzweigung wR

Wenn beide Fördersysteme und beide Bedienstationen intakt sind, erfolgt eine Aufteilung des Förderstroms. Ist ein Element ausgefallen, werden die Transaktionen auf das andere Element umgeleitet.



**Abbildung 201: Submodell 19 – Verzweigung wR**



### Submodell 20 – Umschaltung Teillast-/Volllastbetrieb

Sind beide Elemente einer warmen Redundanzschaltung intakt, so arbeiten diese unter Teillast. Bei Ausfall eines Elements übernimmt das zweite Element und arbeitet unter Volllast.

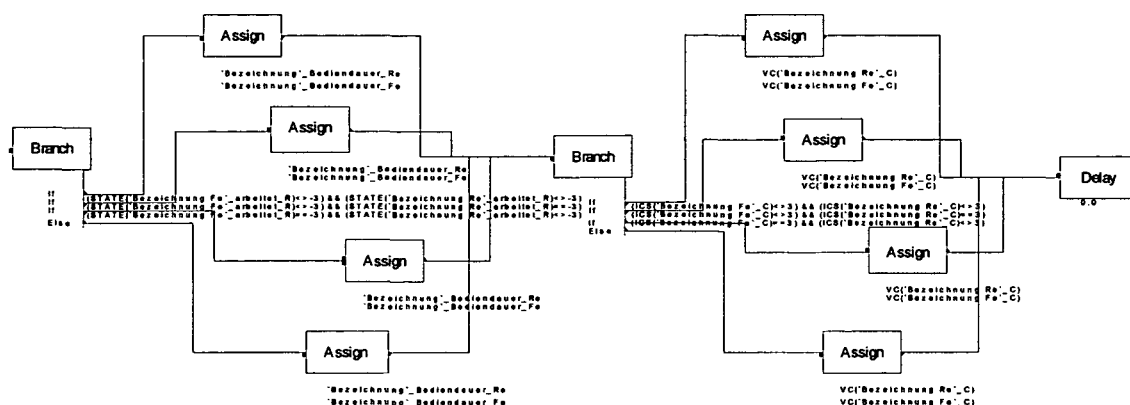


Abbildung 202: Submodell 20 – Umschaltung Teillast/Volllastbetrieb

### Submodell 21 – Störungsdefinition Conveyor wR A

Es wird ein „Störungsentität“ erzeugt, das nach Ablauf der störungsfreien Zeit TBF den Conveyor A abschaltet und nach der Reparaturzeit TTR diesen wieder einschaltet, wobei berücksichtigt wird, dass im Volllastbetrieb das Fördermittel höher belastet ist und daher früher ausfällt, als im Teillastbetrieb.

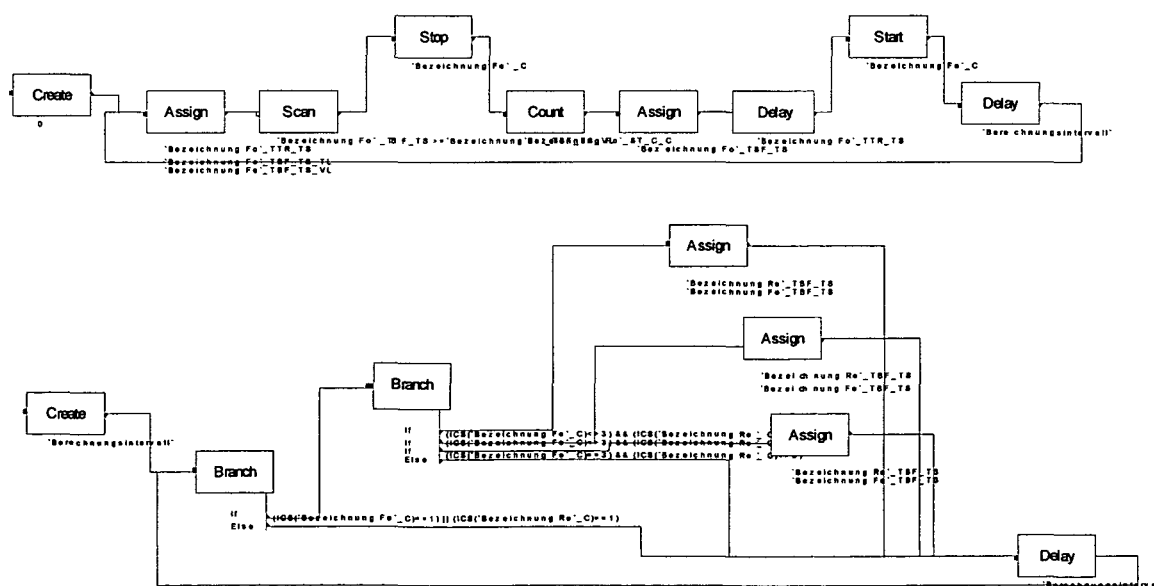


Abbildung 203: Submodell 21 – Störungsdefinition Conveyor wR A

### Submodell 22 – Störungsdefinition Conveyor wR B

Es wird ein „Störungsentity“ erzeugt, das nach Ablauf der störungsfreien Zeit TBF den Conveyor B abschaltet und nach der Reparaturzeit TTR diesen wieder einschaltet, wobei berücksichtigt wird, dass im Volllastbetrieb das Fördermittel höher belastet ist und daher früher ausfällt, als im Teillastbetrieb.

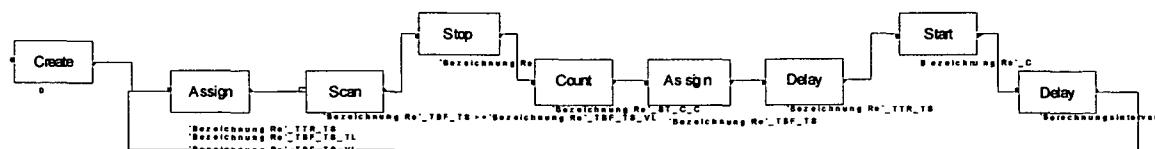


Abbildung 204: Submodell 22 – Störungsdefinition Conveyor wR B

### Submodell 23 – Störungsdefinition Bedienstation wR A

Es wird ein „Störungsentity“ erzeugt, das nach Ablauf der störungsfreien Zeit TBF die Bedienstation A abschaltet und nach der Reparaturzeit TTR diese wieder einschaltet, wobei berücksichtigt wird, dass es im Volllastbetrieb höher belastet ist und daher früher ausfällt, als im Teillastbetrieb.

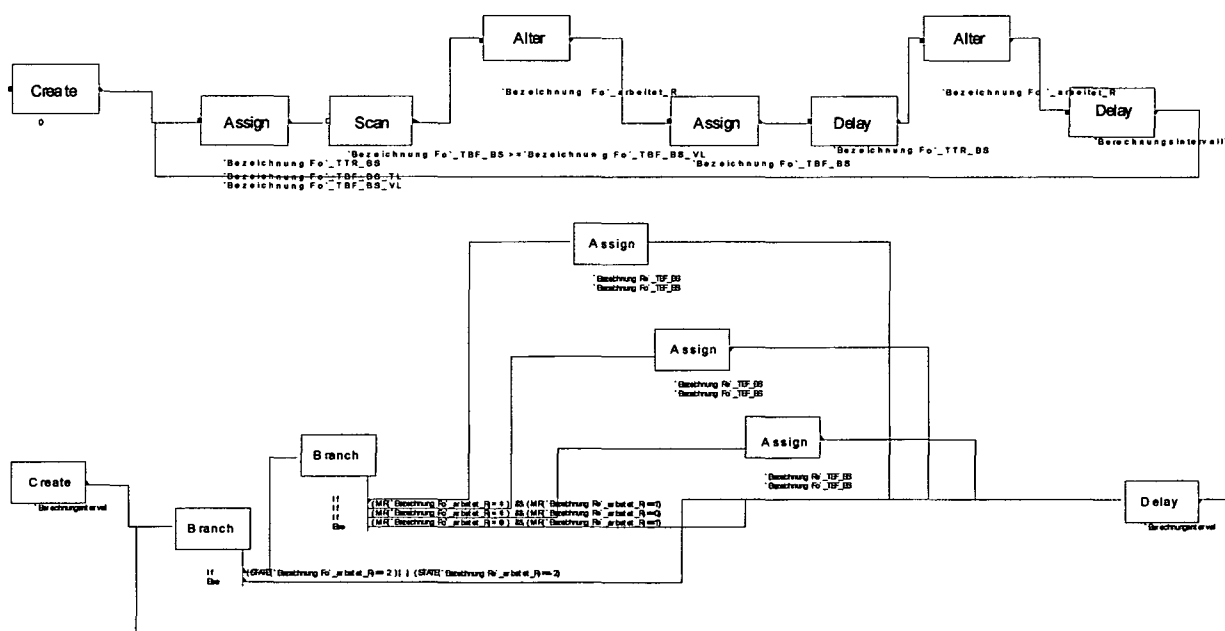


Abbildung 205: Submodell 23 – Störungsdefinition Bedienstation wR Fo

### Submodell 24 – Störungsdefinition Bedienstation wR B

Es wird ein „Störungsentität“ erzeugt, das nach Ablauf der störungsfreien Zeit TBF die Bedienstation B abschaltet und nach der Reparaturzeit TTR diese wieder einschaltet, wobei berücksichtigt wird, dass es im Volllastbetrieb höher belastet ist und daher früher ausfällt, als im Teillastbetrieb.

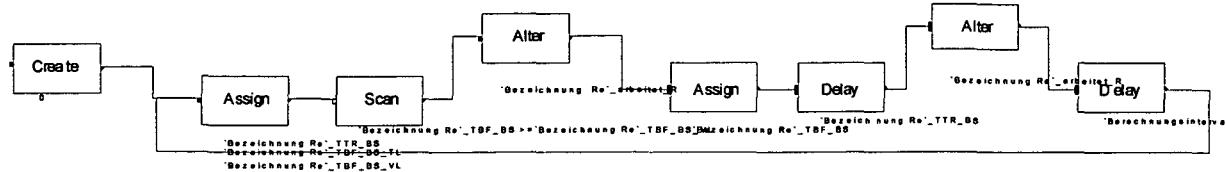


Abbildung 206: Submodell 24 – Störungsdefinition Bedienstation wR B

### Submodell 25 – Zusammenführung z

Das Zusammenführungselement wird von der zuerst ankommenden Transaktion belegt, d.h. die Abfertigung erfolgt ohne Priorität (first come – first served). Das Conveyor-Fördermittel wird erst frei gegeben, wenn die Anzahl der Fördereinheiten im Puffer der nachfolgenden Bedienstation kleiner ist als die Pufferkapazität. Dann wird auch das Zusammenführungselement frei gegeben.

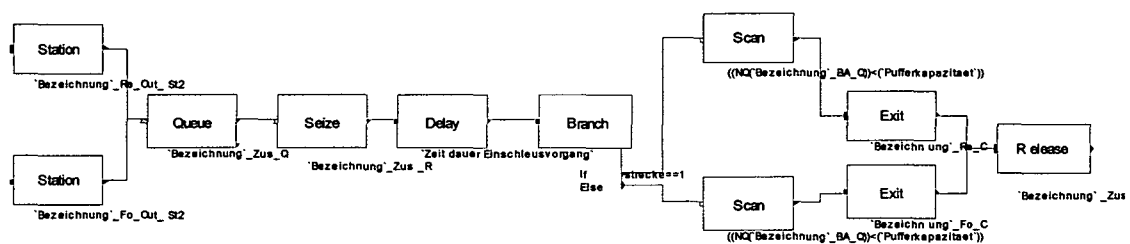


Abbildung 207: Submodell 25 – Zusammenführung z

### Submodell 26 – Zusammenführung zR

Das Zusammenführungselement wird von der zuerst ankommenden Transaktion belegt, d.h. die Abfertigung erfolgt ohne Priorität (first come – first served).

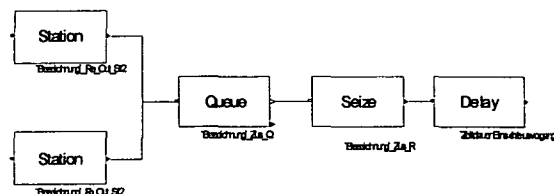


Abbildung 208: Submodell 26 – Zusammenführung zR

### Submodell 27 – Conveyor Zwischenmodul z

Wenn das Conveyor-Fördermittel belegt werden kann, wird die vorhergehende Bedienstation frei gegeben und der Transport durchgeführt.

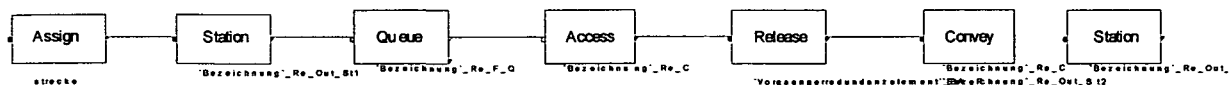


Abbildung 209: Submodell 27 – Conveyor Zwischenmodul z

### Submodell 28 – Conveyor Zwischenmodul zR

Wenn das Conveyor-Fördermittel belegt werden kann, werden der vorhergehende Conveyor und das Zusammenführungselement frei gegeben. Der Transport wird durchgeführt und das Fördermittel erst wieder frei gegeben, wenn die Anzahl der Fördereinheiten im Puffer der nachfolgenden Bedienstation kleiner ist als die Pufferkapazität.

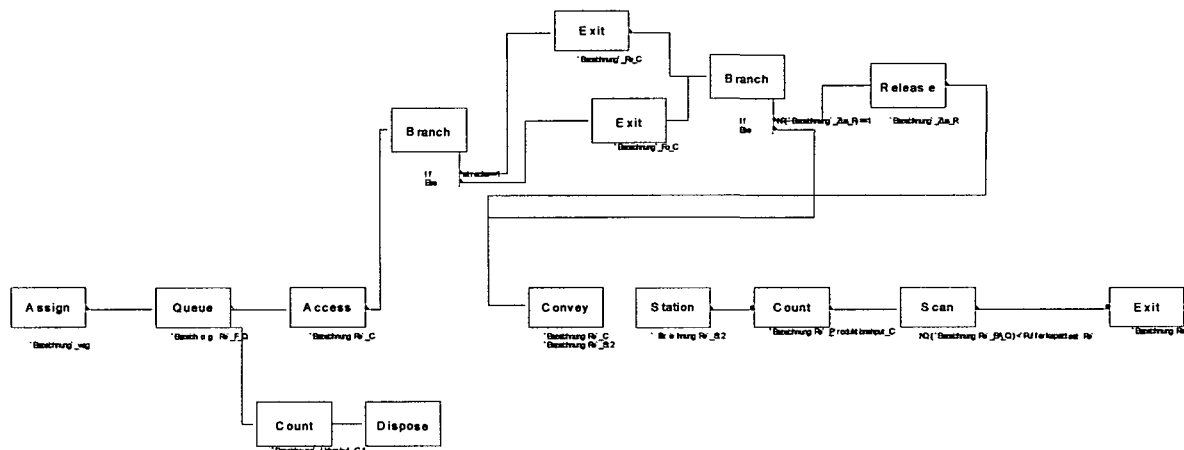


Abbildung 210: Submodell 28 – Conveyor Zwischenmodul zR

### Submodell 29 – Zusammenführung Senke

Das Zusammenführungselement wird von der zuerst ankommenden Transaktion belegt, d.h. die Abfertigung erfolgt ohne Priorität (first come – first served). Dann werden das Conveyor-Fördermittel und das Zusammenführungselement frei gegeben.

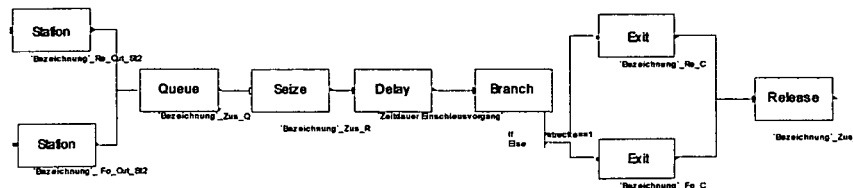


Abbildung 211: Submodell 29 – Zusammenführung Senke

### Submodell 30 – Störungsdefinition Puffer

Es wird ein „Störungsentität“ erzeugt, welches veranlasst, dass nach Ablauf der störungsfreien Zeit TBF Puffer alle Fördereinheiten aus dem Puffer entfernt werden und der vorangehende Conveyor nicht mehr frei gegeben wird. Es liegt somit eine Störung des Puffers vor, da der Conveyor nicht mehr fördert und die nachfolgende Bedienstation keine Fördereinheiten mehr bedienen kann, da der Puffer leer ist. Nach der Reparaturzeit TTR Puffer wird der Conveyor für den Transport wieder frei gegeben und der Puffer mit den zuvor entfernten Fördereinheiten gefüllt.

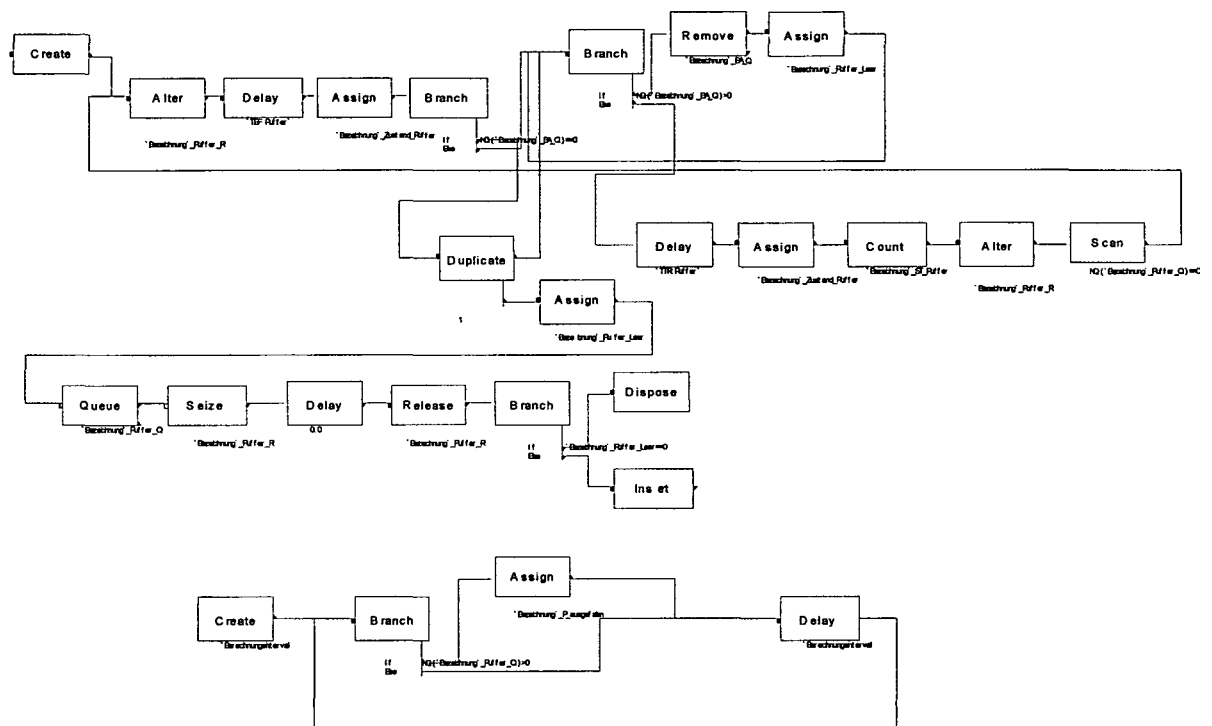


Abbildung 212: Submodell 30 – Störungsdefinition Puffer

### Submodell 31 – Berechnung Verfügbarkeit Puffer

Es erfolgt die Berechnung der technischen Verfügbarkeit des Puffers.

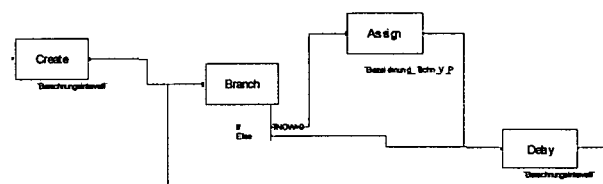


Abbildung 213: Submodell 31 – Berechnung Verfügbarkeit Puffer

### Submodell 32 – Verzweigung

Der Förderstrom wird auf die beiden, parallel angeordneten Elemente aufgeteilt. Der Benutzer kann im Dialogfenster festlegen, wie viele Fördereinheiten im ungestörten Zustand abwechselnd zu Element A und B transportiert werden. Fällt ein Element aus, werden alle Fördereinheiten dem noch in Funktion stehenden Element zugeführt.

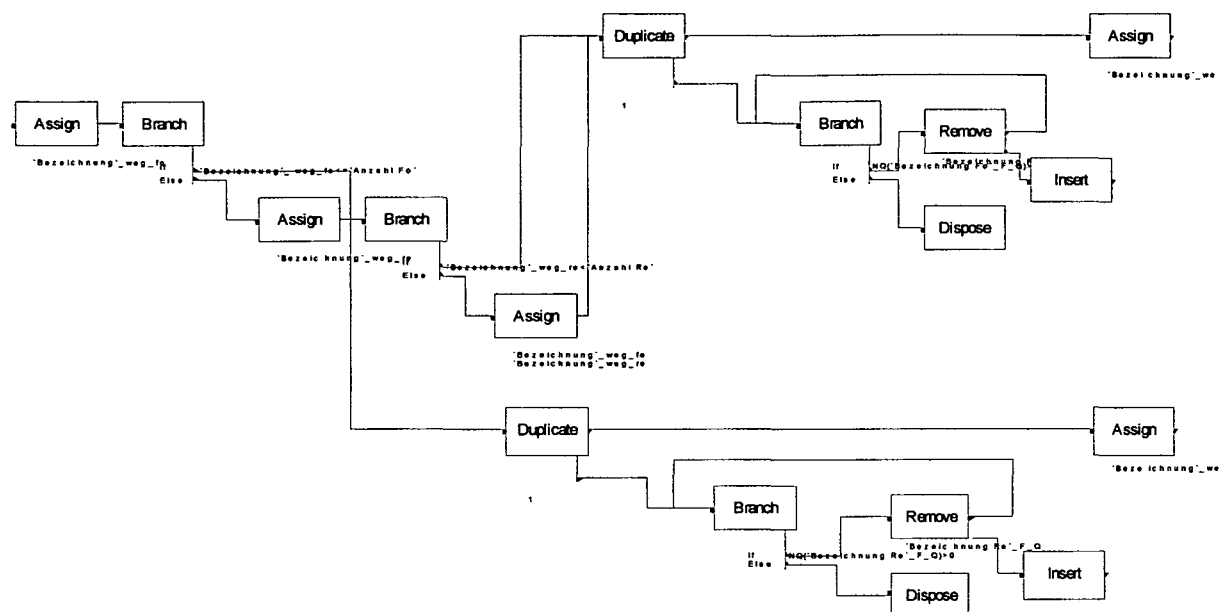


Abbildung 214: Submodell 32 - Verzweigung

## Anhang C

---

VBA-Code  
iterative Parametervariation

## Option Explicit

```
Public oExcelApp As Excel.Application
Public oWorkbook As Excel.Workbook
Public oWorksheet As Excel.Worksheet
```

```
Public z As Integer
Public c As Integer
Public a As Integer
Public o As Integer
Public p As Integer
Public j As Integer
```

```
Public DeltaPK As Integer
```

```
Public count As Integer
Dim DS(100) As Double
Dim PDA(100) As Double
Dim Erg(1 To 100, 1 To 3) As Double
Public DSakt As Double
Public DSkI As Double
Public DSgr As Double
```

```
Public Simlaenge As Double
Public Br As Integer
Public PDmin As Double
Public PDmax As Double
Public PD As Double
Public PK As Integer
Public PKmin As Double
Public PKmax As Double
Public Sollds As Double
Public Abw As Double
Public Solldsmin As Double
Public Solldsmax As Double
```

```
Public PDmin_t As Double
Public PDmax_t As Double
Public PD_t As Double
Public PKmin_t As Double
Public PKmax_t As Double
Public Sollds_t As Double
Public Abw_t As Double
```

---



---

```
Private Sub ModellLogic_DocumentOpen()
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub ModellLogic_RunBeginSimulation()
```

```
    Dim m As Model
```

```
    Dim k As SIMAN
```

```
    Dim p As SIMAN
```

```
    Dim s As SIMAN
```

```
    Dim i As Integer
```

```
    Dim Diffmin As Double
```

```
    Dim Diff As Double
```

```
    Set m = ThisDocument.Model
```

```
    Set k = m.SIMAN
```

```
    Set p = m.SIMAN
```

```
    Set s = m.SIMAN
```

```
    c = c + 1
```

```
    a = a + 1
```

```
    If a = 1 Then
```

```
        UserForm1.Show
```

```
    End If
```

```
    If c = 1 Then
```

```
        Simlaenge = UserForm1.TextBox3
```

```
        k.RunEndTime = Simlaenge
```

```
        PDmin_t = UserForm1.TextBox1.value
```

```
        PDmax_t = UserForm1.TextBox4.value
```

```
        PKmin_t = UserForm1.TextBox2.value
```

```
        PKmax_t = UserForm1.TextBox5.value
```

```
        Sollds_t = UserForm1.TextBox6.value
```

```
        Abw_t = UserForm1.TextBox7.value
```

```
        Solldsmin = Sollds_t - (Sollds_t * (Abw_t / 100))
```

```
        Solldsmax = Sollds_t + (Sollds_t * (Abw_t / 100))
```

```
        PDmin = PDmin_t * 1
```

```
        PDmax = PDmax_t * 1
```

```
        PKmin = PKmin_t * 1
```

```
        PKmax = PKmax_t * 1
```

```
        PD = (PDmin + PDmax) / 2
```

```
        PK = PKmin + DeltaPK
```

```
        PDA(0) = PDmin
```

```
        PDA(1) = PDmax
```

```
        PDA(2) = PD
```

```
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("st1_Mittelwert")) = PD
p.VariableArrayValue(p.SymbolNumber("st1_Pufferkapazitaet")) = 1
```

```
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("st2_Mittelwert")) = PD
p.VariableArrayValue(p.SymbolNumber("st2_Pufferkapazitaet")) = PK
```

```
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("st3_Mittelwert")) = PD
```

```
End If
```

```
If c > 1 Then
```

```
  If ((DS(c - 2)) < (Solldsmin)) Then
    Diffmin = PDA(1) - PDA(0)
    For i = 0 To c
      If PDA(i) < PD Then
        Diff = PD - PDA(i)
        If Diff < Diffmin Then
          Diffmin = Diff
        End If
      End If
    Next i
    PD = PD - (Diffmin / 2)
    PDA(c + 1) = PD
```

```
End If
```

```
  If ((DS(c - 2)) > (Solldsmax)) Then
    Diffmin = PDA(1) - PDA(0)
    For i = 0 To c
      If PDA(i) > PD Then
        Diff = PDA(i) - PD
        If Diff < Diffmin Then
          Diffmin = Diff
        End If
      End If
    Next i
    PD = PD + (Diffmin / 2)
    PDA(c + 1) = PD
```

```
End If
```

```
PK = PKmin + DeltaPK
```

```
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("st1_Mittelwert")) = PD
p.VariableArrayValue(p.SymbolNumber("st1_Pufferkapazitaet")) = 1
```

```
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("st2_Mittelwert")) = PD
p.VariableArrayValue(p.SymbolNumber("st2_Pufferkapazitaet")) = PK
```

---

```
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("st3_Mittelwert")) = PD
```

```
k.RunEndTime = Simlaenge
```

```
If Br = -1 Then ThisDocument.Model.BatchMode = True
```

```
End If
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub ModelLogic_RunEndReplication()
```

```
Dim m As Model
```

```
Dim s As SIMAN
```

```
Set m = ThisDocument.Model
```

```
Set s = m.SIMAN
```

```
m.QuietMode = True
```

```
If s.RunMaximumReplications = s.RunCurrentReplication Then m.End
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub ModelLogic_RunEndSimulation()
```

```
Dim m As Model
```

```
Dim s As SIMAN
```

```
Set m = ThisDocument.Model
```

```
Set s = m.SIMAN
```

```
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("st7_mittlerer_Durchsatz_Senke"))
```

```
DS(count) =
```

```
=s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("st3_mittlerer_Durchsatz_Senke"))
```

```
count = count + 1
```

```
End Sub
```

---

```
Private Sub ModelLogic_RunEnd()
```

```
Dim m As Model
```

```
Dim s As SIMAN
```

```
Dim p As SIMAN
```

```
Dim Durchsatz As Double
```

```
Dim nextrow As Integer
```

```
Set m = ThisDocument.Model
```

```
Set s = m.SIMAN
```

```
Set p = m.SIMAN
```

---

Durchsatz = DS(count - 1)

If (Durchsatz <= Solldsmax) And (Durchsatz >= Solldsmin) Then

    If (PKmin + DeltaPK) < PKmax Then

        DeltaPK = DeltaPK + 0

        o = o + 1

        Erg(o, 1) = PK

        Erg(o, 2) = PD

        Erg(o, 3) = Durchsatz

        c = 0

        count = 0

        m.Go

    End If

    If (PKmin + DeltaPK) >= PKmax Then

        o = o + 1

        Erg(o, 1) = PK

        Erg(o, 2) = PD

        Erg(o, 3) = Durchsatz

        c = 0

        count = 0

        a = 0

        DeltaPK = 0

        Unload UserForm1

    ThisDocument.Model.BatchMode = False

    m.End

    Set oExcelApp = CreateObject("Excel.Application")

    oExcelApp.Visible = True

    oExcelApp.SheetsInNewWorkbook = 1

    Set oWorkbook = oExcelApp.Workbooks.Add

    Set oWorksheet = oWorkbook.ActiveSheet

    With oWorksheet

        .Activate

        .Columns(1).Select

        .Columns(2).Select

        .Columns(3).Select

        oExcelApp.Selection.Columns.AutoFit

        oExcelApp.Selection.NumberFormat = "0.000"

    End With

```
For j = 1 To o
    oWorksheet.Cells(j, 1).value = Erg(j, 1)
    oWorksheet.Cells(j, 2).value = Erg(j, 2)
    oWorksheet.Cells(j, 3).value = Erg(j, 3)
Next j

MsgBox ("Iterative Parametervariation beendet!")

oExcelApp.DisplayAlerts = False
oWorkbook.SaveAs ThisDocument.Model.Path & "Anlage1.xls"

End If

End If

If (Durchsatz > Solldsmax) Then
    m.Go
End If

If (Durchsatz < Solldsmin) Then
    m.Go
End If

End Sub
```

Nach dem Starten des Simulationslaufes erscheint am Bildschirm folgende Benutzeroberfläche, in der die noch fehlenden Parameterwerte eingegeben werden können:

UserForm1

Bestimmung des erforderlichen technischen Durchsatzes mittels  
ITERATIVER PARAMETERVARIATION

Minimale Prozessdauer in Ze	Maximale Prozessdauer in Ze
Minimale Pufferkapazität in Stk	Maximale Pufferkapazität in Stk
Solldurchsatz in Stk/Ze	Zulässige Abweichung in %

Simulationslänge in Ze

☐ Animation ausschalten

Simulation starten

# Lebenslauf

---

## Persönliche Daten:

Name:	Klaus DECKER
Geburtsdatum:	08.07.1978
Geburtsort:	Zwettl / NÖ
Wohnort:	Marbach/Walde 14, 3911 Rappottenstein

## Schulbildung:

September 1984 bis Juni 1988	Volksschule Marbach am Walde
September 1988 bis Juni 1992	Hauptschule Zwettl
September 1992 bis Juni 1997	HTBL u. VA St. Pölten Abteilung Maschinenbau - Automatisierungstechnik (Reifeprüfung: 16. Juni 1997, mit Ausz. best.)

## Studium:

Oktober 1998 bis Februar 2003	Studium Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau an der TU - Wien Vertiefung: Betriebstechnik, Qualitätssicherung, Roboter- und Handhabungstechnik (1. Diplomprüfung: 14. November 2000, mit Ausz. best. 2. Diplomprüfung: 10. Februar 2003, mit Ausz. best. )
März 2003 bis September 2006	Doktoratsstudium Maschinenbau an der TU - Wien (Schwerpunkt: Materialflusslehre und -simulation)

## Berufliche Tätigkeit:

Seit März 2003	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik der TU - Wien
----------------	--

## Präsenzdienst:

Februar bis September 1998	Liechtensteinkaserne Allentsteig Funktion: NUO - Gehilfe
----------------------------	---