



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU

# Praxisgerechte AbnahmeprozEDUREN für intralogistische Systeme unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der  
Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Ilmenau

von Frau

Dipl.-Ing. Martina Margret Maier,  
geborene Salzmann

geboren am 22. März 1981 in Lohr am Main

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolf-Michael Scheid  
Technische Universität Ilmenau
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche  
Universität Stuttgart
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Walter A. Neuhaus  
Dortmund

Tag der Einreichung: 31. Mai 2011

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Oktober 2011

Ilmenau 2011



---

# Vorwort

Logistik ermöglicht Beschaffung, Produktion und Distribution. Wettbewerbsfähige Logistik zeichnet sich aus durch schnellere Reaktionszeit, niedrige Bestände, kurze Durchlaufzeiten und fehlerfreie bzw. fehlertolerante Prozesse.

An intralogistische Systeme werden fortwährend höhere Anforderungen gestellt. Der langfristiger seit vielen Jahren zu beobachtender Trend führt zur Automatisierung der Systeme. Die Anforderungen steigen damit an Planer, Hersteller von Soft- und Hardware sowie an Betreiber und Instandhalter. Für den mittelständischen Betreiber handelt es sich bei Investitionen in Intralogistik häufig um Entscheidungen, die für die kommenden 10 bis 15 Jahre sein Unternehmen wesentlich beeinflussen werden - es geht um Zukunftssicherung und Risikobegrenzung gleichermaßen.

Guten Glaubens verlässt er sich darauf, dass Planer und später Lieferanten des Systems seine Nöte und Bedürfnisse richtig verstanden haben und in neue Abläufe, in Mechanik, Steuerungstechnik und last but not least Software zielgerecht umsetzen. Werden ihm dann noch für das Gesamtsystem Verfügbarkeitswerte von deutlich über 95 % vertraglich zugesagt, wiegt ihn dies in Sicherheit. Er hat richtig entschieden!

Die Erfahrung der letzten Jahrzehnte hat leider gezeigt, dass die Beteiligten - Planer, Hersteller, Betreiber - zwar gleiche Begriffe verwendet haben, häufig aber ein höchst unterschiedliches Verständnis über Bedeutung und Inhalt dieser Begriffe haben. Statt gemeinsam ein Ziel ins Visier zu nehmen, werden divergierende Ziele angesteuert. Unzufriedenheit bis hin zum Streit, eventuell folgen rechtliche Auseinandersetzungen. Nahezu exemplarisch lässt sich dieses Problem an dem schon erwähnten Begriff der Verfügbarkeit, den entsprechenden Richtlinien zur Verfügbarkeit intralogistischer Systeme etwa von VDI und FEM aufzeigen.

Dieses Buch befasst sich zunächst mit der historischen Entwicklung der Begriffe und den missverständlichen Interpretationen. Die Autorin zeigt, dass die Theorie teilweise falsch angewendet wurde und wird. Sie zeigt, dass implizit fehlerhafte Annahmen über das Verhalten intralogistischer Systeme und das Ausklammern des Einflusses des beteiligten bzw. betroffenen Personals in der Inbetriebnahme und Hochlaufphase zu den missverständlichen Anwendungen bzw. Ergebnissen der Praxis und damit zu den Auseinandersetzungen führen.

Ausgehend von den Problemen der Praxis wird ein Vorgehen entwickelt, dass statt auf eine für den Betreiber abstrakte technische Verfügbarkeit auf die von ihm beschreibbaren und messbaren Prozesse am Arbeitsplatz aufbaut. Alle Beteiligten werden so zum frühest denkbaren Zeitpunkt gezwungen, sich auf gemeinsam verständliche nachvollziehbare und messbare Prozesse bzw. Schnittstellen im System festzulegen. Dies hat zugleich den Vorteil, eine spätere Abnahme mit vertretbar geringem Aufwand durchzuführen.

Die Vorgehensweise ist in Übereinstimmung mit der Theorie, soweit sie auf intralogistische Systeme anwendbar ist. Das Festlegen messbarer Werte erfordert entsprechende Prognosen. Auch hierzu werden Vorgehensweisen vorgeschlagen und exemplarisch auf Machbarkeit überprüft.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die systematisch entwickelte Darstellung der Probleme von Wissenschaft und Praxis zu Anforderungen an eine neue Vorgehensweise führt, die die bisherigen Schwächen eliminiert bzw. „umgeht“, wie die Autorin an einer Stelle schreibt.

Damit wird u. a. das Konzept der Leistungsverfügbarkeit, das in der neuen VDI-Richtlinie „Zuverlässigkeit in der Intralogistik: Leistungsverfügbarkeit“ festgelegt wurde, logisch und konsequent hergeleitet. Die Autorin hat im zuständigen Fachausschuss der VDI-Gesellschaft GPL Produktion und Logistik maßgeblich an der Erstellung dieser Richtlinie mitgearbeitet.

Die hier in Buchform vorliegende Dissertation der Autorin geht dabei deutlich über die Richtlinie hinaus. Das gleichzeitige Betrachten von Theorie und Praxis im Hinblick auf die Inbetriebnahme und Abnahme intralogistischer Systeme überzeugt. Aus zunächst theoretisch erscheinenden Überlegungen werden praxisgerechte Vorschläge erarbeitet. Praxisnahe Beispiele zeigen die Anwendbarkeit der erarbeiteten neuen Vorgehensweise.

Dieses Buch ist ein Meilenstein auf dem Weg zu partnerschaftlicher Zusammenarbeit von Planern, Herstellern und Betreibern intralogistischer Systeme. Alle werden profitieren!

Ilmenau, im Dezember 2011

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolf-Michael Scheid

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>IX</b>
<b>Kurzfassung / Abstract</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	2
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	3
1.3 Definitionen . . . . .	4
1.3.1 Intralogistik . . . . .	4
1.3.2 Abnahme . . . . .	5
1.3.3 Verfügbarkeit . . . . .	5
1.4 Wissenschaftliche Arbeiten zur Verfügbarkeit von intralogistischen Systemen	6
1.4.1 Grundlagenartikel von Timm Gudehus, 1976 und 1979 . . . . .	6
1.4.2 Dissertation von Walter Neuhaus, 1978 . . . . .	8
1.4.3 Dissertation von Hubert Böckmann, 1978 . . . . .	9
1.4.4 Dissertation von Ernst-Martin vom Bover, 2000 . . . . .	10
<b>Status Quo: Kapitel 2 - Kapitel 6</b>	<b>11</b>
<b>2 Das geltende Regelwerk</b>	<b>11</b>
2.1 Übersicht über das geltende Regelwerk . . . . .	11
2.1.1 DIN-Normen . . . . .	11
2.1.2 Die Richtlinien des VDI . . . . .	11
2.1.3 Das Regelwerk der FEM . . . . .	14
2.2 Die wesentlichen Inhalte . . . . .	14
2.2.1 Bestimmungen zum Verfügbarkeittest im Rahmen der Abnahme .	14
2.2.2 Verfügbarkeit allgemein . . . . .	15
2.2.3 Berechnung der Gesamtverfügbarkeit . . . . .	17
2.2.4 Puffer und Teilredundanzen . . . . .	20
2.3 Exemplarische Regeln aus anderen Branchen und Ländern . . . . .	21
2.3.1 Regeln anderer Branchen . . . . .	21
2.3.2 Regelungen im Ausland . . . . .	22
2.4 Zusammenfassung Kapitel 2 . . . . .	24
<b>3 Kritische Auseinandersetzung mit dem Regelwerk</b>	<b>26</b>
3.1 Innerer und zeitlicher Zusammenhang der Richtlinien . . . . .	26
3.1.1 Querverweise . . . . .	26

3.1.2	Der zeitliche Zusammenhang der Regeln zur Verfügbarkeit . . . . .	27
3.2	Verfügbarkeit versus Ausfallverhalten . . . . .	30
3.3	Kritik an der Verknüpfung nach Boole . . . . .	31
3.3.1	Vermaschte Systeme . . . . .	31
3.3.2	Redundante Systeme . . . . .	32
3.4	Kritik an der Verknüpfung mit Gewichtungsfaktoren . . . . .	34
3.4.1	Subjektive Festlegung der Gewichtungsfaktoren . . . . .	34
3.4.2	Geringe Aussage der Gesamtverfügbarkeit . . . . .	36
3.5	Reihenfolge von Verfügbarkeitstest und Abnahmeerklärung . . . . .	37
3.6	Zusammenfassung Kapitel 3 . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Erfahrungen in der Praxis</b>	<b>40</b>
4.1	Allgemeine Erfahrungen . . . . .	40
4.2	Erfahrungen von Anwendern . . . . .	41
4.2.1	Die Verfügbarkeitsanforderung im Vertrag . . . . .	41
4.2.2	Planung und Durchführung des Verfügbarkeitstest . . . . .	42
4.2.3	Die Aussagekraft der Verfügbarkeitswerte für den Echtbetrieb . . . . .	44
4.2.4	Der unterschätzte Faktor: Die Emotionen der eigenen Mitarbeiter . . . . .	45
4.3	Erfahrungen von Lieferanten . . . . .	46
4.3.1	Der günstigste Verfügbarkeitsnachweis . . . . .	47
4.3.2	Der desaströse Verfügbarkeitsnachweis . . . . .	47
4.3.3	Der normale Verfügbarkeitsnachweis . . . . .	48
4.4	Zusammenfassung Kapitel 4 . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Verfügbarkeitsentwicklung</b>	<b>53</b>
5.1	Ausgangslage . . . . .	53
5.2	Die untersuchten Anlagen . . . . .	55
5.2.1	Verteilzentrum . . . . .	56
5.2.2	Regalbediengeräte einer Kommissionieranlage . . . . .	57
5.2.3	Elektrohängebahn . . . . .	57
5.3	Auswertungen . . . . .	57
5.3.1	Einschwingverhalten . . . . .	57
5.3.2	Einschwingdauer . . . . .	58
5.3.3	Vergleich Testergebnis und nachfolgende Verfügbarkeitsentwicklung . . . . .	61
5.3.4	Entwicklung der Verfügbarkeit nach dem Abnahmetest . . . . .	63
5.3.5	Betriebsphase . . . . .	66
5.4	Zusammenfassung Kapitel 5 . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie</b>	<b>70</b>
6.1	Vielfältige Definitionen von Zuverlässigkeit . . . . .	70
6.2	Unterteilung in der Anwendung . . . . .	71
6.2.1	Zuverlässigkeitskenngrößen von nichtinstandsetzbaren Einheiten . . . . .	72
6.2.2	Zuverlässigkeitskenngrößen von instandsetzbaren Systemen . . . . .	75
6.3	Widersprüche bei Anwendung in der Intralogistik . . . . .	78
6.3.1	Berechnung der Zuverlässigkeit . . . . .	78
6.3.2	Badewannenkurve . . . . .	79
6.3.3	MTTF und MTBF . . . . .	79

6.3.4 Wahl des Verknüpfungsmodells . . . . .	82
6.4 Zusammenfassung Kapitel 6 . . . . .	85
<b>Lösung: Kapitel 7 - Kapitel 9</b>	<b>86</b>
<b>7 Neue AbnahmeprozEDUREN</b>	<b>86</b>
7.1 Vorschläge zur Vertragsgestaltung . . . . .	86
7.2 Alternative Kennwerte . . . . .	88
7.2.1 Gesamtanlageneffektivität . . . . .	88
7.2.2 Anlagennutzungszeit . . . . .	90
7.2.3 Leistungsverfügbarkeit . . . . .	92
7.3 Bewertung . . . . .	96
7.4 Zusammenfassung Kapitel 7 . . . . .	97
<b>8 Anwendung der Leistungsverfügbarkeit</b>	<b>99</b>
8.1 Prognose in der Planungsphase . . . . .	99
8.1.1 Die Prognosemethode . . . . .	99
8.1.2 Auswertung . . . . .	103
8.2 Messung für den Nachweis der Leistungsverfügbarkeit . . . . .	104
8.2.1 Voraussetzungen und Randbedingungen . . . . .	104
8.2.2 Benötigte Daten . . . . .	105
8.2.3 Datenaufnahme . . . . .	105
8.2.4 Testzeitpunkt, Testdauer und Verfahren bei Misserfolg . . . . .	106
8.3 Anwendung am Beispiellager . . . . .	107
8.3.1 Organisation . . . . .	107
8.3.2 Planungsphase . . . . .	108
8.3.3 Liefer- und Montagephase . . . . .	113
8.3.4 Inbetriebnahmephase . . . . .	113
8.3.5 Vergleich (technische) Verfügbarkeit - Leistungsverfügbarkeit . . .	114
8.4 Zusammenfassung Kapitel 8 . . . . .	115
<b>9 Bewertung des Kennwerts</b>	<b>117</b>
9.1 Vorstudien zur Leistungsverfügbarkeit . . . . .	117
9.1.1 Simulation durch Christoph Meurer . . . . .	117
9.1.2 Simulation durch Steffen Nebel . . . . .	120
9.2 Simulationsuntersuchungen einer Produktionsanlage durch Marie Nagel .	121
9.2.1 Modellszenario . . . . .	122
9.2.2 Technische Verfügbarkeit der Modellfabrik . . . . .	123
9.2.3 Untersuchung I: Aussagekraft des Kennwerts „Leistungsverfügbarkeit“	124
9.2.4 Untersuchung II: Genauigkeit der Prognosemethode . . . . .	126
9.3 Zusammenfassung Kapitel 9 . . . . .	131
<b>10 Schlussbetrachtung</b>	<b>132</b>
10.1 Zusammenfassung . . . . .	132
10.1.1 Darstellung und Analyse des bestehenden Regelwerks . . . . .	132
10.1.2 Entwicklung und Anwendung von Lösungen . . . . .	133

10.2 Ausblick . . . . .	134
<b>A Das Ausfallverhalten einiger ausgewählter EHB-Elemente</b>	<b>136</b>
A.1 Arbeitsplätze . . . . .	136
A.2 Fahrzeuge . . . . .	137
A.3 Streckenabschnitte . . . . .	137
A.4 Hubwerke und Gehängereinigung . . . . .	137
<b>B Zur Prognose der Leistungsverfügbarkeit</b>	<b>144</b>
B.1 Ermittlung der Prognoseparameter . . . . .	144
B.1.1 Lagerplanung - Kapitel 8 . . . . .	144
B.1.2 Modellfabrik - Kapitel 9 . . . . .	148
B.2 Vergleich: Prognose und Simulation der Modellfabrik . . . . .	151
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>158</b>



---

# Symbole und Abkürzungen

$\eta$	Verfügbarkeit
$\eta^{nve}$	Nichtverfügbarkeit
$\eta^{ver}$	Verfügbarkeit
$\eta^{zuw}$	Zuverlässigkeit
$\eta_L$	Leistungsverfügbarkeit mit verspäteten Ladeeinheiten
$\eta_S$	Systemverfügbarkeit
$\eta_W$	Leistungsverfügbarkeit mit Wartezeiten
$\eta_{E_i}$	Verfügbarkeit des Elements $E_i$
$\eta_{ges}$	Gesamtverfügbarkeit
$\lambda$	Ausfallrate
$\lambda_{Res}$	Reservedurchsatz
$\lambda_{Soll}$	geforderter Durchsatz
$\lambda_{Tech}$	technischer Durchsatz
$\mu$	Nichtverfügbarkeit
$\varphi$	Zuverlässigkeit
$A$	Availability, engl.: Verfügbarkeit
$A_D$	Dauerverfügbarkeit
$A_D^{(i)}$	innere Dauerverfügbarkeit
$E_i$	$i$ -tes Element des Systems $S$
$f$	Pufferkapazität
$g_k$	Strombelastungsfaktor
$i$	Laufindex
$k_i$	Gewichtungsfaktor des Elements $i$
$K_{ix}$	Kapazitätsfaktor
$L_{ix}$	Laufzeitreserve
$m$	Anzahl mehrerer gleichartiger und gemeinsam betrachteter Schnittstellen
$MTBF$	Mean Time Between Failure, engl.: Mittlere Zeitdauer zwischen zwei Ausfällen
$MTTF$	Mean Time To Failure, engl.: Mittlere Funktionszeit bis zum Ausfall
$MTTR$	Mean Time To Repair, engl.: mittlere Ausfalldauer
$N$	Sollanzahl Ladeeinheiten
$n$	Anzahl gefertigter Teile
$n$	verspätete Ladeeinheiten
$n_f$	Anzahl der falschen bzw. gestörten Funktionserfüllungen

## Symbole und Abkürzungen

---

$n_r$	Anzahl der richtigen bzw. störungsfreien Funktionserfüllungen
$n_{Ausschuss/Nacharbeit}$	Anzahl der nachzuarbeitenden Teile und Ausschussteile
$P_{ix}$	Pufferzeit
$p_{ix}$	Anzahl der Pufferplätze
$p_{Techi}$	Kennwert zur Quantifizieren von Teilredundanzen
$R_i$	Redundanzfaktor
$T$	Zeit
$T_A$	Ausfallzeit
$T_B$	Betriebszeit
$T_E$	Einschaltzeit
$T_R$	Restzeit
$T_W$	Wartezeit
$t_x$	Arbeitstakt an der Schnittstelle x
$T_{ANZ}$	Anlagennutzungszeit
$T_{Geplant}$	Geplante Laufzeit
$T_{B_{Netto}}$	Nettobetriebszeit
$TT_{Geplant}$	Geplante Taktzeit
$TTF$	Time To Failure, engl.: Funktionszeit bis zum Ausfall
$TTF_{FF}$	Time To First Failure, engl.: Lebensdauer bis zum ersten Ausfall
$TTM$	Time To Maintenance, engl.: Instandhaltungsdauer
$TPM$	Time To Preventive Maintenance, engl.: Präventive Instandhaltungsdauer
$TTR$	Time To Repair, engl.: Ausfallzeit
$V$	Verfügbarkeit
$v$	Verfügbarkeit
$x$	Schnittstelle, an der die Leistungsverfügbarkeit gemessen wird
AG	Auftraggeber
AKL	Automatisches Kleinteilelager
AL	Auslagerpunkt
AMS	Automatisierte Materialfluß-Systeme
AP	Arbeitsplatz
AS/RS	Automated Storage/Retrieval Systems, engl.: Automatische Lager-systeme/Regalbediengeräte
BD	Bezeichnung eines Arbeitsplatzes der Elektrohängebahn
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DS02	Bezeichnung eines Arbeitsplatzes der Elektrohängebahn
DS11	Bezeichnung eines Arbeitsplatzes der Elektrohängebahn
EHB	Elektrohängebahn
EN	Europäische Norm
EP	Bezeichnung eines Arbeitsplatzes der Elektrohängebahn
FEM	Fédération Européenne de la Manutention, frz.: Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik
FiFo	First In, First out, Betriebsstrategie in Lagern, nach der die Auslagerung gesteuert wird
FT	Fördertechnik
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GEA	Gesamtanlageneffektivität

---

GEFF	Gesamtanlageneffektivität
GPL	Gesellschaft Produktion und Logistik des VDI, siehe auch VDI-GPL
HRL	Hochregallager
HU	Hubwerk der Elektrohängebahn
K1/K2/K3	Kommissionierarbeitsplätze
LV	Leistungsverfügbarkeit
MHIA	Material Handling Industry of Amerika, engl.: Zusammenschluss der Handhabungstechnik-Industrie in den USA
MKR	Koordinatenroboter der Modellfabrik
niO	nicht in Ordnung, Qualitätsurteil
OB-LOOP-12	Bezeichnung eines Streckenabschnitts der Elektrohängebahn
OB4	Bezeichnung eines Arbeitsplatzes der Elektrohängebahn
OEE	Overall Equipment Effectiveness, deutsch: Gesamtanlageneffektivität
RAMS	Akronym: <b>R</b> eliability (Zuverlässigkeit), <b>A</b> vailability (Verfügbarkeit), <b>M</b> aintainability (Instandhaltbarkeit), <b>S</b> afety (Sicherheit)
RBG	Regalbediengerät
S	System
SCF	Sustained Capacity Faktor
SR 60	Schwenkarmroboter der Modellfabrik
STAT-LOOP-12	Bezeichnung eines Streckenabschnitts der Elektrohängebahn
StetigFT	Stetigfördertechnik
TPM	Total Productive Maintenance, Instandhaltungskonzept
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-GPL	VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
VVA	Vereinigte Vertragsauslieferung, Dienstleistungsunternehmen der Bertelsmann AG
VW	Verfahrwagen
WA	Warenausgang
WE	Wareneingang
WGTL	Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e.V.

---

## **Kurzfassung / Abstract**

Der Verfügbarkeitsnachweis ist ein wesentlicher Bestandteil der Abnahme intralogistischer Anlagen. Er dient zur Überprüfung der vertraglich vereinbarten Verfügbarkeitswerte. Die Aufnahme der Messwerte und die Berechnung der Anlagengesamtverfügbarkeit wird im einschlägigen Regelwerk beschrieben. Leider sind mit dem Verfügbarkeitsnachweis fast regelmäßig Missverständnisse und Streitfälle zwischen den Betreibern und den Lieferanten neuer Anlagen verbunden, die nicht nur ärgerlich sondern auch sehr kostenintensiv sein können.

Daher werden im ersten Teil dieser Arbeit die bestehenden Regelwerke und Durchführungspraktiken zum Verfügbarkeitsnachweis im Rahmen der Abnahme analysiert und auf ihre Schwachstellen hin untersucht. Neben der Analyse der teilweise entgegengesetzten Anforderungen von Lieferanten und Anlagenbetreibern wird die Entwicklung der Anlagenverfügbarkeit in den ersten Betriebsmonaten der neuen Anlage untersucht und ihre Berechnungsmethode in die Erkenntnisse der Zuverlässigkeitstheorie eingeordnet. Anhand der aufgezeigten Schwachstellen werden Kriterien formuliert, die alternative Verfügbarkeitskennwerte erfüllen müssen, um die bestehenden Missstände zu beheben.

Im zweiten Teil werden anhand der in Teil 1 erarbeiteten Kriterien einerseits ein neues Konzept der Projektorganisation erarbeitet, um die Inbetriebnahmephase aufzuwerten und zum anderen drei Kennwerte alternativ zur technischen Verfügbarkeit vorgestellt und bewertet. Auf Grundlage der dort dargestellten Betrachtungen wird der Kennwert Leistungsverfügbarkeit genauer untersucht. Es werden eine Prognosemethode zur Abschätzung in der Planungsphase und konkrete Vorgehensweisen für den Nachweis im Rahmen der Abnahme entwickelt und gemeinsam mit dem Organisationskonzept anhand eines Beispiels demonstriert. Abschließend wird das Potential des Kennwerts Leistungsverfügbarkeit anhand verschiedener Simulationsexperimente abgeschätzt.

Schlagwörter: Technische Verfügbarkeit, Abnahme, Intralogistikanlagen, Leistungsverfügbarkeit, Inbetriebnahme

### **Practical acceptance procedures for intralogistic systems considering the reliability and availability theory**

The verification of contracted availability is an essential part of the acceptance of intralogistics systems. The measuring and calculation of the system availability is specified in the corresponding industrial standards. Unfortunately availability tests very often lead to misunderstandings and disputes between the carrier and deliverer of new systems, that can be not only annoying but also very cost-intensive.

This is why in the first part of this thesis, the existing industrial standards and procedures for availability testing within the framework of acceptance will be analysed and examined for weak spots. Besides the analysis of the contrarious requirements of carrier and deliverer, the evolution of system availability during the first operationmonths of the system will be investigated and its calculationmethod will be compared with the conclusions of the reliability theory. On the basis of the elaborated weak spots, several

---

criteria will be defined. Alternativ availability parameters have to achieve to eliminate the existing problems.

In the second part a new conception of project organisation to reevaluate the start-up phase on the one hand and three parameters, alternativ to technical availability on the other hand, are evaluated. Based on the analysis of the different criteria in part I the parameter „pervormance availability“ is the chosen and investigated in more detail. A forecast method for the planning phase and practical verification procedures for the acceptance are elaborated and demonstrated accompanied by the organisation conception as an example. Different simulation experiments finally evaluate the potential of the parameter performance availability.

Key words: Technical availability, acceptance, intralogistics systems, performance availability, system start-up



---

# 1 Einleitung

Es ist eine allgemeine Erfahrung, die wahrscheinlich die meisten Menschen schon bei sich selbst beobachten konnten: Steht eine größere Investition an, eine Digitalkamera, ein Auto, oder auch ein Eigenheim, werden alle möglichen Strategien genutzt, um einer Fehlentscheidung vorzubeugen. Zu diesen Strategien gehört das Sammeln von Erfahrungsberichten aus dem Umfeld oder heute auch vermehrt im Internet, das Lesen von unabhängigen Testergebnissen wie z. B. von Stiftung Warentest und das Achten auf Zertifikate. Je mehr positive Indizien für den Kauf des Gerätes der Wahl sprechen, desto sicherer fühlen wir uns beim Ausgeben des vielen Geldes, auch wenn dies nicht ausschließt, dass das dann gekaufte Objekt vielleicht doch die eigenen Bedürfnisse nicht optimal erfüllen kann.

Steht ein Unternehmen vor der Entscheidung, eine intralogistische Anlage zu installieren, lauern Gefahren von zwei Seiten: Unterbleibt die Investition oder ist nicht weitgehend genug, könnten Wettbewerber mit größerem Investitionsmut das Unternehmen am Markt überholen und damit wichtige Kunden übernehmen. Ist die Investition allerdings zu riskant droht möglicherweise der wirtschaftliche Ruin.

Hat sich das Unternehmen nach Abwägung aller Kriterien für die Installation einer intralogistischen Anlage konkreten Umfangs entschieden, entsteht daher ebenfalls ein großes Sicherheitsbedürfnis: Die Entscheider wollen so sicher wie möglich sein, dass die Anlage, für die sie sich schlussendlich entscheiden, auch die an sie gestellten Anforderungen erfüllen kann und ihr Geld wert ist. Das liegt nicht nur an den genannten wirtschaftlichen Konsequenzen, da eine solche Anlage häufig das Vielfache eines Eigenheimes kostet, sondern auch an den betriebsorganisatorischen Folgen, da durch ein solches Materialflusssystem die Arbeitsweise des Unternehmens häufig für viele Jahre bestimmt und festgelegt wird.

Um seine Entscheidung für eine bestimmte Anlage abzusichern, stehen dem zukünftigen Betreiber verschiedene Strategien zur Verfügung: Zum Beispiel können anhand der Referenzen der in Frage kommenden Lieferanten ähnlich realisierte Anlagen beichtigt werden, um von deren Erfahrungen zu profitieren. Auch die Inanspruchnahme der Expertise eines Planungsbüros ist eine sinnvolle Maßnahme, gerade wenn es sich um eine große Investition handelt und nur wenige eigene Erfahrungen vorhanden sind. Zur einfacheren Beurteilung, ob eine Anlage den Ansprüchen gerecht werden kann, wurden von den anerkannten Expertenverbänden „Verein Deutscher Ingenieure“ (VDI) und dem „Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau“ (VDMA) Richtlinien und Regelwerke mit Kennwerten herausgegeben. Einer dieser Kennwerte ist die Verfügbarkeit. Wird die gewünschte Verfügbarkeit auf Grundlage der Regelwerke vertraglich vereinbart, so geht der Betreiber davon aus, dass die Anlage bei Erreichung der Zielverfügbarkeit auch wunschgemäß arbeitet und in der Lage ist, die nötigen Stückzahlen termingerecht bereitzustellen.

### 1.1 Problemstellung

Die Idee hinter dem Kennwert Verfügbarkeit ist demnach schlüssig und einleuchtend: Eine konkrete Zahl wird vertraglich zugesichert, es wird alles dafür getan, dass diese Zahl erreicht wird, der Betreiber hat eine anforderungsgerechte Anlage, der Lieferant bekommt sein Geld.

Während allerdings die termingerechte Lieferung der Anlage, ihre Funktionsfähigkeit und ihre Leistungsfähigkeit<sup>1</sup> noch relativ leicht überprüfbar ist, sieht es mit der Verfügbarkeit anders aus. Die Verfügbarkeit ist per Definition eine Wahrscheinlichkeit und keine absolute Größe und so sieht die praktische Überprüfung des vereinbarten Verfügbarkeitswertes häufig sehr unerfreulich aus: die vertraglich vereinbarte Verfügbarkeit wird nicht erreicht, die Gründe dafür sind vielfältig und nicht eindeutig Betreiber oder Lieferanten zuzuordnen, die Anlage kann nicht abgenommen werden, es entstehen unangenehme Schwebezustände für alle Beteiligten. Ein erfahrener Projektleiter erzählt von einem besonders eindrücklichen Erlebnis<sup>2</sup>:

„Wie wichtig neben den formalen und technischen Vorklärunen auch das kommerzielle Konstrukt ist, zeigt ein Beispiel aus dem Jahr 2005. Das beim Verfügbarkeitstest nach FEM 9.222 geprüfte automatische Kleinteilelager bestand aus Komponenten vieler einzelner Lieferanten. Um Kosten zu reduzieren, hatte der Endkunde für mechanische und elektrische Anlagenteile u.a. kleine Firmen aus der Region direkt beauftragt. Während der Tests waren ständig ca. 40 Mitarbeiter aller zuliefernden Firmen vor Ort, jeder wusste, dass die Gesamtverfügbarkeit vom reibungslosen Funktionieren seines Teilgewerks abhing. Im Falle eines Ausfalls über die vereinbarten 1 % hinaus<sup>3</sup>, hatte der Verursacher für die Kosten eines Wiederholtests aufzukommen. Der **Stressfaktor für alle Beteiligten war enorm**, die Störungen wurden sekundengenau protokolliert. Am sechsten Tag der unter Volllast täglich 8 Stunden betriebenen Anlage kam es zum Ausfall eines Etikettenapplizierers - hier war eine kleine Schraube gebrochen. Beim Austausch des Teils war der 50-jährige Monteur **so nervös**, dass er zudem den Druckstempel 180° verdreht eingebaut und damit die max. erlaubte Ausfallzeit überschritten hatte. So ein kleiner Familienbetrieb kann für die Kostenübernahme von 40 Mitarbeitern x 6 Tage zzgl. Pönale wegen Terminverzug nicht aufkommen. In der Gewissheit, die **eigene Firma ruiniert** zu haben, verließ der Monteur ungewöhnlich ruhig die Anlage, wir haben ihn aus **Angst vor Kurzschlussreaktionen** sofort der familiären und ärztlichen Betreuung übergeben. Der Verfügbarkeitstest wurde abgebrochen und das Projekt mit mehreren Wochen Verzug und unter erheblichen Mehrkosten für viele Beteiligte fortgeführt. Das hätte z. B. durch die Vertragsbindung an einen Generalunternehmer vermieden werden können, viele der einzelnen Zulieferer hatten die ausgeschriebenen Anforderungen unterschätzt. Natürlich können wir keinen Betreiber davon abbringen, solche Vorgaben zu beschreiben, allerdings wünschte ich ein Regelwerk, das es erlaubt, einzelne Teilkomponenten interpretationsfrei auszuschließen. Auf alle Fälle muss der Testmodus die durchführenden Menschen vor **physischen und psychischen Schäden** bewahren.“ [Fra07]

---

<sup>1</sup>Auch der Kennwert Leistung ist nicht ganz unproblematisch: Während bei einem Neuwagen jedem Käufer klar ist, dass die maximal erreichbare Geschwindigkeit eher selten tatsächlich gefahren wird, wird von Intralogistikanlagen häufig erwartet stets mit der Maximalleistung zu arbeiten, was völlig unrealistisch nur zur Enttäuschung führen kann. Dies soll hier aber nicht weiter thematisiert werden.

<sup>2</sup>Alle Hervorhebungen der folgenden Zitate durch die Verfasserin

<sup>3</sup>Gemeint ist hier 1 % Nichtverfügbarkeit bei einer vereinbarten Verfügbarkeit von 99 %.



Auch in der Literatur wird vielfach von auftretenden Problemen über die Verfügbarkeitsmessung bei der Inbetriebnahme berichtet:

„Es zeigt sich immer wieder, daß Hersteller und Betreiber unter Inbetriebnahme **zweierlei verstehen**: Der Hersteller meint damit, daß nach seiner Zeit der Probelaufe die Inbetriebnahme mit geringerer Anfangsleistung und mit natürlichen Fehlern beginnen kann. Der Betreiber meint, daß mit Beginn der Inbetriebnahme mit echter Ware eine hohe Anfangsleistung und eine entsprechende Anlagenstabilität vorhanden ist“ [Arm81, S. 69].

„Für den Verfügbarkeitsnachweis im Falle einer Inbetriebnahme sind vom Lieferanten nur Ausfälle der ersten beiden Kategorien zu verantworten<sup>4</sup>. **Potenzielle Konflikte** entstehen hierbei, wenn z. B. Ursache und Wirkung eines Ausfalls temporär oder lokal voneinander entfernt liegen. **Unsicherheiten** können auch dadurch entstehen, dass Anforderungen des Auftraggebers nicht im Lastenheft oder die Annahmen zur Umsetzung nicht im Pflichtenheft des Herstellers spezifiziert sind“ [FJ06, S. 483].

„Hersteller und Betreiber der Anlage sind oft **unterschiedlicher Meinung** darüber, welche Zeitabschnitte als Ausfallzeiten zu gelten haben und welche nicht. Beide beteuern **vehement**, daß sie für diese oder jene Betriebsstörung und die daraus resultierenden Ausfallzeiten nicht verantwortlich sind. Dabei wird leider vergessen, daß Hersteller und Betreiber die Verfügbarkeit in praxi [sic] gemeinsam bestimmen“ [Sch90, S. 61].

„Aus den wirtschaftlichen Verpflichtungen der Parteien, also dem Return-On-Invest für den Auftraggeber und dem Liquiditätsrückfluss für den Hersteller, resultiert die Notwendigkeit zu vertraglichen Vereinbarungen über die Leistungserstellung. Darin werden auch Vorgehensweisen und Abnahmekriterien festgelegt [VDI92b, S. 11], mit denen die Eigenschaft eines Gewerkes für eine bestimmte Funktion geprüft werden soll. Hier ist heutzutage die maßgebliche Funktion des Kennwertes Verfügbarkeit zu sehen. Dabei steht er jedoch in der Regel als isolierter Kennwert und wird nicht direkt in Verbindung gebracht mit der Leistungserfüllung. In Konsequenz folgt, dass beide Parteien trotz der verschiedenen Intentionen an einem hohen Verfügbarkeitskennwert interessiert sind und diesen dementsprechend in einer hohen Ausprägung vereinbaren. Dabei wird weder dem Auftraggeber eine hohe Leistungsermittlung direkt durch den hohen Kennwert garantiert noch kann der Hersteller mit einem leistungsgemäß eingeschränkt funktionsfähigen System eine hohe Qualitätsreputation erzielen. Das resultierende **Konfliktpotenzial** in dieser Form der Vereinbarung wird jedoch in der Regel nicht als solches erkannt und bewertet“ [FN06, S. 1].

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Obwohl der Kennwert Verfügbarkeit auf den ersten Blick sehr anschaulich und einleuchtend wirkt, wird anhand der oben genannten Zitate deutlich, dass der Kennwert Verfügbarkeit in den letzten 30 Jahren von den Experten für ungeeignet empfunden wurde, er aber mangels Alternative trotzdem verwendet wurde. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, eine solche Alternative zu entwickeln, mit deren Hilfe die Qualität einer neuen Anlage objektiv dargestellt werden kann, ohne selbst Ursache für Probleme und Komplikationen zu sein. Unter Qualität wird in diesem Zusammenhang verstanden, inwieweit die Anlage in der Lage ist, die geforderte Funktionen (z. B. Ein- und Auslagerungen)

---

<sup>4</sup>Gemeint sind hier Ausfälle aufgrund von Bauteilversagen und von Verschleiß.

zu erfüllen.

Im ersten Teil wird dazu der Kennwert Verfügbarkeit umfassend dargestellt. Nach einer Definition der wesentlichen Begriffe und der Vorstellung der bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema werden dafür zunächst die wiederkehrenden Probleme klassifiziert und ihre Ursachen analysiert: In Kapitel 2, S. 11ff, wird das geltende Regelwerk vorgestellt und in Kapitel 3, S. 26ff, einer kritischen Prüfung unterzogen. Anschließend wird in Kapitel 4, S. 40ff, die praktische Umsetzung des Regelwerks anhand der Erfahrungen von Betreibern, Lieferanten und Planern beschrieben. In Kapitel 5, S. 53ff, wird beispielhaft die Verfügbarkeitsentwicklung einer neuen Anlage über mehrere Monate hinweg analysiert. In Kapitel 6, S. 70ff, erfolgt schließlich ein Abgleich mit den aktuellen Erkenntnissen der Zuverlässigkeitstheorie und ihre Umsetzung in dem Bereich der Intralogistik.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden im zweiten Teil der Arbeit zunächst verschiedene alternative Kennwerte vorgestellt, anhand der Kriterien beurteilt und der geeignetste Kennwert ausgewählt (Kapitel 7, S. 86ff). Die praktische Umsetzung der Arbeit mit dem neuen Kennwert wird in Kapitel 8, S. 99ff, dargelegt und in Kapitel 9, S. 117ff, mit Hilfe von Simulationen überprüft.

## 1.3 Definitionen

### 1.3.1 Intralogistik

„Logistik umfasst alle Aufgaben zur integrierten Planung, Koordination, Durchführung und Kontrolle der Güterflüsse sowie der güterbezogenen Informationen von den Entstehungsenken bis hin zu den Verbrauchsenken. Häufig findet auch die Seven-Rights-Definition nach Plowman Anwendung; danach sichert Logistik die Verfügbarkeit des richtigen Gutes, in der richtigen Menge, im richtigen Zustand, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, für den richtigen Kunden, zu den richtigen Kosten“ [Gab10]. Der Teilbereich der Logistik, bei dem sich sowohl die Quellen als auch die Senken der betrachteten Materialflüsse innerhalb desselben Betriebs befinden, ist die *Intralogistik*. Die gelungene Wortschöpfung des VDMA [Arn06, S. 1] ersetzt und komplettiert einprägsam den traditionellen Begriff der Förder- und Lagertechnik:

- Intralogistik als Branchenname umfasst die Organisation, Durchführung und Optimierung innerbetrieblicher Materialflüsse in Unternehmen der Industrie, des Handels und in öffentlichen Einrichtungen mittels technischer Systeme und Dienstleistungen.
- Intralogistik steuert im Rahmen des „Supply Chain Managements“.
- Intralogistik beschreibt den innerbetrieblichen Materialfluss, der zwischen den unterschiedlichsten „Logistikknoten“ stattfindet.
- Intralogistik ist der zukunftsweisende Begriff einer Branche, die allein in Deutschland tausende Unternehmen umfasst, vom Hebezeug- und Kranhersteller über Gabelstapler- und Lagertechnik-Produzenten sowie über Softwareentwickler bis hin zu kompletten Systemanbietern. [CeM10]

Intralogistische Systeme sind demnach technische Anlagen, die den innerbetrieblichen Materialfluss realisieren. Je größer die Anzahl der Systemelemente, desto komplexer wird das System und desto vielschichtiger werden die Herausforderungen bei der Inbetriebnahme. Aus diesem Grund fokussiert sich das Interesse der vorliegenden Arbeit

im Wesentlichen auf große, hochtechnisierte Anlagen für Stückgüter, wie beispielsweise automatische Hochregellager oder Gepäckförderanlagen in Flughäfen.

### 1.3.2 Abnahme

Allgemein versteht man unter der Abnahme die „Feststellung, dass die Betrachtungseinheit als Stück oder Los ihre Spezifikation erfüllt.“ [VDI05, S. 3] Bezogen auf intralogistische Anlagen, vermischen sich häufig zwei Wortbedeutungen: Die Abnahme ist einerseits ein juristisch definierter Vorgang, bei dem ein Auftraggeber die Abnahme eines Produktes, Systems oder dergleichen erklärt. Mit der Abnahme ist der Gefahrenübergang einer Anlage verbunden. Andererseits wird der Begriff häufig als Überbegriff für das umfangreiche Testprogramm verstanden, das der rechtlichen Abnahme vorausgeht und meist folgende Einzelpunkte umfasst: Überprüfung der Vollständigkeit; Funktionsprüfung einschließlich Sicherheitseinrichtungen; Leistungsprüfung und Verfügbarkeitsprüfung (vgl. [HH06, S. 3]).

Der Focus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Ablauf der Verfügbarkeitsprüfung. Ihre Einbindung in den juristischen Vorgang der Abnahme wird in den Kapiteln 2.2.1, Seite 14 und 3.5, Seite 37 behandelt.

### 1.3.3 Verfügbarkeit

Soll erklärt werden, was *Verfügbarkeit* bedeutet, muss zunächst geklärt werden, was denn verfügbar sein soll: Die Technik oder die Waren:

„Moderne Intralogistik ist auf hohe Verfügbarkeit (sowohl der Technik als auch der Ware) angelegt. Einen Artikel nicht liefern zu können bedeutet im Worst-Case, auf den Umsatz zu verzichten. Im Konsumverhalten wartet der Kunde nicht, bis der Artikel verfügbar ist, er greift womöglich auf ein verfügbares Wettbewerbsprodukt zurück. In diesem Kontext wird auch immer wieder die Frage kritisch beleuchtet, wie die Ware bei einem Ausfall der Technik verfügbar bleibt.

Die Antwort hierzu lautet zunächst: hochverfügbare Techniken und ein entsprechendes Wartungs- und Servicekonzept zu realisieren, um vor unangenehmen Überraschungen verschont zu bleiben.“ [Wel06, S. 175]

Das primäre Ziel intralogistischer Anlagen ist der termingerechte Zugriff auf die benötigten Waren: sie müssen verfügbar sein. Um dies zu erreichen, versucht man üblicherweise hochverfügbare Technik zu verwenden.

Verfügbar ist ein technisches System im Wesentlichen immer dann, wenn es nicht ausgefallen ist, denn die Verfügbarkeit ist definiert als die „Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalles in einem Zustand zu sein, dass sie eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen unter der Annahme erfüllen kann, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind<sup>5</sup>“ [DIN03, S. 8].

---

<sup>5</sup>ANMERKUNG 1. Diese Fähigkeit hängt von den kombinierten Gesichtspunkten der Zuverlässigkeit, der Instandhaltbarkeit und dem Instandhaltungsvermögen ab.

2. Die erforderlichen äußeren Hilfsmittel, die nicht Instandhaltungshilfsmittel sind, beeinflussen nicht die Verfügbarkeit. [DIN03, S. 8]

In Kapitel 2.2.2, Seite 15 wird der Verfügbarkeitsbegriff auf Basis der intralogistischen Regelwerke und im Kapitel 6, Seite 70 vor dem Hintergrund der Zuverlässigkeitstheorie genauer erläutert.

In der Literatur sind verschiedene Formelzeichen für die Verfügbarkeit gebräuchlich:  $V$ , z. B. [Böc78, S. 65] oder  $v$ , z. B. [Neu78, S. 14] als Abkürzung für Verfügbarkeit, oder  $A$ , z. B. [BL04, S. 355] als Abkürzung für Availability (=engl.: Verfügbarkeit). In den technischen Regeln wird häufig  $\eta$ , z. B. [VDI04a, S. 3] verwendet<sup>6</sup>.

### 1.4 Wissenschaftliche Arbeiten zur Verfügbarkeit von intralogistischen Systemen

Das wissenschaftliche Interesse an der Verfügbarkeit von intralogistischen Systemen und ihrer Messung im Rahmen der Abnahme hatte seine erste Hochphase in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Spielten Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von technischen Komponenten vorher vor allem in der Luft- und Raumfahrt sowie im Kraftwerkbau eine zentrale Rolle, wurden entsprechende Kennwerte in den 1970ern durch die fortschreitende Automatisierung in den Fabrikhallen auch bei intralogistischen Anlagen, die damals noch Anlagen der Förder- und Lagertechnik genannt wurden, immer wichtiger. Anders als jedoch bei der Raumfahrt, wo es darauf ankommt, dass die technischen Komponenten im Zusammenspiel für die Dauer der Mission - einem vergleichsweise kurzem Zeitraum - auf jeden Fall zuverlässig arbeiten müssen, sind intralogistische Anlagen eher auf Dauerbetrieb ausgelegt und gestörte Elemente werden vorzugsweise instandgesetzt anstatt ersetzt. Aus diesem Grunde konnte die bestehende Zuverlässigkeitstheorie nicht eins zu eins eingesetzt, sondern musste für die spezifischen Gegebenheiten der Intralogistik angepasst werden. Diese übernahm Dr. Timm Gudehus. Seine dreiteilige Artikelreihe „Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transportsystemen“ war Geburtshelfer des heute geläufigen Verfügbarkeitsbegriffs [Gud76a, Gud76b, Gud79]. Kurz darauf befassten sich die beiden Dissertationen von Walter Neuhaus [Neu78] und Hubert Böckmann [Böc78] fast parallel mit verschiedenen Aspekten der Verfügbarkeit. Danach sollte es zwanzig Jahre dauern, bis das Thema erneut Eingang in die Institute fand, beginnend mit der Dissertation von Martin vom Bovert [VB01] aus dem Jahr 2000. Die Inhalte dieser Arbeiten werden im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

#### 1.4.1 Grundlagenartikel von Timm Gudehus, 1976 und 1979

Ausgangspunkt der Grundlagenforschung zur Messung der Verfügbarkeit war ähnlich wie heute der Wunsch von Herstellern, Planern und Betreibern von intralogistischen Anlagen nach einer aussagefähigen, eindeutigen und widerspruchsfreien Definition für die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems [Gud76a, S.1029].

Der erste Teil der dreiteiligen Artikelreihe stellt das Handwerkszeug zur Berechnung von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit einzelner Systemelemente vor. Dabei unterstreicht

---

<sup>6</sup>In der technischen Anwendung steht  $\eta$  üblicherweise für den Wirkungsgrad eines Systems. Da die Verfügbarkeit im Prinzip ein analoges Maß zum Wirkungsgrad darstellt, ist die Verwendung desselben Formelzeichens naheliegend.

Gudehus, dass das Erreichen hoher Werte bei diesen beiden Kennwerten keinen Selbstzweck darstellt, sondern das dauerhafte Ausführen der intralogistischen Funktionen wie das Einlagern oder das Kommissionieren ermöglichen soll. Seinen Ausführungen zufolge sind Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit zwei Kennwerte des Systems, die sich gegenseitig bedingen. Die Zuverlässigkeit eines Systemelements ist das Verhältnis von richtig ausgeführten Funktionserfüllungen (Weitertransportieren, Ausschleusen, etc.) zur Summe aller Funktionserfüllungen. Die Verfügbarkeit dagegen ist im Wesentlichen das Verhältnis von ungestörter Funktionsdauer zur gesamten Funktionsdauer. Ausformuliert haben neben der Zuverlässigkeit die mittlere Ausfalldauer und die durchschnittliche Strombelastung Einfluss auf die Verfügbarkeit eines Systemelements.

Ausführlich wird auf die Genauigkeit der so gewonnenen Verfügbarkeitswerte eingegangen: Die Messung von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit unterliegt statistischen Gesetzen und ist mit einem statistischen Fehler behaftet, der nur durch ausreichend lange Messdauer gering zu halten ist. Die üblicherweise vorgeschlagene Messdauer von 40 Betriebsstunden bezeichnet er als notwendig, aber nicht immer ausreichend [Gud76b, S. 1032].

Im zweiten Teil der Artikelreihe wird dargestellt, wie man mit Hilfe der Verfügbarkeitswerte der Systemelemente die Verfügbarkeit der Anlagenfunktionen, wie das Ein- oder Auslagern, berechnet. Dazu werden zunächst die Verfügbarkeiten der Systemelemente aus der Zuverlässigkeit, der mittleren Störungsdauer und der durchschnittlichen Strombelastung nach den aufgestellten Gleichungen berechnet. Die Anlage wird nach Funktionen unterteilt. Die Funktionsverfügbarkeit berechnet sich aus dem Produkt der Elementverfügbarkeiten der beteiligten Systemelemente. Jede Funktion wird mit der Funktionshäufigkeit gewichtet. Die Gesamtverfügbarkeit ist die Summe aller gewichteten Funktionsverfügbarkeiten.

Neben der Aufstellung der Berechnungsgrundlage gibt Gudehus einen Überblick über herstellerbedingte und betreiberabhängige Einflüsse auf die Zuverlässigkeit einer Anlage und betont die Bedeutung für die Testphase, dass der Betreiber die vom Lieferanten genannten Betriebsvorschriften und Bedingungen einhalten können muss und dass die Einlaufphase der Anlage mit den zu erwartenden Frühausfällen bereits abgeschlossen sein sollte, wenn der Test beginnt [Gud76b, S. 1345f].

Im dritten Teil der Artikelreihe [Gud79] werden die relativ komplizierten Berechnungsvorschriften mit Hilfe einer Näherungsformel vereinfacht. Bei dieser Näherung wird jedes einzelne Systemelement über den Anteil an der Strombelastung gewichtet. Die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit für Systemelemente gleichermaßen wie für Teilsysteme und nicht redundante Systeme erfolgt nun nach einer einheitlichen Gleichung. Diese Methode reduziert den Analyseaufwand beträchtlich und erleichtert somit die Handhabung, wird allerdings explizit nur für Systeme ohne Redundanzen empfohlen.

Die Überlegungen von Gudehus bildeten die Grundlagen für die VDI Richtlinie 3581 [VDI83], die in dieser Form fast zwanzig Jahre gelten sollte und das gesamte nachfolgende Regelwerk beeinflusste<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup>Die Entwicklung des Regelwerks und die verschiedenen Einflüsse darauf wurden in [Mai10b, Mai10c] ausführlich dargelegt.

### 1.4.2 Dissertation von Walter Neuhaus, 1978

In seiner Dissertation „Beitrag zur methodischen Untersuchung der Zuverlässigkeit in Stückgutlagersystemen“ wendet Neuhaus die Methoden der Zuverlässigkeitstheorie, die vornehmlich aus dem Gebiet der Raumfahrt stammen, erstmals auf logistische Systeme, am Beispiel eines Stückgutlagers an [Neu78, S. 14f]. Er unterscheidet drei wesentliche Betrachtungsabschnitte von Stückgutlagern, für die er jeweils geeignete Methoden der Zuverlässigkeitsuntersuchung vorstellt. Die Zeitabschnitte sind

1. die Analyse der Zuverlässigkeit während der Planung,
2. die Prüfung während der Realisierung bzw. der Abnahme und
3. die Kontrolle während des laufenden Betriebs.

Anders als bei Gudehus sind Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit bei Neuhaus nicht zwei miteinander verbundene Kenngrößen, die Verfügbarkeit ist vielmehr eine Kenngröße zur Beschreibung der Zuverlässigkeit.

Die Prognose der Verfügbarkeit in der Planungsphase basiert auf Zuverlässigkeits-schaubildern, in denen mit Hilfe des Booleschen Modells (vgl. Kapitel 2.2.3, S. 17) die Systemelemente verknüpft werden. Mit diesem Ansatz ist es möglich, neben der Verfügbarkeit auch die Kennwerte MTBF<sup>8</sup> und MTTR<sup>9</sup> abzuschätzen. Besonderes Augenmerk legt Neuhaus auf die Abnahme der Zuverlässigkeitskennwerte. Er kritisiert an der bestehenden Methode, dass die übliche Testdauer von 1-3 Tagen zu kurz ist, um eine sichere Aussage über die Zuverlässigkeit der Anlage zu treffen. Er berechnet eine Mindest-Messdauer von 6 Wochen, um die Auswirkungen von statistischen Ausreißern (z. B. durch untypisch lange Ausfälle) zu minimieren. Da die Verfügbarkeit ein zusammengesetzter Kennwert aus der mittleren Funktionsdauer (die mittlere Dauer zwischen zwei Ausfällen) und der mittleren Instandhaltungsdauer ist, hält er diesen Kennwert als Grundlage für die Abnahme nicht geeignet. Die mittlere Instandhaltungsdauer lässt sich sowohl vom Betreiber als auch vom Lieferanten beeinflussen und stellt damit kein objektives Maß dar. Er empfiehlt daher, einzig die mittlere Funktionsdauer bzw. zur Vereinfachung die Funktionsspielzahl zwischen zwei Störungen mit Hilfe der graphischen Methode des Folgetest zu bewerten. Dabei wird der zeitliche Ablauf von Istspielen und Defektspielen in ein Diagramm übertragen. Die Anforderungen an die Anlage unter Berücksichtigung der akzeptierten Risikoniveaus zur Falschentscheidung bilden als Geraden die Entscheidungsgrenzen des Verlaufs. Sobald der Funktionsgraph eine Gerade schneidet, endet die Abnahme entweder mit der Abnahme oder der Ablehnung der Abnahme. Nach Neuhaus' Abschätzung verkürzt dieses Vorgehen die Abnahmeprozedur auf ca. 2 Wochen erheblich<sup>10</sup>. Es ist allerdings auch nicht auszuschließen, dass der Wechsel von Ist- und Defektspielen derart verläuft, dass für einen langen Zeitraum keine Entscheidungsgerade geschnitten wird und sich der Verfügbarkeitstest endlos ausdehnt. Der Folgetest wird für alle wichtigen Systemelemente durchgeführt, eine Verknüpfung der Werte findet nicht statt.

Neuhaus demonstriert anschließend die vorgestellten Zusammenhänge an zwei Hochregallagern. Das vorgeschlagene Vorgehen zur Überprüfung der Zuverlässigkeit setzte sich in der Praxis nicht durch. Durchsetzen konnte sich allerdings die Ansicht, dass die Verfügbarkeit eine Kenngröße zur Beschreibung der Zuverlässigkeit ist, die Zuverlässigkeit

---

<sup>8</sup>Mean Time Between Failure, engl.: Mittlere Zeitdauer zwischen zwei Ausfällen

<sup>9</sup>Mean Time To Repair, engl.: mittlere Ausfalldauer

<sup>10</sup>Bezogen auf die von ihm berechneten 6 Wochen. Im Vergleich zu den praktizierten 1-3 Testtagen verlängert sich die Testdauer mit diesem Verfahren.

wird nicht mehr als Kennwert abgeprüft.

Neben der Arbeit an seiner Dissertation war Neuhaus auch Mitautor einer Studie [BNS76] über Intralogistiksystemen in Krankenhausanlagen, bei der unter anderem über die Inbetriebnahmephase der Systeme wichtige Erkenntnisse gesammelt wurden, vgl. Kapitel 5.1, S. 55.

### 1.4.3 Dissertation von Hubert Böckmann, 1978

Die Dissertation „Technisch-wirtschaftliche Kriterien hinsichtlich der Verfügbarkeit komplexer Lager- und Warenverteilssysteme“ von Hubert Böckmann entstand nahezu parallel zur Arbeit von Neuhaus und befasst sich ebenfalls mit Zuverlässigkeitskenngrößen für intralogistische Systeme. Böckmann geht sowohl auf Gudehus' als auch auf Neuhaus' Arbeiten ein.

Er begrüßt die Berücksichtigung der Strombelastung bei der Gudehus' Berechnung der Verfügbarkeit, da dieser Zusammenhang nicht nur Erfahrungswerte widerspiegelt, sondern sich in den empirischen Daten zeigt, die er für seine Arbeit sammelt. Er gibt aber zu Bedenken, dass die Gleichung nicht in der Lage ist, Ausfälle bei Leerlauf der Anlage zu beschreiben, da sich bei einer Strombelastung von 0 automatisch eine Verfügbarkeit von 100 % ergibt, was der Realität widerspricht. Daneben ist Böckmann der Ansicht, dass die von Gudehus aus den Gesetzmäßigkeiten der statistischen Fehlerrechnung beruhenden 50 Stunden Testdauer bei weitem nicht ausreichend sind. Seinen Daten zufolge können erste „einigermaßen sichere Aussagen“ erst nach einer Untersuchungsdauer von 6 Monaten getroffen werden [Böc78, S. 53].

An Neuhaus' Arbeit würdigt Böckmann, dass diesem zum ersten Mal eine fast geschlossene Darstellung der Zuverlässigkeit in der Intralogistik gelungen sei. Er widerspricht jedoch dessen Hinweis, dass die Verfügbarkeit das Funktions- und Instandhaltungsverhalten nicht berücksichtigt, da sie von deren Kennwerte, vgl. S. 8, abgeleitet sei und diese originären Kenngrößen auch ohne entsprechende Betonung berücksichtigt würden. Außerdem kritisiert er die von der Literatur abweichenden Formelzeichen, da dies eine anzustrebende Vereinheitlichung der Zuverlässigkeitsarbeit erschwert [Böc78, S. 48].

Nach der Besprechung seiner wissenschaftlichen Vorgänger stellt Böckmann das von ihm entwickelte hierarchisch strukturiertes Lagermodell vor: „Dieses Modell erlaubt durch die Stufung des Automatisierungsgrades die Bewertung des Ausfallverhaltens auf verschiedenen Ebenen des Lagerprozesses. Durch den hierarchischen Aufbau wird es möglich, kritische Bereiche abzugrenzen, Notlösungen festzulegen und den Einfluß von Ausfällen auf die Aufgabenerfüllung des Systems zu ermitteln.“ [Böc78, S. 241]

Es gelingt ihm mit der Auswertung der Verfügbarkeitsdaten von 25 Anlagen eine repräsentative Statistik zu erstellen, aus der ersichtlich wird, dass vor allem die Ladeinheit, also die Beschaffenheit der Paletten, die häufigste Ausfallursache darstellt. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, „daß mit dem bis heute vorhandenen Datenmaterial eine definitionsgemäße Verfügbarkeitskennziffer meist nicht ermittelt werden kann [...]“ [Böc78, S. 242] Abschließend rät Böckmann zu einer alternativen Kennziffer, die die Funktionserfüllung der Anlage in den Vordergrund rückt.

### 1.4.4 Dissertation von Ernst-Martin vom Bover, 2000

In seiner Dissertation „Modellerstellung zur Verfügbarkeitsprognose komplexer Förder- und Lagersysteme“ entwickelte Ernst-Martin vom Bover ein Modell zur Verfügbarkeitsprognose von komplexen intralogistischen Anlagen. Er analysierte dafür zunächst das Verfügbarkeitsverhalten von drei verschiedenen Anlagen, die bereits einige Zeit in Betrieb waren und so ihre Dauerverfügbarkeit erreicht hatten. Zur Beschreibung des Zusammenspiels der verschiedenen Systemelemente verwirft er das Boolesche Modell, welches die Basis für die Empfehlungen der geltenden Regeln bildet: „Das Boolesche Modell, das prinzipiell die Zuverlässigkeit eines Systems bis zum ersten Ausfall betrachtet, berücksichtigt das alternierende Zustandsverhalten reparierbarer Systeme und ihrer Komponenten jedoch nur unzureichend.“ [VB01, S. 43] Stattdessen entwickelt er auf Grundlage der Markov-Theorie<sup>11</sup> sieben Strukturelemente, mit denen er den geplanten Materialfluss abbildet und die Verfügbarkeit des Systems prognostiziert. Auf Basis dieser Prognosemethode wurde am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen der TU Dortmund ein Softwaretool entwickelt, um weitestgehend automatisiert die Verfügbarkeit einer geplanten Anlage zu berechnen [FJ08].

Vom Bover geht nur sehr knapp auf die eben genannten Arbeiten ein: So verweist er auf Gudehus' Hinweis, dass bei der Planung eines intralogistischen Systems rechtzeitig und mit viel Sorgfalt die Auswahl und die Verknüpfung der Systemelemente vorzunehmen ist [VB01, S. 12]. Neuhaus erwähnt er, da sich dessen Untersuchungsergebnisse über ausfallfreie Zeitdauern von Hochregallagerkomponenten mit seinen eigenen Ergebnissen decken [VB01, S. 65]. Auf die Arbeit von Böckmann geht er nicht ein.

Vom Bover befasst sich ausdrücklich nur mit der Prognose der Verfügbarkeit während der Planungsphase. Die aktuellen Fragen zur Durchführung der Kontrolle der vertraglich vereinbarten Werte nach der Realisierung einer Anlage blieben in den letzten dreißig Jahren unbeantwortet. Diese Lücke will die vorliegende Arbeit schließen.

---

<sup>11</sup>Auf die Markov-Theorie und ihre Eignung zur Verfügbarkeitsberechnung von intralogistischen Anlagen wird in Kapitel 6.3.4, S. 82ff eingegangen.



---

# Status Quo

## Kapitel 2 - Kapitel 6

## 2 Das geltende Regelwerk

### 2.1 Übersicht über das geltende Regelwerk

Es existieren in Deutschland eine Vielzahl von Normen und Richtlinien, die sich mit der Abnahme bzw. der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von intralogistischen Anlagen beschäftigen. Sie werden in diesem Kapitel vorgestellt und ihre wichtigsten Inhalte dargestellt. Die Bewertung des Regelwerk erfolgt in Kapitel 3. Anschließend erfolgt ein kurzer Überblick über verwandte Regeln außerhalb der Branche Intralogistik und außerhalb Deutschlands.

#### 2.1.1 DIN-Normen

Für die Betrachtung der Zuverlässigkeit in der Intralogistik gibt es keine eigenen DIN-Normen. Trotzdem sind im Wesentlichen zwei DIN-Normen für das Themengebiet hilfreich: In der DIN 40041: „Zuverlässigkeit: Begriffsklärungen“ (veröffentlicht im Dezember 1990) [DIN90] finden sich die Definitionen von Grundbegriffen, Begriffen zu Zuständen und Ereignissen, Merkmale für Zuverlässigkeitsbetrachtungen, Bestimmungs- und Einflussfaktoren im Hinblick auf Zuverlässigkeitskenngrößen sowie Aspekten zu Zuverlässigkeitsprüfungen. Außerdem sind Formelzeichen, Gleichungen und erläuternde Abbildungen aufgeführt.

Die DIN-Norm 31051: „Grundlagen der Instandhaltung“ (Juni 2003) [DIN03] behandelt mit der Instandhaltung eine wichtige Einflussgröße auf die Verfügbarkeit von intralogistischen Anlagen. Dort sind Begriffsdefinitionen speziell für die Instandhaltung zusammengestellt. Hierbei erfolgt die Aufteilung der Instandhaltung in die Bereiche Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung.

#### 2.1.2 Die Richtlinien des VDI

Die Richtlinien des Vereins deutscher Ingenieure (VDI) geben seit 1884 Empfehlungen zur Standardisierung von technischen Prozessen und Komponenten [VP09]. Zum Themenkomplex Zuverlässigkeit in der Intralogistik gibt es eine Vielzahl von VDI-Richtlinien:

Als erstes ist hier das VDI-Handbuch „Technische Zuverlässigkeit“ zu nennen, das aktuell aus 58 einzelnen Richtlinien besteht<sup>12</sup> und ständig überarbeitet wird. Ziel des Handbuches ist zum einen die Grundlagen für die systematische Erfassung der stochastischen bzw.

---

<sup>12</sup>Beispielsweise VDI 4008, Blatt 1-9 mit Verfahren zur Zuverlässigkeitsanalyse

probabilistischen Zuverlässigkeitskennwerte zu legen. Zum anderen sollen Methodik, Systematik und die spezifischen Berechnungsmethoden der Zuverlässigkeitstheorie in einer interdisziplinär nutzbaren Form dargestellt werden, vgl. [VDI98b, S. 3f] und [VB01, S. 13]. Daneben gibt es eine Reihe von VDI-Richtlinien, die sich speziell mit intralogistischen Anlagen befassen. Sie werden im Folgenden genauer dargestellt und in Abbildung 2.1 gemeinsam mit dem Regelwerk der FEM aus Kap. 2.1.3 übersichtlich eingeordnet.

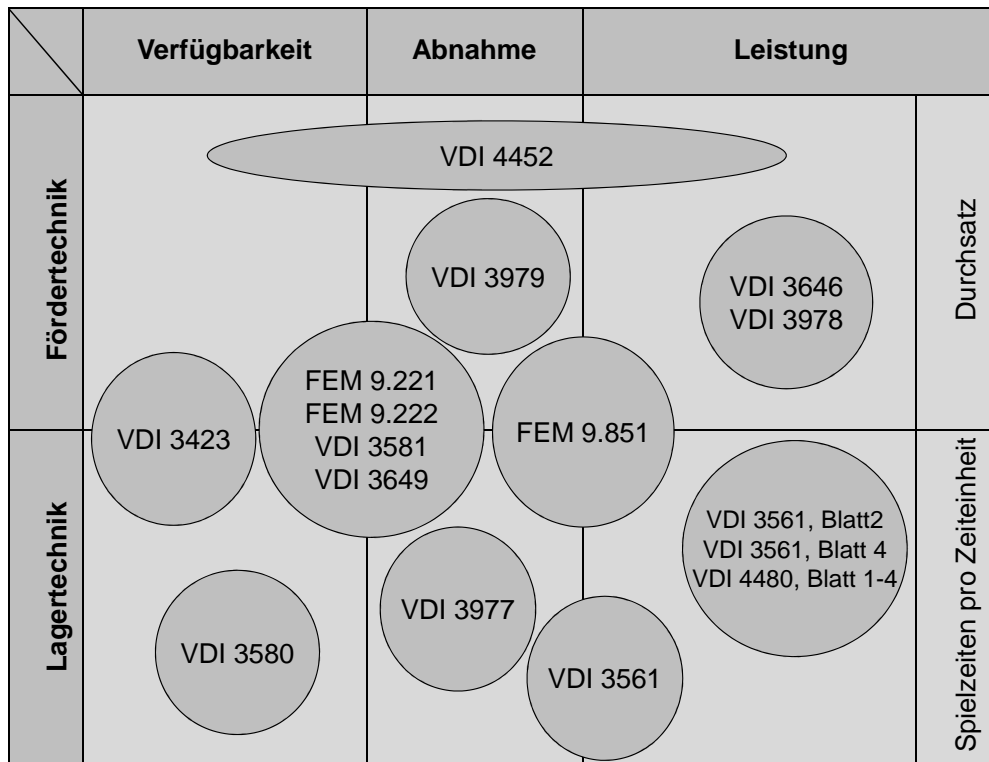


Abbildung 2.1 Thematische Einordnung der VDI-Richtlinien und FEM-Regeln

### Abnahme

Die Abnahmeprozedur an sich wird in zwei Richtlinien beschrieben: Für den Bereich Lagertechnik gilt die VDI 3977: „Abnahme Lagersysteme“ (Juli 1993) [VDI93]. Im Bereich der Fördertechnik gibt es die VDI 3979: „Abnahme Stückgutförderer“ (Juli 1992) [VDI92c], sie wurde 2002 inhaltlich überprüft und ist weiterhin unverändert gültig. Beide Richtlinien geben Empfehlungen von der Vertragsunterzeichnung über Funktions- und Leistungsprüfung bis zur Endabnahme.

Wichtiger Bestandteil und meist der Abschluss der Abnahmetests ist die Messung der Verfügbarkeit. Die Erfassung der Messdaten und Berechnung der Verfügbarkeit wird in eigenen Richtlinien behandelt:

### Verfügbarkeit

In der VDI 3423: „Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen - Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung“ (Januar 2002) [VDI02a] werden eine Vielzahl von themenspezifischen Formelzeichen definiert und miteinander in Beziehung gesetzt.

Die VDI 3580: „Grundlagen zur Erfassung von Störungen an Hochregalanlagen“ (Oktober 1995) gibt standardisierte Protokolle und Vorgehensweisen zur Hand, um Störungen - und damit Nichtverfügbarkeiten - zu erfassen [VDI95].

Die VDI 3581: „Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente“ [VDI04a] stellt Formeln zur Verfügung, um aus den gemessenen Werten der Anlagenelemente die Gesamtverfügbarkeit zu berechnen. Sie wurde erstmals 1983 unter dem Namen „Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen“ [VDI83] veröffentlicht. Im Jahre 2004 wurde sie unter ihrem heutigen Namen weiterentwickelt und neu herausgegeben. Zwei Jahre später, im Jahr 2006, erfolgte eine Berichtigung, da sich einige falsche Bezeichnungen und Querverweise eingeschlichen hatten.

Ihre Ergänzung findet sie in der VDI 3649: „Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung“ [VDI92b] (Januar 1992, Überprüfung August 2002), die verschiedene Fälle wie Teilredundanzen und Puffer berücksichtigt. Sie stellt vor, wie Puffer und Teilredundanzen adäquat bei der Berechnung der Gesamtverfügbarkeit berücksichtigt werden können.

### Leistung

Für eine angemessene Wirtschaftlichkeit ist - neben der Verfügbarkeit - die Leistung, bzw. die Leistungsfähigkeit der Anlage die entscheidende Kennzahl. Physikalisch ist die Leistung definiert als das Verhältnis von getaner Arbeit zur benötigten Zeitdauer. In der Intralogistik wird unter Leistung der Quotient aus der Anzahl von Bewegungseinheiten und der betrachteten Zeitdauer verstanden, also der Durchsatz (→ Förderleistung) oder Spiele<sup>13</sup> pro Zeiteinheit (→ Umschlagsleistung) [HH06, S. 134]. In der manchen Richtlinien wird statt Leistung der Begriff Last verwendet, z. B. [VDI98a].

**Im Bereich Lagertechnik** gilt hier die VDI 3561: „Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen“ (Juli 1973) [VDI73]. Sie wird ergänzt durch Blatt 2: „Spielzeitermittlung von regalgangunabhängigen Regalbediengeräten“ (Februar 2009) [VDI09a] und Blatt 4: „Spielzeitermittlung von automatischen Kanallager-Systemen“ (Juli 2009) [VDI09b]. Sie enthalten klare Messvorschriften zur eindeutigen Ermittlung von Spielzeiten. Durchsätze werden in der Reihe VDI 4480 Blatt 1-4 „Durchsatz von automatischen Lagern“ (Februar 1998 - Juli 2002) behandelt [VDI98a, VDI02b, VDI99b, VDI02c]. Diese Richtlinien gehen auf die Belange von Lagern mit gassengebundenen bzw. nicht gassengebundenen Regalbediengeräten, von Umlauflagern und Lagern mit mehrfachtiefer Lagerung ein. **Im Bereich Fördertechnik** geben VDI 3646: „Spielzeitermittlung von Fördermitteln der Stetigfördertechnik in automatisierten Lagersystemen“ (November 1994) [VDI94] und VDI 3978: „Spielzeit-Leistungsberechnung bei Fördersystemen“ (August 1998) [VDI98a] Hilfestellung zur Spielzeitermittlung. Die Letztgenannte befasst sich auch mit der Durchsatzermittlung.

### Fahrerlose Transportsysteme

Neben diesen genannten Richtlinien, die sich jeweils mit Teilaspekten der Abnahme von intralogistischen Anlagen befassen, gibt es noch die VDI 4452: „Abnahme für Fah-

<sup>13</sup>Ein Spiel ist die Zeitdauer für einen kompletten Zyklus, z. B. bei Regalbediengeräten von der Aufnahme des Lagergutes über die Übergabe ins Lagerfach einschließlich der anschließenden Fahrt zum nächsten Auftragsort.

rerlose Transportsysteme“ (November 2004) [VDI04b]. Sie behandelt alle Aspekte der Abnahme und bezieht sich dabei auf die spezifischen Anforderungen von Fahrerlosen Transportsystemen.

### 2.1.3 Das Regelwerk der FEM

So wie der VDI in Deutschland den Stand der Technik in Richtlinien erarbeitet und herausgibt, gibt es auf europäischer Ebene die Fédération Européenne de la Manutention (FEM), zu deutsch „Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik“. Sie besteht derzeit aus 13 nationalen Verbänden, wie dem VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) aus Deutschland oder der British Materials Handling Federation aus Großbritannien.

Zum Themenkomplex der Abnahme gibt es drei FEM-Regeln: FEM 9.221: „Leistungsnachweis für Regalbediengeräte: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit“ (Oktober 1981) [FEM81], FEM 9.222: „Abnahme und Verfügbarkeitsberechnung (Anlagen mit Regalbediengeräten und anderen Gewerken)“ (Juni 1989) [FEM89] und der FEM 9.851: „Spielzeiten“ (Juni 2003) [FEM03]. Ihr Inhalt gleicht im Wesentlichen den VDI-Richtlinien.

Dr. Erich Zahn, Heidelberger Druckmaschinen AG, einer der Autoren der FEM 9.222 berichtet: „Die Absicht hinter dieser Regel war die eindeutige Abgrenzung der Verantwortung: Die Dauer eines Stillstands ist nicht nur abhängig von der Schwere der Störung, sondern auch vom Verhalten des Betreibers.“ Ist das Instandhaltungspersonal sofort verfügbar und entsprechend ausgebildet, um die Störung in angemessener Zeit zu beheben? Sind die Ersatzteile wie empfohlen vorrätig? Diese Aspekte kann der Lieferant der Anlage nicht beeinflussen, er soll also auch nicht dafür haften. Die FEM-Regel 9.222 zeigt auf, in welcher Weise die Ausfallzeiten aufteilbar sind, vgl. [FEM89, S. 3], und überlässt es dann den Vertragspartnern, sich darüber zu einigen, welche Zeiten in die Berechnung der vertraglich relevanten Verfügbarkeit eingehen. Ausfallzeiten während der Betriebszeit wirken sich in der Regel verfügbarmindernd aus, Ausfallzeiten während der Bereitschaftszeit dagegen nicht [Mai10b, S. 21].

## 2.2 Die wesentlichen Inhalte

Die wesentlichen Inhalte dieser Vielzahl von Richtlinien werden im Folgenden in zusammengefasster Form vorgestellt. Als wichtigste Regeln im Bezug auf die Verfügbarkeitsberechnung gelten die VDI-Richtlinien 3581 und 3649 und die FEM 9.222, vgl. [VB01, S. 13].

### 2.2.1 Bestimmungen zum Verfügbarkeitstest im Rahmen der Abnahme

Der Verfügbarkeitstest wird in den VDI-Richtlinien übereinstimmend als Voraussetzung zur Erklärung der Abnahme genannt, vgl. [VDI93, S. 5], [VDI92c, S. 1, S. 4].

Stattdessen sollte der Verfügbarkeitstest nach erfolgreichem Leistungstest, spätestens nach drei Monaten Nutzung der Anlage [VDI93, S. 3], bzw. in der konstanten Betriebsphase, ca. 3-6 Monate nach Inbetriebnahme [VDI92b, S. 13]. Für die Dauer des Test werden fünf bis zehn Messtage bei Sollleistung empfohlen, vgl. [VDI93, S. 3], [VDI92b, S. 13].

Dem Ablaufschema der FEM 9.222 (vgl. Abbildung 2.2) ist zu entnehmen, dass der Verfügbarkeitstest eine gewisse Zeit nach der Erklärung der Abnahme (hier zeitgleich zur Inbetriebnahme) und damit unabhängig vom Gewährleistungsbeginn stattfinden soll. Dieser und der Gefahrenübergang fallen üblicherweise mit der Erklärung der Abnahme zusammen. Wird die Anlage bereits vor der Abnahme genutzt, werden besondere Vereinbarungen empfohlen, vgl. [VDI93, S. 4], bzw. der Nutzungsbeginn markiert den Zeitpunkt des Gefahrenübergangs und den Beginn der Gewährleistung [FEM89, S. 5].

Werden im Rahmen der Abnahme Mängel festgestellt, wird empfohlen, diese in einer Mängelliste anzugeben, außerdem ist festzulegen, von wem und bis zu welchem Termin die Mängel zu beseitigen sind und wer die Kosten übernimmt, vgl. [VDI92c, S. 4, S. 7], [VDI93, S. 2] Darüberhinaus rät die VDI 3979: „Sollten über Art und Umfang der Mängel unterschiedliche Auffassungen bestehen, wäre zu vereinbaren, daß ein unabhängiger Sachverständiger hinzuzuziehen ist und wer dessen Kosten trägt“ [VDI92c, S. 4].

Auf die widersprüchlichen Aussagen zur Reihenfolge von Verfügbarkeitstest und Erklärung der Abnahme wird in Kapitel 3.5 eingegangen.

### 2.2.2 Verfügbarkeit allgemein

Eine allgemeine Definition der Verfügbarkeit findet sich in der VDI-Richtlinie 4001, Blatt 2: „Terminologie der Zuverlässigkeit“:

„Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen erfüllen zu können, vorausgesetzt, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind“ [VDI05, S. 52].

In den Richtlinien wird der konkrete Wert dieser Fähigkeit als Wahrscheinlichkeit angegeben:

„Die Verfügbarkeit eines Elementes oder eines Teilsystems in einer Transport- oder Lageranlage ist die Wahrscheinlichkeit, die betrachteten Einheiten zu einem beliebigen Zeitpunkt während der Betriebszeit in einem ordnungsgemäß funktionierenden Zustand anzutreffen“ [VDI04a, S. 2], vgl. auch [VDI92b, S. 2], [FEM89, S. 3] und [HH06, S. 224].

Nach dem französischen Mathematiker Pierre-Simon Laplace (1749-1827) berechnet sich die Wahrscheinlichkeit aus dem Verhältnis von günstigen Ereignissen zur Gesamtmenge der Ereignisse eines betrachteten Falles. Auf die Verfügbarkeit übertragen berechnet sich diese daraus folgend aus dem Verhältnis von funktionsfähigen Zeitdauern eines Systems zu dessen gesamten Betriebsdauer, vgl. [Mai08a, S. 48].

In der Darstellung als Formel ergeben sich daraus zwei Gleichungen: Entweder man berechnet die Verfügbarkeit  $\eta$  aus der Einschaltzeit  $T_E$  und der Ausfallzeit  $T_A$  nach Gleichung (2.1) [VDI04a, S. 4], [VDI92b, S. 2], [FEM89, S. 3]:

$$\eta = \frac{T_E - T_A}{T_E} \quad (2.1)$$

oder aus den mittleren störungsfreien Zeiten  $MTBF$  und den mittleren Reparaturdauern  $MTTR$  (vgl. Kapitel 1.4.3, S. 8) nach Gleichung (2.2) [VDI04a, S. 4], [VDI92b, S. 2],

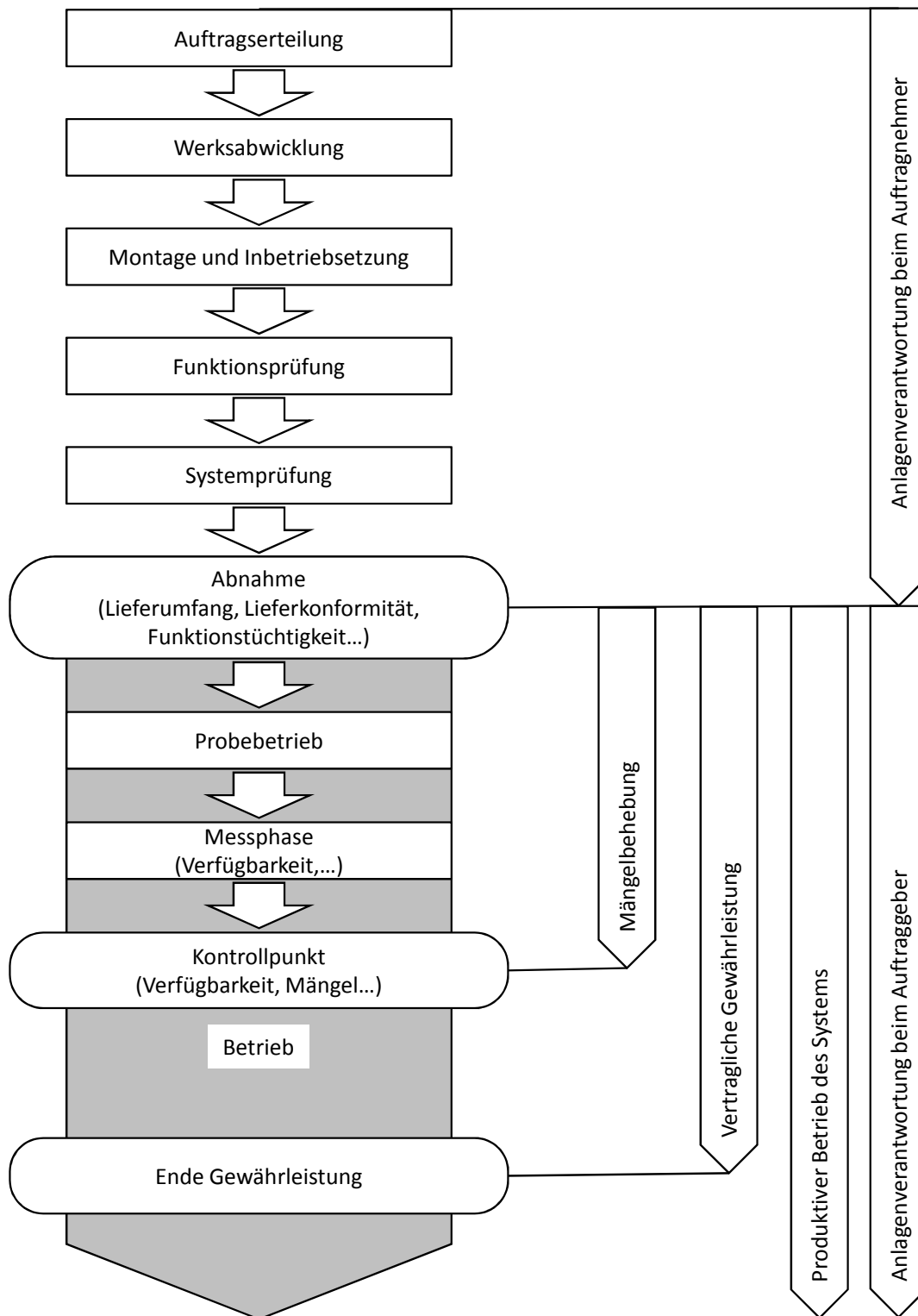


Abbildung 2.2 Auftrags-Ablaufschema [FEM89, S. 8]

[FEM89, S. 4]:

$$\eta = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.2)$$

Gleichung (2.1) eignet sich dabei vorrangig für die praktische Verfügbarkeitsmessung bestehender Anlagen, Gleichung (2.2) eignet sich dagegen eher für theoretische Betrachtungen. Abgesehen von evtl. auftretenden Rundungsfehlern führen beide Berechnungen zum identischen Ergebnis.

Zur Vereinfachung einiger der folgenden Gleichungen wird in der VDI 3581 [VDI04a, S. 4] die Verwendung der Nichtverfügbarkeit  $\mu$  empfohlen:

$$\mu = 1 - \eta \quad (2.3)$$

### 2.2.3 Berechnung der Gesamtverfügbarkeit

Wurden die Verfügbarkeiten der einzelnen Elemente, wie beispielsweise eines Regalbediengerätes oder eines Verschiebewagens gemäß den Gleichungen (2.1) oder (2.2) berechnet, werden diese verknüpft, um eine Aussage über die Verfügbarkeit des Gesamtsystems zu treffen. Für die Verknüpfung werden in den Richtlinien zwei Möglichkeiten vorgeschlagen, die im Folgenden vorgestellt werden.

#### Verknüpfung nach dem Booleschen Modell

Das Boolesche Modell ist ein „Funktionsfähigkeitsmodell, bei dem die auftretenden Zusammenhänge und Verknüpfungen in Form von Booleschen Funktionen mit zweiwertigen Variablen zur Charakterisierung der Zustände der Systembestandteile gegeben sind.“ [VDI98c, S. 2] Nach dieser Definition kann ein Element entweder verfügbar (Verfügbarkeit = 1) oder nicht verfügbar (Verfügbarkeit = 0) annehmen. In den Intralogistik-Richtlinien wurde auf diese Einschränkung verzichtet und alle Werte zwischen 0 und 1 zugelassen.

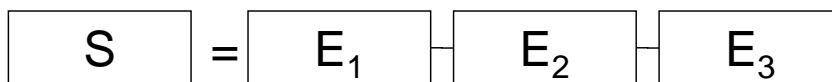
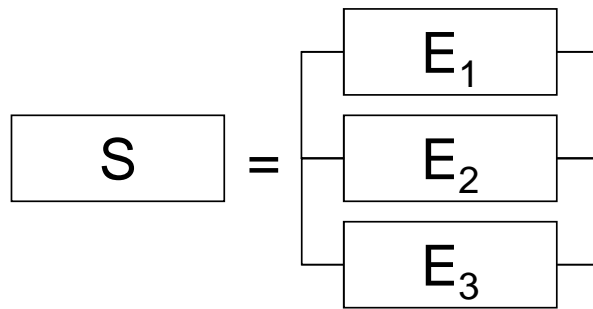


Abbildung 2.3 Serielles System, Darstellung im Blockdiagramm [VDI98c, S. 4]

Für ein **serielles System** (Beispiel Abbildung 2.3) berechnet sich die Systemverfügbarkeit  $\eta_S$  nach Gleichung (2.4). Für die Verfügbarkeit des Gesamtsystems  $S$  ist es nötig, dass alle Elemente  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  verfügbar sind.

$$\eta_S = \eta_{E_1} \cdot \eta_{E_2} \cdot \eta_{E_3} \quad (2.4)$$

Bei strukturell **parallel** angeordneten Elementen wird die Boolesche Oder-Verknüpfung [VDI98a] empfohlen, das Gesamtsystem  $S$  aus Abbildung 2.4 beispielsweise ist also verfügbar, wenn mindestens eines der drei Elemente funktionsfähig ist.



**Abbildung 2.4** Paralleles System, Darstellung im Blockdiagramm [VDI98c, S. 4]

Die Gesamtverfügbarkeit  $\eta_S$  berechnet sich dann aus den Elementverfügbarkeiten  $\eta_{E_1}$ ,  $\eta_{E_2}$  und  $\eta_{E_3}$  nach Gleichung (2.5):

$$\eta_S = 1 - (1 - \eta_{E_1})(1 - \eta_{E_2})(1 - \eta_{E_3}) \quad (2.5)$$

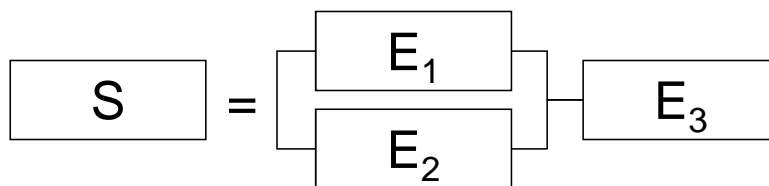
Unter Verwendung von Gleichung (2.3) vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$\eta_S = 1 - \mu_{E_1} \cdot \mu_{E_2} \cdot \mu_{E_3} \quad (2.6)$$

**Komplexe Systeme** setzen sich aus mehreren seriellen und parallelen Subsystemen zusammen [VDI04a, S. 6]. Zur Berechnung der Gesamtverfügbarkeit wird zunächst mit den Gleichungen (2.4) und (2.6) die jeweilige Verfügbarkeit der Subsysteme berechnet und anschließend analog dazu aus den Verfügbarkeitswerten der Subsysteme die Verfügbarkeit des Gesamtsystems.

Das System aus Abbildung 2.5 berechnet sich dem zufolge nach:

$$\eta_S = (1 - \mu_{E_1} \cdot \mu_{E_2}) \cdot \eta_{E_3} \quad (2.7)$$



**Abbildung 2.5** Komplexes System, Darstellung im Blockdiagramm [VDI98c, S. 5]

Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht über die Ergebnisse der Gesamtverfügbarkeiten der Beispielsysteme aus den Abbildungen 2.3 bis 2.5 bei angenommenen Elementverfügbarkeiten.

### Verknüpfung mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren

Alternativ zum Booleschen Modell hat sich für die Anwendung in der Praxis die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren bewährt. Sie erfolgt in



**Tabelle 2.1** Übersicht über die Rechenergebnisse bei angenommenen Elementverfügbarkeiten

Element	$E_1$	$E_2$	$E_3$
Elementverfügbarkeit	99 %	98 %	97 %
System	seriell	parallel	komplex
Abbildung	2.3	2.4	2.5
Gleichung	(2.4)	(2.5, 2.6)	(2.7)
Gesamtverfügbarkeit	94,1094 %	99,9994 %	96,9806 %

Abwandlung von Gleichung (2.1) nach Gleichung (2.8), vgl. [VDI04a, S. 11], [FEM89, S. 4]:

$$\eta_S = 1 - \frac{1}{T_E} \sum_{i=1}^n k_i \cdot T_{A_i} \quad (2.8)$$

Der Gewichtungsfaktor  $k_i$  gibt Auskunft über den Einfluss einer Störung des Systemelements  $i$  auf die Funktion der Gesamtanlage mit  $n$  Systemelementen, vgl. [FEM89, S. 4].

Zur Festlegung des Gewichtungsfaktors gibt es mehrere Möglichkeiten:

**Gewichtung nach Redundanz:** Bei Reihenanordnung der Elemente ist  $k_i = 1$ , bei Parallelanordnung wird  $1 \geq k_i > 0$ . Bei  $n$  gleichen Anlagenteilen wird  $k_i = \frac{1}{n}$ , vgl. [FEM89, S. 4], [VDI04a, S. 11].

**Gewichtung nach Materialfluss:** Der Gewichtungsfaktor berücksichtigt den Durchsatz des Anlagenelements am Gesamtdurchsatz. Dies wurde in der ersten Version der VDI-Richtlinie 3581<sup>14</sup> so empfohlen [VDI83, S. 7] und wird auch heute noch praktiziert<sup>15</sup>.

**Gewichtung nach Funktion:** Je nach betrachteter Funktion hat der Ausfall eines Elements stärkeren oder schwächeren Einfluss auf die Funktion der Gesamtanlage. So kann bei Ausfall eines Regalbediengerätes das Einlagern in einem mehrgassigen Lager bei chaotischer Lagerung leicht von einem anderen Regalbediengerät übernommen werden. Der Gewichtungsfaktor kann demnach kleiner 1 angesetzt werden. Bei Auslagerung eines bestimmten Artikels, der sich in der Gasse mit dem ausgefallenen Regalbediengerät befindet, ist der Gewichtungsfaktor gemäß der hohen Beeinträchtigung durch den Ausfall des Elements gleich 1 anzusetzen, vgl. [Fra00, S. 39].

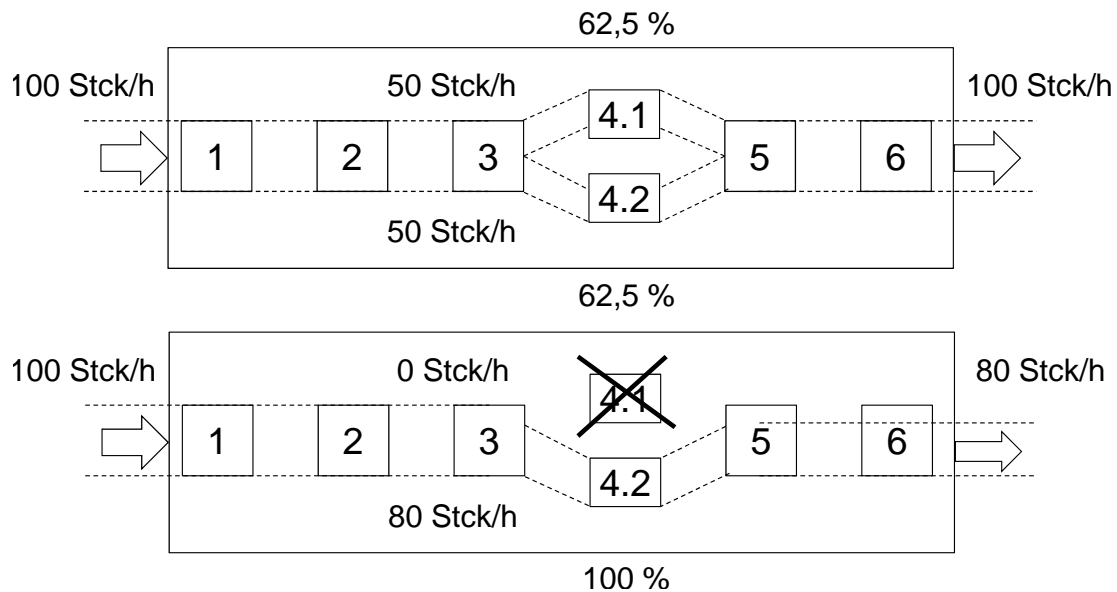
Je nach Anlage werden die Gewichtungsfaktoren von Betreibern und Anlagen meist individuell in einer Mischgewichtung aus den drei genannten Möglichkeiten festgelegt.

Die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren führt zu einem anderen Ergebnis als die Verknüpfung mit der Booleschen Methode. Im Beispiel der VDI 3581 führt Boole zu einer Gesamtverfügbarkeit von  $\eta_S = 91,28\%$ <sup>16</sup>, während die Gewichtungsfaktoren eine Gesamtverfügbarkeit von  $\eta_S = 95,67\%$  ergeben. Die unterschiedlichen Ergebnisse werden in der Richtlinie nicht kommentiert oder bewertet, vgl. [VDI04a, S. 14].

<sup>14</sup>dort als Strombelastungsfaktor  $g_k$  bezeichnet

<sup>15</sup>Bei der Berechnung der Verfügbarkeit der Elektrohängebahn der Produktionsanlage der LSG Sky Chefs Deutschland GmbH in Frankfurt am Main wurden die Gewichtungsfaktoren der Elemente derart festgelegt, vgl. Kapitel 4, S. 40ff. Lieferant: Louis Schierholz GmbH, Bremen, Planung: i+o Industrieplanung und Organisation GmbH, Heidelberg, Inbetriebnahme der Anlage: Mai 2008 [LSG09]

<sup>16</sup>Bei Randbedingung: Alle Elemente werden mit in die Betrachtung einbezogen. Es wird daneben noch ein zweiter Fall mit anderer Randbedingung dargestellt.



**Abbildung 2.6** Parallelschaltung bei Teilredundanz  
oben: Ausgangslage; unten: bei Störung [VDI92b, S. 7]

## 2.2.4 Puffer und Teilredundanzen

Da die bekannten Gleichungen für Reihen- und Parallelschaltung zur Beurteilung des Verfügbarkeitsbeitrags von Teilredundanzen und Puffern nicht ausreichen, wird in der Richtlinie VDI 3649 [VDI92b] der technische Durchsatz  $\lambda_{Tech}$  eingeführt:

$$\lambda_{Tech} = \frac{\lambda_{Soll}}{\eta_{ges}} = \lambda_{Soll} + \lambda_{Res} \quad (2.9)$$

dabei ist:

$\lambda_{Soll}$ : der geforderte Durchsatz (Soll-Durchsatz) in Anzahl pro Zeiteinheit

$\eta_{ges}$ : die Gesamtverfügbarkeit des Systems

$\lambda_{Res}$ : der Durchsatz, der zusätzlich zum geforderten Durchsatz aufgebracht werden kann.

### Teilredundanzen

Eine Teilredundanz liegt vor, wenn der Gesamtdurchsatz auf zwei oder mehr parallelgeschaltete Einheiten aufgeteilt wird, die mit einer Leistungsreserve ausgelegt sind. So kann im Störfall der Durchsatz durch das gestörte Element zumindest teilweise von dem/den anderen Elementen übernommen werden. Im Beispiel von Abbildung 2.6 haben die beiden redundanten Elemente 4.1 und 4.2 jeweils einen Solldurchsatz  $\lambda_{Soll}$  von 50 Stück/h und eine Leistungsreserve  $\lambda_{Res}$  von 30 Stück/h. Das ergibt einen technischen Durchsatz  $\lambda_{Tech}$  von 80 Stück/h.

Der Kennwert  $p_{Tech,i}$  gibt an, welchen Anteil vom Gesamtsolldurchsatz  $\lambda_{Soll,ges}$  das Element  $i$  maximal übernehmen kann, wenn dieses ohne Störung betrieben wird.

$$p_{Tech,i} = \frac{\lambda_{Tech,i}}{\lambda_{Soll,ges}} \quad (2.10)$$

Im Beispiel ist  $p_{Tech4.1} = p_{Tech4.2} = 0,8$ .<sup>17</sup>

Die Verfügbarkeit des teileredundanten Teilsystems berechnet sich bei zwei Elementen (hier 4.1 und 4.2) wie folgt:

$$\eta_4 = 1 - [(1 - \eta_{4.1})(1 - p_{Tech4.2}) + (1 - \eta_{4.2})(1 - p_{Tech4.1}) - (1 - \eta_{4.1})(1 - \eta_{4.2})(1 - p_{Tech4.1} - p_{Tech4.2})] \quad (2.11)$$

Das gesamte System aus Abbildung 2.6 berechnet sich dann wiederum entsprechend der Booleschen Gleichung für serielle Systeme (siehe Gleichung (2.4)) nach Gleichung (2.12)

$$\eta_{ges} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \quad (2.12)$$

### Puffer

Mit einem **Puffer** können seriell angeordnete Elemente entkoppelt werden, sodass bei der Störung eines Elements die anderen Elemente dieses Teilsystems nicht in ihrem Betrieb blockiert werden.

$$\eta_p = \frac{T_E - (T_A - f \cdot T_A)}{T_E} \quad (2.13)$$

Liegt bei  $m$  Elementen in der Serienschaltung ein Puffer zwischen Element  $n$  und Element  $n + 1$ , so berechnet sich die Verfügbarkeit dieses Teilsystems nach:

$$\eta_{ges} = \left( \sum_{i=1}^n \eta_i + f \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^n \eta_i \right) \right) \cdot \sum_{i=n+1}^m \eta_i \quad (2.14)$$

dabei ist  $f$  die Pufferkapazität (Anteil der durch den Puffer abgefangenen Störungszeit, z. B. 2/3).

Die Gesamtverfügbarkeit berechnet sich dann wie bisher aus der Anordnung der Teilsysteme nach den Gleichungen (2.4) bei Reihenverknüpfung und (2.5) bei Parallelverknüpfung der einzelnen Teilsysteme. Die Anwendung der Näherungsgleichung (2.8) ist nicht möglich, da für die adäquate Bewertung der Puffer und Teileredundanzen keine Gewichtung möglich ist.

Außerdem wird darauf hingewiesen, dass nur solche Ausfalldauern zu berücksichtigen sind, die eindeutig dem Lieferanten zuzuordnen sind.

## 2.3 Exemplarische Regeln aus anderen Branchen und Ländern

### 2.3.1 Regeln anderer Branchen

Zum Themengebiet Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit gibt es auch in anderen Branchen in Deutschland wichtige Normen:

<sup>17</sup>In der Richtlinie folgt auf die Abbildung ein Zahlenbeispiel mit gleichen Durchsatzzahlen, aber einer geänderten Durchsatzreserve von 12,5 Stück ( $\hat{=}25\%$ ) anstatt 30 Stück ( $\hat{=}60\%$ )

Die beiden DIN-Normen DIN EN 60300-3-4: „Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-4: Anwendungsleitfaden – Anleitung zum Festlegen von Zuverlässigkeitsforderungen“ [DIN08] und DIN-Norm 50126 „Bahnanwendungen“<sup>18</sup> [DIN00] erläutern Aspekte der Zuverlässigkeit. Erstgenannte gibt Hilfestellungen zum Zuverlässigkeitsmanagement, die zum großen Teil branchenunabhängig anwendbar sind, einzelne Detailausführungen beziehen sich aber eher auf Elektronikbauteile. Die zweitgenannte Norm befasst sich mit dem Zusammenspiel von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit<sup>19</sup> bezogen auf Bahnanwendungen.

### 2.3.2 Regelungen im Ausland

Die Besonderheit von intralogistischen Anlagen wird auch außerhalb Deutschlands in Regeln und Richtlinien erläutert. So widmet sich die europäisch-österreichische Norm EN 528 [Öno03] der Sicherheit und der Vermeidung von Gefährdungen von Regalbediengeräten. Sie regelt auch die Prüfungen vor der ersten Inbetriebnahme [Öno03, S.26] und nötige Instandhaltung [Öno03, S. 30].

In Großbritannien finden sich zwei Normen des Verteidigungsministeriums, die sich mit der Zuverlässigkeit und Instandhaltung aller für die Verteidigung nötigen Güter und Prozesse inklusive Schnittstellen und Personen beschäftigen. Es geht hier vor allem um den Aufbau von standardisierten Zuverlässigkeitsprozessen und deren Dokumentation [DEF08a, DEF08b].

In den USA organisiert sich die Intra- und Extralogistikbranche mit über 800 teilnehmenden Unternehmen im „Material Handling Industry of Amerika“ (MHIA). Die Abteilung AS/RS<sup>20</sup> gibt in einem Industriestandard aus dem Jahr 1999 (ausdrücklich keine Norm, vgl. [MHI99, S. 15]) eine Empfehlung zur Messung der Zuverlässigkeit:

„The measure of reliability of a piece of equipment equals the operating time divided by the sum of the operating time plus the down time. For a single piece of equipment, the availability and reliability are the same. The availability of a system is a combination of all the machine availabilities factored into their effect on the system performance.“

Ausführlicher wurde die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit in einem Tagungsbeitrag von 1980 behandelt. Dort findet sich zur Berechnung der Einzelverfügbarkeit die Gleichung (2.15), die den bekannten Zusammenhang aus Gleichung (2.2) mit einer Art Gewichtungsfaktor (SCF: Sustained Capacity Factor) belegt [Zol80, S. 3]. Eine Verknüpfung zur Gesamtanlagenverfügbarkeit findet nicht statt.

$$\% \text{ SystemeAvailability} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR \cdot (1 - SCF)} \cdot 100 \quad (2.15)$$

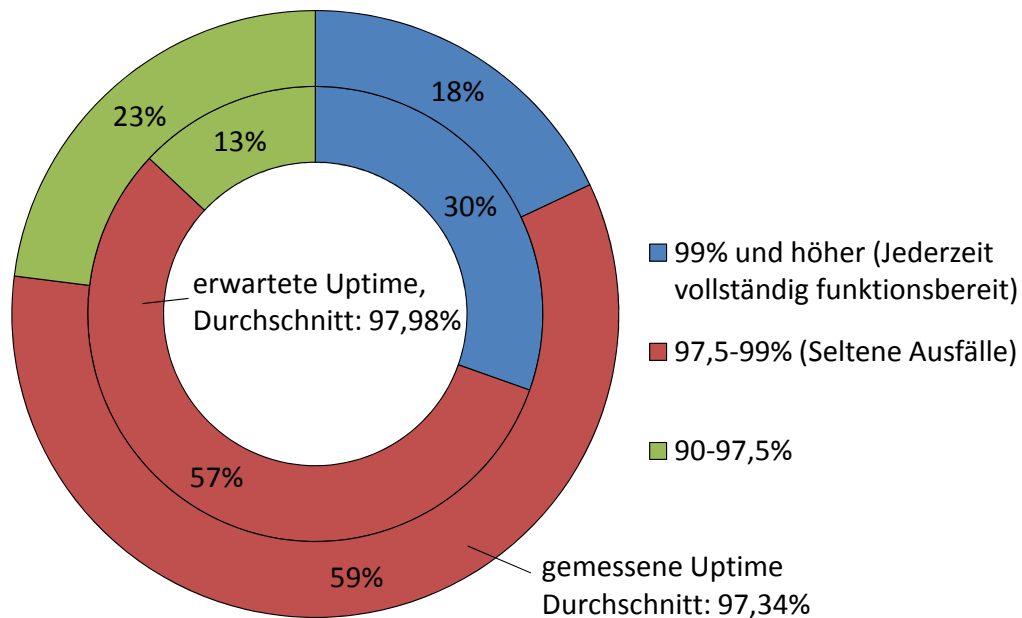
Die Organisation führte in den Jahren 2005 und 2006 gemeinsam mit der Brigham Young University's Marriott School of Management zwei Studien zu automatischen Lagersystemen und Regalbediengeräten durch [Mil07]. Die Forschungsergebnisse zeigten,

<sup>18</sup>Vollständiger Titel: „Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS) Teil 1: Grundlegende Anforderungen und genereller Prozess“

<sup>19</sup>Zusammengefasst zum Akronym RAMS: Reliability (Zuverlässigkeit), Availability (Verfügbarkeit), Maintainability (Instandhaltbarkeit), Safety (Sicherheit)

<sup>20</sup>Automated Storage/Retrieval Systems: Automatische Lagersysteme/Regalbediengeräte

dass die erfahrenen Lagernutzer hohe Erwartungen an ihre Systeme haben. Vor der Abnahme ihrer Anlagen erwarteten die Befragten eine verfügbare Betriebszeit (Uptime) von durchschnittlich 97,98 % (vgl. Abbildung 2.7, innerer Ring). Diese hohe Anforderung entspricht in der Größenordnung den Verfügbarkeitswerten, die auch in Deutschland in Verträgen gefordert werden (vgl. Tabelle 4.4, S. 48).



**Abbildung 2.7** Erwartete und gemessene verfügbare Betriebszeit (Uptime) nach [Kul07, S. 7]

Nach Betriebsstart waren die gemessenen Werte tendentiell etwas niedriger als erwartet, vgl. Abbildung 2.7, äußerer Ring. In der Studie heißt es trotzdem „An overwhelming majority are more than pleased with their system reliability“ [Kul07, S. 7]<sup>21</sup>. Über die Ursachen dieser Diskrepanz kann nur spekuliert werden. Möglicherweise waren die Verfügbarkeitswerte erst deutlich schlechter, so dass die Betreiber froh waren, dass die Erwartung dann doch noch fast erfüllt wurde, oder aber die Erwartungen waren insgeheim pessimistischer als in der Befragung zugegeben.

<sup>21</sup>Eine überwältigende Mehrheit ist mehr als zufrieden mit ihrer Systemzuverlässigkeit.

Gemessen wurde die Verfügbarkeit<sup>22</sup> dabei nach Zusammenhang (2.16):

$$uptime = \frac{\text{Anzahl der Stunden pro Monat, in denen das System vollständig funktionsfähig ist}}{\text{Anzahl der Stunden pro Monat, in denen das System zum Betrieb benötigt wird}} \quad (2.16)$$

Aus der Befragung geht zwar nicht hervor, wie genau verschiedene Zeitabschnitte (vgl. Abbildung 4.3, S. 49) bewertet werden, sodass der Vergleich der Werte ohne diese Kenntnisse keinen direkten Rückschluss darüber zulässt, ob amerikanische Anlagen eine höhere Verfügbarkeit als deutsche aufweisen. Berücksichtigt man allerdings Gleichung (2.16) lassen sich Vermutungen aufstellen: Die wesentlichen Unterschiede zwischen der „amerikanischen“ Berechnungsmethode und der „deutschen“ nach Gleichung (2.1) besteht in den unterschiedlich langen Betrachtungszeiträumen und unterschiedlich genau definierten Ausfallzeiten.

Während bei Gleichung (2.16) ausdrücklich ein ganzer Monat betrachtet wird, ist nach Gleichung (2.1) jeder Zeitraum möglich, wobei in Deutschland üblicherweise die Verfügbarkeit pro Tag berechnet wird und aus diesen Werten evtl. der Durchschnittswert für einen längeren Zeitraum berechnet werden kann (z. B. für einen fünftägigen Abnahmetest, wie in Kapitel 4.3.3 durchgeführt). Wie allerdings in Kapitel 3.2 noch ausführlich gezeigt wird, hat der Betrachtungszeitraum einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Verfügbarkeitswert. In der Einlaufphase nach der Inbetriebnahme (vgl. Kapitel 5) hat der Monatswert keine Aussagekraft bzgl. der tatsächlichen Verfügbarkeit der Anlage. Einzelne schwerere Störungen wirken sich auf längere Betrachtungszeiträume weniger verfügbarkeitsmindernd aus als auf kurze, was für tendenziell höhere Verfügbarkeitswerte in Amerika bei vergleichbarer Qualität sprechen würde. Allerdings werden in Deutschland/Europa viele Stillstandsdauern für die Verfügbarkeitsberechnung ausgeklammert, vgl. Tabelle 4.6, S. 51, was zu einem gegenteiligen Effekt führen kann.

## 2.4 Zusammenfassung Kapitel 2

Die Empfehlungen zur Durchführung der Abnahme intralogistischer Anlagen und zur Berechnung der Anlagengesamtverfügbarkeit der vorgestellten VDI-Richtlinien und der FEM-Regeln bauen aufeinander auf und ergänzen sich gegenseitig. Im Hinblick auf die Reihenfolge der einzelnen Abnahmeschritte treten allerdings auch Widersprüche auf.

Zur Berechnung der Verfügbarkeit einzelner Elemente stehen werden zwei Gleichungen vorgestellt, Gleichung (2.1) aus den gemessenen Ausfalldauern für den Verfügbarkeitsnachweis und Gleichung (2.2) aus den mittleren Ausfalldauern und -abständen für theoretische Betrachtungen, beispielsweise in der Planungsphase. Die Gleichungen liefern äquivalente Ergebnisse.

Zur Verknüpfung der Elemente zum Gesamtsystem stehen zwei Methoden zur Verfügung; die Verknüpfung mit dem Booleschen Modell wird in VDI 3581 und 3649 empfohlen, die Näherungsgleichung mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren in FEM 9.222 und VDI 3581. Das Boolesche Modell kann für vermaschte Systeme nicht verwendet werden, während die Methode mit Gewichtungsfaktoren Puffer und Teilredundanzen nicht adäquat berücksichtigt.

---

<sup>22</sup>Die Verfügbarkeit wird hier als „uptime“, anstatt „availability“ bezeichnet.

Beide Verknüpfungsmethoden schließen in einer anlagenzentrierten Betrachtungsweise von der Gestaltung des Layouts auf die Gesamtverfügbarkeit des Gesamtsystems.

Die Empfehlungen zum Testen der Verfügbarkeitsanforderungen sind in keiner anderen Branche und in keinem anderen Land so weitgehend wie in der deutschen Intralogistikbranche<sup>23</sup>. Allerdings stellt sich trotzdem in der Praxis keine Zufriedenheit mit dem Regelwerk ein, wie im Kapitel 4 dargestellt wird.

---

<sup>23</sup>Die europäischen FEM-Regeln, die international Beachtung finden, wurden ebenfalls im Wesentlichen von deutschen Experten erstellt.

---

## 3 Kritische Auseinandersetzung mit dem Regelwerk

Das Regelwerk will seinen Anwendern, den Betreibern, Planern und Lieferanten von intralogistischen Anlagen das notwendige Handwerkszeug für die Zuverlässigkeitsbestimmung im Rahmen der Abnahme zur Verfügung stellen. Wird es diesem Anspruch gerecht? Mit dieser Frage haben sich in der Vergangenheit schon verschiedene Experten, u. a. [Fra93, Fra00, FJ08], auseinandergesetzt und eine Reihe an Kritikpunkten herausgearbeitet. Im folgenden Kapitel werden diese aufgegriffen und diskutiert. Dabei werden einige Aspekte aktualisiert zusammengefasst, die bereits im Rahmen von Zeitschriftenartikeln veröffentlicht wurden [Mai08a, Mai10b, Mai10c].

### 3.1 Innerer und zeitlicher Zusammenhang der Richtlinien

#### 3.1.1 Querverweise

Eine einzige Richtlinie kann nicht alle Aspekte eines Themengebietes umfassen, es ist daher sinnvoll und richtig, bei der Beschreibung eines bestimmten Sachverhalts auf anderen Richtlinien zu verweisen, die verschiedene Teilaspekte bereits ausführlich beschrieben haben. Auch die genannten VDI-Richtlinien zu Abnahme, Verfügbarkeit und Leistung (vgl. Kapitel 2.1.2) sind durch Querverweise eng miteinander verbunden (vgl. Abbildung 3.1).

Es wird deutlich, dass auf die Richtlinien zur Verfügbarkeitsberechnung (VDI 3580, VDI 3581) naturgemäß sehr häufig hingewiesen wird, auf den Spezialfall der fahrerlosen Transportsysteme (VDI 4452) dagegen gar nicht. Auffällig häufig erfolgt der Verweis auf die Richtlinie 3579: Ausschreibung und Vergabe von Lagersystemen, ausgegeben im April 1994. Diese Richtlinie wurde allerdings im März 2006 ersatzlos zurückgezogen, sodass der Verweis ins Leere führt [VDI92a].

Solche ungültigen Verweise sind zwar sehr ärgerlich, aber bei der großen Anzahl der Richtlinien und der Tatsache, dass diese ehrenamtlich erstellt werden, ist es nicht möglich, alle Verweise zu jeder Zeit aktuell zu halten. Die Möglichkeiten des Internets können hier vielleicht in Zukunft Abhilfe schaffen, in dem beispielsweise auf den Richtlinienseiten der Internetpräsenz des VDI direkt auf veraltete Verweise hingewiesen wird.

Die Übersicht über die Querverbindungen zeigt bereits, dass das Regelwerk einer ständigen Überarbeitung unterliegt, und sich einzelne Richtlinien gegenseitig beeinflussen. Dies soll im nächsten Abschnitt anhand der Regeln zur Verfügbarkeit detailliert verdeutlicht werden.



	verweist auf	VDI 3423	VDI 3561	VDI 3561-2	VDI 3561-4	VDI 3579 (z)	VDI 3580	VDI 3581 (z)	VDI 3581:2004	VDI 3646	VDI 3649	VDI 3977	VDI 3978	VDI 3979	VDI 4452	VDI 4480-1	VDI 4480-2	VDI 4480-3	VDI 4480-4
VDI 3423																			
VDI 3561																			
VDI 3561-2																			
VDI 3561-4																			
VDI 3580																			
VDI 3581																			
VDI 3646																			
VDI 3649																			
VDI 3977																			
VDI 3978																			
VDI 3979																			
VDI 4452																			
VDI 4480-1																			
VDI 4480-2																			
VDI 4480-3																			
VDI 4480-4																			

Abbildung 3.1 Querverbindungen der Richtlinien

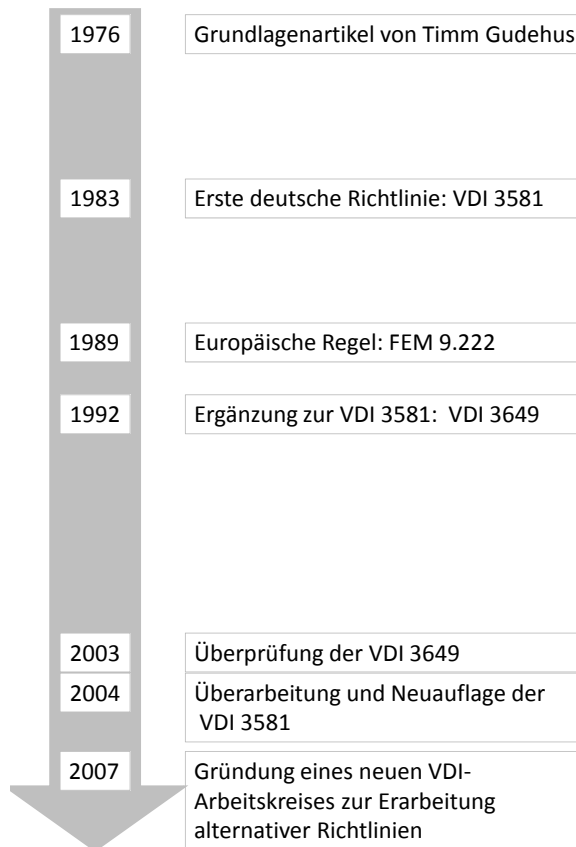
### 3.1.2 Der zeitliche Zusammenhang der Regeln zur Verfügbarkeit

Nachdem Gudehus die Grundlagen 1976 der Zuverlässigkeitstheorie erstmals für intralogistische Systeme angewandt hatte (vgl. Kapitel 1.4.1, S. 6) wurden seine Empfehlungen in zusammengefasster Form in der ersten Fassung der VDI-Richtlinie 3581 herausgegeben.

Noch vor der Verfügbarkeit wurde dort der Kennwert Zuverlässigkeit  $\eta^{zw}$  definiert, als ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass eine betrachtete Funktion störungsfrei und korrekt ausgeführt wird. Berechnet wurde dieser Kennwert nach Gleichung (3.1) aus der Anzahl der richtigen bzw. störungsfreien Funktionserfüllungen  $n_r$  und der Anzahl der falschen bzw. gestörten Funktionserfüllungen  $n_f$ :

$$\eta^{zw} = \frac{n_r}{n_r + n_f} \quad (3.1)$$

Zur Berechnung der Gesamtverfügbarkeit wurden die Elemente gemäß ihren Funktionen verknüpft und graphisch durch Strukturdiagramme mit Verbindungen und Knoten dargestellt.



**Abbildung 3.2** Zeitliche Einordnung der Entwicklung des Regelwerks

Die als „Abkürzung“ bezeichnete Berechnungsmethode mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren wurde ebenfalls bereits in dieser ersten Richtlinie vorgestellt, wobei die Gewichtung mit Hilfe des Strombelastungsfaktors nach dem Anteil des Durchsatzes über das zu gewichtende Element im Verhältnis zum Gesamtanlagendurchsatz erfolgte. Alle nachfolgenden Regeln beziehen sich auf diese Richtlinie vgl. Abbildung 3.2 und betonen jeweils diejenigen Aspekte, die bisher gefehlt haben. So war den Autoren der FEM 9.222 (vgl. Kapitel 2.1.3, S. 14) die Abgrenzung der Verantwortlichkeit bei Störungen sehr wichtig [Mai10b, S. 21] um zu verhindern, dass Bedienfehler des Betreiberpersonals die Stillstandszeiten verlängern, die gemessene Verfügbarkeit dementsprechend sinkt und das evtl. unbefriedigende Ergebnis den Lieferanten zur Last gelegt wird.

Aus diesem Grund wird in der Regel der genauen Aufsplittung der Ausfallzeit nach deren Ursache großen Raum gegeben. Außerdem verändern sich einige Formelzeichen auf die heute gebräuchlichen Symbole, vgl. Tabelle 3.1, wie auch die Definition des Gewichtungsfaktors, die ab jetzt den Einfluss eines Elements auf die Gesamtfunktion beschreibt.

Die in der chronologischen Folge nächste Richtlinie ist die VDI 3649, die sich bereits in ihrem ersten Satz als notwendige Ergänzung zur VDI 3581 bezeichnet, vgl. Kapitel 2.1.2, S. 12). Jürgen Junker, unter dessen Federführung diese Richtlinie entstand, berichtet: "Die VDI 3581 wurde vom Ausschuss B3 nie kritisiert, sondern die VDI 3649 wurde als Ergänzung zur VDI 3581 erstellt, damit in der Praxis anzutreffende Einflussfaktoren, Rahmenbedingungen und Gestaltungsmerkmale in der Betrachtung berücksichtigt werden können.

So ist z. B. ein Puffer ein oft verwendetes Element, um kritische Teile (z. B. eine komplexe Automatikstation) in einer großen Anlage von den übrigen Bereichen zu entkoppeln und damit die Gesamtverfügbarkeit zu erhöhen. Dies spielt z. B. in der Fahrzeugmontage bei Automobilfirmen eine Rolle. Ebenso gehen die Rahmenbedingungen unmittelbar in die Verfügbarkeit ein. Für den Nachweis einer vereinbarten Anlagenverfügbarkeit ist die Reparaturzeit (Teil der Stillstandszeit) von größter Bedeutung. Diese kann bei wenigen gering qualifizierten Instandhaltern sehr groß sein, bei vielen hochqualifizierten sehr niedrig sein. Diese Festlegungen sind zu treffen"[Mai10c, S. 72]. Aufgrund dieser Motivation wurden in der Richtlinie unter anderem Berechnungsgleichungen vorgestellt, mit

deren Hilfe Teilredundanzen und Puffer berücksichtigt werden können. Die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren ist in dieser Richtlinie nicht vorgesehen.

**Tabelle 3.1** Gegenüberstellung der wichtigsten Formelzeichen

Bedeutung in	Gudehus	VDI 3581 1983-2004	FEM 9.222	VDI 3649	VDI 3581 2004
Zuverlässigkeit	$\eta^{zu}$	$\eta^{zu}$	$\varphi$	-	-
Verfügbarkeit	$\eta^{ver}$	$\eta^{ver}$	$\eta$	$\eta$	$\eta$
Verf. von Element $i$	-	-	$\eta_i$	$\eta_i$	$\eta_i$
Gesamtverfügbarkeit	$\eta^{ver}$	$\eta^{ver}$	$\eta_{ges}$	$\eta_{ges}$	$\eta_S$
Nichtverfügbarkeit	$\eta^{nve}$	-	-	-	$\mu$
Gewichtung	$p_{ij}$	$g_k$	$k_i$	-	$k_i$
Einsatzzeit	$T^{ein}$	$T$	$T_E$	$T_E$	$T_E$
Ausfallzeit	$T^{aus}$	$ges.T_{aus}$	$T_A$	$T_A$	$T_A$

Gut 15 Jahre nach dem Erscheinen der ersten Verfügbarkeitsrichtlinie überarbeitete und aktualisierte der Fachbereich A1 - Logistik der VDI-Gesellschaft FML (Fördertechnik, Materialfluss, Logistik) unter Leitung von Herrn Prof. Dr. Walter Neuhaus, die VDI-Richtlinie VDI 3581. Im Jahr 2004 erschien dann unter neuem Namen und alter Nummer die VDI-Richtlinie VDI 3581: "Verfügbarkeit von Transport und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente", vgl. Kapitel 2.1.2, S. 12.

Prof. Neuhaus berichtet: „Eine Kernfrage für die Überarbeitung der VDI 3581 war das Verhältnis von Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit: Zwei Eigenschaften (1. Leistungsfähigkeit und 2. Zuverlässigkeit) einer Anlage sollten nicht verknüpft werden. Beide Attribute sind in der Regel Vertragsbestandteil und sollen während der Abnahme überprüft werden. Um Eigenschaften messen zu können, müssen Größen definiert werden: Durchsatz für die Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit für die Zuverlässigkeit der Anlage.“

Die Definition der Zuverlässigkeit wirft noch weitere Unklarheiten auf: „Im deutschen Sprachraum ist die Zuverlässigkeit qualitativ definiert. Um die Zuverlässigkeit unmittelbar zu quantifizieren benötigt man weitere Größen (wie Funktions- und Brauchbarkeitsdauer, MTBF, Ausfalldauer, MTTR, Verfügbarkeit, Nichtverfügbarkeit, Betriebszeit, Kalenderzeit usw.). In der angelsächsischen und französischen Literatur findet man eine quantitative Definition des Begriffs Zuverlässigkeit“ [Mai10c, S. 73]. Aus diesem Grunde wurde auf eine Definition der Zuverlässigkeit in der Neuauflage der Richtlinie vollständig verzichtet<sup>24</sup>.

Desweiteren wird die Verknüpfung der Systemelemente nun anschaulich mit Hilfe des Booleschen Modells beschrieben und es werden entsprechenden Berechnungsgleichungen vorgestellt, vgl. Kapitel 2.2.3, S. 17ff.

Bei der turnusgemäßen Überprüfung der Richtlinie VDI 3649 lag dabei der Entwurf der neuen VDI 3581 vor. Der Vergleich der beiden Richtlinien ergab, dass auch nach der Überarbeitung der VDI 3581 die ergänzende Richtlinie VDI 3649 weiterhin hilfreich und nötig ist. Das Gremium bestätigte im Jahr 2003 die Gültigkeit der VDI 3649. Allerdings wurde der Querverweis auf die VDI 3581 nicht aktualisiert, sodass diese sich weiterhin auf die veraltete Fassung bezieht und dem Leser damit der Eindruck vermittelt werden könnte, mit der Überarbeitung der VDI 3581 wäre die VDI 3649 nicht mehr relevant.

<sup>24</sup>Auf die Problematik der Mehrdeutigkeit der Zuverlässigkeit wird in Kapitel 6.3.1, S. 78 ausführlich eingegangen.

**Tabelle 3.2** Verschiedene Situationen - gleiche Verfügbarkeit

	I	II	III	IV
Verfügbarkeit $\eta$	98 %	98 %	98 %	98 %
Betriebszeit $T_E$	8760 h	8760 h	8760 h	8760 h
Ausfallzeit $T_A$	175,2 h	175,2 h	175,2 h	175,2 h
Anzahl Ausfälle	2862	1073	86	21
MTBF	3 h	8 h	100 h	400 h
MTTR	3,6 min	9,6 min	2 h	8 h

Das bestehende Regelwerk hat demnach eine lange Geschichte hinter sich, die noch immer nicht abgeschlossen ist, wie in Kapitel 7.2.3, S. 92, dargestellt wird.

### 3.2 Verfügbarkeit versus Ausfallverhalten

Ein in der Literatur (z. B. [VB01, S. 25], [Sal90, S. 100f], [DC79, S. 9f], [Mai08a, S. 48]) häufig genanntes Problem des Verfügbarkeitskennwertes ist seine Mehrdeutigkeit in Bezug auf die Ausfallcharakteristik der betrachteten Anlage. Eine Anlage mit seltenen, aber langdauernden Ausfällen kann zum gleichen Verfügbarkeitswert kommen, wie eine, die sehr häufig stehenbleibt, aber dafür nach kurzen Unterbrechungen wieder genutzt werden kann. In Tabelle 3.2 sind vier Szenarios mit unterschiedlichem Ausfallverhalten dargestellt. Dabei steigt von Szenario I bis IV die Ausfalldauer bei sinkender Ausfallhäufigkeit. Alle haben die gleiche Verfügbarkeit von 98 % bei gleicher betrachteter Betriebsdauer von 8760 h (entspricht einem Jahr im Dauerbetrieb). Auch die aufsummierte Ausfalldauer ist identisch. Erst die Angabe der Ausfallhäufigkeit oder der mittleren Funktionsdauer (MTBF) bzw. der mittleren Ausfalldauer (MTTR) geben Auskunft über das Ausfallverhalten. Dies ist allerdings eine wichtige Auskunft für die sinnvolle Planung der Instandhaltungsmaßnahmen. Viele leicht zu behebbende Kleinstörungen wie in Szenario I sind lästig, aber zu ertragen, wenn das zur Behebung nötige Personal sowieso vorhanden ist (z. B. das Bedienungspersonal). Notstrategien lohnen kaum, weil die „Umschaltzeit“ länger dauern kann, als die Störung selbst. Seltene, große Störungen wie in Szenario IV dagegen erlauben auch Betrieb ohne Bedienungsmannschaft. Der Anteil der Wartezeit auf Instandhaltungspersonal im Verhältnis zur Ausfallzeit ist von untergeordneter Bedeutung. Dagegen sind Notstrategien absolut notwendig, wenn der Rest des Betriebs während einer derart langen Störung weiterlaufen soll.

Diese berechtigte Kritik am Verfügbarkeitskennwert ist aber eher akademischer Natur, in der Realität kann es dennoch zu langen Havarien kommen, auch wenn üblicherweise nur kurze Ausfälle auftreten, so dass Notfallstrategien auch in diesem Falle sinnvoll sind.

Problematischer als die Berechnung der Verfügbarkeit der Einzelelemente ist deren Verknüpfung zur Gesamtverfügbarkeit. Die beiden Methoden des Regelwerks - nach Boole und mit Gewichtungsfaktoren - werden im Anschluss diskutiert.

### 3.3 Kritik an der Verknüpfung nach Boole

#### 3.3.1 Vermaschte Systeme

Insbesondere in VDI 3581 wird ausführlich auf die Verknüpfung der Systemelemente nach Boole eingegangen. Es werden Berechnungsgleichungen für serielle, parallele und daraus zusammengesetzte Systeme angegeben, vgl. Kapitel 2.2.3, S. 17. Wie schon Neuhaus [Neu78, S. 25] beschrieb, lassen sich in der Praxis diese Systemelemente aber nicht immer durch Kombinationen von Serien- und Parallelstrukturen darstellen, da es zusätzliche Querverbindungen gibt. Solche Systeme werden als vermaschte Systeme bezeichnet [VDI98c, S. 6]. In Abbildung 3.3 wird das einfachste vermaschte System dargestellt. Dieses System ist dann funktionsfähig, wenn entweder die Elemente  $E_1$  und  $E_3$ , oder  $E_1$  und  $E_4$ , oder  $E_2$  und  $E_4$  verfügbar sind (vgl. Gleichung (3.2)).

$$\eta_S = 1 - (1 - \eta_{E_1} \cdot \eta_{E_3})(1 - \eta_{E_1} \cdot \eta_{E_4})(1 - \eta_{E_2} \cdot \eta_{E_4}) \quad (3.2)$$

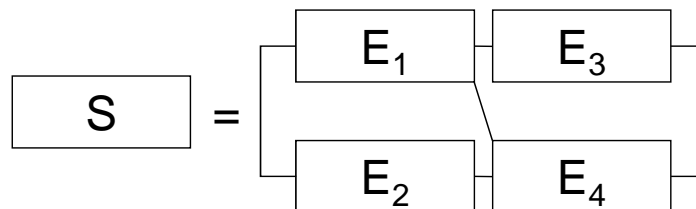


Abbildung 3.3 Vermaschtes System, Darstellung im Blockdiagramm [VDI98c, S. 6]

Tabelle 3.3 greift die Übersicht der Verknüpfungen „seriell“, „parallel“ und „komplex“ der Tabelle 2.1, S. 19, aus Kapitel 2.2.3 auf, ergänzt durch die eben dargestellte vermaschte Verknüpfung.

Tabelle 3.3 Ergänzte Übersicht über die Rechenergebnisse bei angenommenen Elementverfügbarkeiten

Element	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
Elementverfügbarkeit	99 %	98 %	97 %	96 %
System	seriell	parallel	komplex	vermascht
Abbildung	2.3	2.4	2.5	3.3
Gleichung	(2.4)	(2.5, 2.6)	(2.7)	(3.2)
Gesamtverfügbarkeit	94,1094 %	99,9994 %	96,9806 %	99,9883 %

Obwohl auch vermaschte System mit dem Booleschen System darstellbar und berechenbar sind, werden sie in VDI 3581 nicht erwähnt.

Die FEM-Regel 9.222 weist daraufhin, dass die Berechnung von vermaschten Systemen sehr schwierig ist, vor allem, wenn auch Puffer dazukommen, da dann die Auswirkungen von Störungen auf andere Bereiche mit beobachtet werden müssen (vgl. [FEM89, S. 11]):

„Eine empirische Ermittlung der Verfügbarkeit von bestehenden Anlagen, die aus vermaschten Netzen bestehen, ist sehr schwierig, da die Auswirkungen von Störungen auf

andere Bereiche und damit auch auf die Füllungsgrade der Puffer mit beobachtet werden müssen. Ein analytisches Verfahren zur Ermittlung der Verfügbarkeit von geplanten Anlagen, die aus vermaschten Netzen mit Puffern bestehen, ist nicht bekannt. Eine Ermittlung der Verfügbarkeit solcher Anlagen ist durch Simulation möglich, wenn realistische Schätzwerte über die Verfügbarkeit der einzelnen Elemente vorliegen.“ [FEM89, S. 11]

Allerdings ist es nicht die Aufgabe der VDI 3581 eine geschlossene Darstellung der Booleschen Theorie vorzunehmen, da dies bereits durch die VDI 4008 Blatt 2 [VDI98c] geschehen ist. Vielmehr ist es ihr Zweck, die Anwendung für intralogistische Systeme anschaulich zu erläutern. Außerdem wird bereits an Gleichung (3.2) für das relativ einfache System von Abbildung 3.3 deutlich, dass für komplexe Anlagen mit vielen Elementen die Verknüpfung nach Boole in der Anwendung zu aufwendig ist. Desweiteren war zum Zeitpunkt der Richtlinienerstellung die Verknüpfung mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren bei komplexeren Anlagen bereits etabliert.

### 3.3.2 Redundante Systeme

#### Berechnung der Teilredundanz mit $p_{Tech}$

In VDI 3649 wird Gleichung (2.11) zur Berechnung zweier paralleler Elemente vorgestellt, von denen im Störfall eines Elementes das jeweils andere einen gewissen Anteil übernehmen kann. Hergeleitet wird diese Gleichung nach der „allgemeinen Wahrscheinlichkeitsrechnung“ [VDI92b, s. 7] aus Gleichung (3.3):

$$\begin{aligned} \text{Gesamtverfügbarkeit} &= 1 \\ &- \text{Ausfallwahrscheinlichkeit Element 1} && \text{(A)} \\ &- \text{Ausfallwahrscheinlichkeit Element 2} && \text{(B)} \\ &+ \text{Ausfallwahrscheinlichkeit Element 1 und 2} && \text{(C)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Mit Ausfallwahrscheinlichkeit wird hier die Nichtverfügbarkeit bezeichnet, vgl. Gleichung (2.3).

Aus Gleichung (2.11)<sup>25</sup> und (3.3-A) ergibt sich demnach

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit Element 1} = (1 - \eta_1)(1 - p_{Tech2}) \quad (3.4)$$

Damit wird die Nichtverfügbarkeit des Elements 1 nur auf den Materialflussanteil bezogen, der nicht vom Element 2 übernommen werden kann. Für das Element 2 gilt die analoge Annahme.

Die Wahrscheinlichkeit, dass beide Elemente gleichzeitig nicht verfügbar sind, ergibt sich aus Gleichung (2.11) und (3.3-C) nach Gleichung (3.5):

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit Element 1 und 2} = (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(1 - p_{Tech1} - p_{Tech2}) \quad (3.5)$$

Hier allerdings hat sich ein Denkfehler eingeschlichen, denn im gleichzeitigen Störfall von Element 1 und 2 kommen die Kennwerte  $p_{Tech}$  nicht mehr zum Tragen, da der

---

<sup>25</sup>In Kapitel 2.2.4 sind die parallelen Elemente Teil eines größeren Systems. Da hier der Fokus auf diese beiden Elemente gelegt wird, werden sie zur besseren Lesbarkeit nur noch mit dem Index 1 und 2 statt 4.1 und 4.2 bezeichnet.

Materialfluss zum Stehen gekommen ist. Abgesehen davon könnte dieser Term Werte  $< 0$  annehmen, wenn  $p_{Tech1} + p_{Tech2} > 1$  werden, was die Aussage ad absurdum führt.

Der Kennwert  $p_{Tech}$ , der keinen eigenen Namen erhalten hat, entspricht im Wesentlichen dem Gewichtungsfaktor nach Materialfluss (vgl. S. 19), mit dem Unterschied, dass er auf die bereits berechnete Verfügbarkeit des Elements angewendet wird anstatt auf seine Ausfallzeit. Da die Wirkung der Redundanz allerdings nur bei Ausfällen zum Tragen kommt und nicht allgemein, wird ihr eine zu große Wirkung zugeschrieben.

Darüber hinaus ist die Berechnung der Verfügbarkeit von teilredundanten Systemen bereits bei zwei Elementen sehr lang, bei weiteren Elementen verkompliziert sich die Berechnung weiter. Das mag mit ein Grund dafür sein, dass diese Gleichung bei den Untersuchungsergebnissen über die Praxiserfahrungen keine nennenswerte Rolle spielt, vgl. dazu Kapitel 4.

### Unterscheidung von Redundanzarten

Sowohl die Gleichung (2.5) aus VDI 3581 (alte und neue Fassung) und FEM 9.222 als auch Gleichung (3.3) lassen sich auf die Gleichung (3.6) zurückführen.

$$V = V_1 + V_2 - V_1V_2 \quad (3.6)$$

Wie aber bereits 1993 Wilfried Franke [Fra93] dargestellt hat, gilt diese Gleichung keineswegs für alle Arten von Redundanz, vgl. Tabelle 3.4, sondern nur für heiße Redundanz.

**Tabelle 3.4** Definition der Redundanzarten nach [DIN90, S. 9]

	Redundanz		
	heiß	warm	kalt
Synonym verwendete Begriffe	belastet aktiv funktionsbeteiligt	erleichtert	unbelastet passiv nicht funktionsbeteiligt Standby
Funktionsbeteiligung der Reserveelemente	voll	geringer als Arbeitselemente	erst bei Ausfall Arbeitselemente
Ausfallverhalten der Reserveelemente	gleich den Arbeitselementen	geringere Wahrscheinlichkeit	keine Ausfälle im Wartezustand

Voraussetzung für eine heiße Redundanz ist das Anliegen des vollständigen Durchsatzes, dafür wird der geforderte Durchsatz gemäß der Anzahl der parallelen Stränge vervielfältigt, wie beispielsweise bei parallel geschalteten Messgeräten, die dasselbe Signal messen (evtl. nach einem unterschiedlichem Messprinzip). Auf diese Weise kann bei dem Ausfall eines Elements sichergestellt werden, dass die geforderte Funktion (im Beispiel: Messung des jeweiligen Messwerts) sicher erfüllt werden kann. Übertragen auf eine Intralogistikanlage wird schnell klar, dass der Einbau von heißen Redundanzen nicht durchführbar ist, da keiner den mehrfachen Materialflussdurchsatz bereit stellen kann.

Denkbar sind kalte und warme Redundanzen. Eine kalte Redundanz ist ein paralleles Element, das erst eingeschaltet wird, wenn das Hauptelement ausgefallen ist, beispielsweise eine Ersatzmaschine im Produktionsprozess oder Reservefahrzeuge bei fahrerlosen

Transportsystemen. Wird für kalte Redundanzen die Gleichung aus den Richtlinien angewandt, so fällt das Ergebnis nach Frankes Berechnungen [Fra93, S. 302] stets zu positiv aus. Allerdings sei dieser Fehler zu vernachlässigen, wenn das Verhältnis von mittlerer Ausfallzeit zur Betriebszeit sehr klein ist.

Der häufigste realisierte Redundanzfall ist die warme Redundanz: parallele Elemente werden im Normalfall mit einem Teil des Gesamtdurchsatzes belastet und im Störfall eines Elements übernimmt das noch funktionierende den gesamten Materialfluss.<sup>26</sup> Franke zeigt auch hier, dass die Anwendung der Richtliniengleichung im Vergleich zu seinen Berechnungen zu fehlerhaften Ergebnissen kommt und rät zu einer Überarbeitung der Richtlinien. Seine qualitativen Aussagen zur mangelnden Berücksichtigung der Redundanzarten sind ein wichtiger Kritikpunkt an den Richtlinien. Seine eigenen Berechnungen der Verfügbarkeit haben allerdings das Manko, dass das zugrunde liegende Markov-Modell nicht geeignet ist für die Verfügbarkeitsberechnung von Intralogistikanlagen, wie in Kapitel 6.3.4 noch gezeigt wird.

## 3.4 Kritik an der Verknüpfung mit Gewichtungsfaktoren

Die Verknüpfung mit Gewichtungsfaktoren scheint besser, da sie einfacher und unabhängig von der Art der Redundanz und der Vermaschung anwendbar ist. Aber auch diese Methode hat einige Schwachstellen.

### 3.4.1 Subjektive Festlegung der Gewichtungsfaktoren

Bei der Verknüpfung der Elementverfügbarkeiten mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren, wird der gewichtete Mittelwert der Ausfallsumme der einzelnen Anlagenelemente gebildet und mit der betrachteten Einschaltzeit in Beziehung gesetzt. Die Gewichtung erfolgt über die Gewichtungsfaktoren, die nach Redundanz, nach Materialfluss oder nach Funktion gebildet werden können, vgl. Kapitel 2.2.3, S. 18. Sind die Gewichtungsfaktoren festgelegt, kann auf diese Weise schnell ein Verfügbarkeitskennwert der gesamten Anlage berechnet werden, ohne komplizierte Berechnungen anstellen zu müssen. Die verschiedenen Möglichkeiten, den Gewichtungsfaktor zu bilden, bergen allerdings einen großen subjektiven Einfluss, da die Beteiligten je nach subjektiver Beurteilung zu unterschiedlichen Möglichkeiten tendieren, vgl. [VB01, S. 112]. Sollen beispielsweise die Regalbediengeräte eines dreigassigen Lagers gewichtet werden, ergeben sich nach den drei genannten Möglichkeiten (vgl. Kapitel 2.2.3, S. 18) eine Reihe unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren:

1. Gewichtung nach Redundanz<sup>27</sup>: Alle drei Regalbediengeräte werden mit dem gleichen Gewichtungsfaktor  $k_i = k_1 = k_2 = k_3 = 1/3$  belegt.
2. Gewichtung nach Materialfluss: Aufgrund der geplanten Artikelverteilung im Lager wird erwartet, dass über das erste Regalbediengerät ca. 40 % der Ein- und Auslager-

---

<sup>26</sup>Im Beispiel von Franke kann ein Element den gesamten Materialfluss übernehmen, in der praktischen Anwendung wird eine teilweise Übernahme häufiger sein, dann sinkt im Störfall auf jeden Fall die Anlagenleistung.

<sup>27</sup>Vor dem Hintergrund der Erläuterungen zum Begriff Redundanz in Abschnitt 3.3.2 sei hier mit Redundanz das Vorhandensein mehrerer paralleler Funktionsstränge gemeint, die Unterscheidung nach kalt, warm, etc. wird für die anstehende Überlegung vernachlässigt.



vorgänge abgewickelt werden, die anderen beiden Geräte teilen sich den Rest. Für die Gewichtungsfaktoren ergibt sich daraus:  $k_1 = 0,4$ ,  $k_2 = k_3 = 0,3$ .

3. Gewichtung nach Funktion: Eingelagert werden kann in jeder freien Gasse, bei der Auslagerung kann im Störfall aber nicht auf einen ähnlichen Artikel einer anderen Gasse zurückgegriffen werden. Für die Einlagerung gilt der Gewichtungsfaktor  $k_{Ein,1} = k_{Ein,2} = k_{Ein,3} = 1/3$ , für die Auslagerung  $k_{Aus,1} = k_{Aus,2} = k_{Aus,3} = 1$ . Da das Verhältnis von Ein- zu Auslagerungen bei 1:1 liegt gelten als Gesamtgewichtungsfaktoren  $k_1 = k_2 = k_3 = 2/3$ <sup>28</sup>.

Je nach dem welche Möglichkeit zur Berechnung gewählt wird, ergibt sich ein anderer Wert für die Gesamtverfügbarkeit  $\eta$ , vgl. Tabelle 3.5, bezogen auf eine Einschaltzeit von 8 Stunden.

**Tabelle 3.5** Verfügbarkeit abhängig von der Methode zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren

Regalbediengerät	1	2	3	
Ausfallzeit $T_A$ [min]	22	12	16	Gesamtverfügbarkeit $\eta$
Gewichtungsfaktor nach	$k_1$	$k_2$	$k_3$	
- Methode 1 (Redundanz)	0,33	0,33	0,33	96,5 %
- Methode 2 (Materialfluss)	0,4	0,3	0,3	96,4 %
- Methode 3 (Funktion)	0,67	0,67	0,67	93,1 %

Daneben hat jede Methode für sich genommen ihre eigenen spezifischen Besonderheiten:

Methode 1 (Redundanz) hat den Vorteil, dass die Gewichtungsfaktoren einfach und eindeutig zugeordnet werden können. Die häufig vorkommenden warmen Redundanzen allerdings werden nicht adäquat berücksichtigt.

Bei Methode 2 (Materialfluss) können insbesondere Förderstrecken in vernetzten Anlagen einfach gewichtet werden. Die Materialflussbelastung einer Anlage ist allerdings häufig nicht konstant, damit schwankt auch der Materialflussanteil der einzelnen Elemente. Für eine exakte Gewichtung müsste der Faktor dann ständig angepasst werden, was in der Praxis aber nicht durchführbar ist.

Mit Methode 3 (Funktion) können die tatsächlichen Betriebsabläufe in der Anlage besser berücksichtigt werden. Allerdings ist es deutlich schwieriger als bei den anderen beiden Methoden, abzugrenzen, welche Faktoren, wie beispielsweise Lagerstrategien, etc. für die Gewichtung berücksichtigt werden, und welche nicht. Außerdem wird die Berechnung umso aufwendiger, je exakter die Funktion wiedergegeben werden soll.

Während Lieferanten zur Methode 1 tendieren, da sich diese am stärksten an der gelieferten Anlage orientiert, sehen Betreiber in Methode 3 ihre Betriebsorganisation am besten dargestellt. Die Abweichung der verschiedenen Ergebnisse je nach Methode kann beträchtlich sein, vgl. Tabelle 3.5. Die Auswirkung dieser Abweichung kommt vor allem dann zum Tragen, wenn vertraglich eine Verfügbarkeit zwischen den beiden Werten aus Methode 1 und 3, z. B. 95 % vereinbart wurden, wie bei einem Fall des Sachverständigen Albrecht Franck: „In einer Großanlage war als Basis des Verfügbarkeitsnachweises die VDI-Richtlinie 3581 „Zuverlässigkeit von Transport- und Lageranlagen“ vereinbart worden. Die

<sup>28</sup>Je nach konkreter Betriebssituation können die Gewichtungsfaktoren beliebig komplex werden.

Prüfung wurde einvernehmlich durchgeführt. Aus den Ergebnissen errechnete der „Unternehmer“ (d. h. der Lieferant, Anm. der Verfasserin) eine Verfügbarkeitsrate von 98,5 %, der Anlagenbetreiber dagegen von 87,7 % - beide Parteien ermittelten ihre Ergebnisse nach den Rechenverfahren der VDI 3581. Die besondere Brisanz lag in der Pönale: Pro 1 % Verfügbarkeitsdefizit, bezogen auf 95 %, war der Betreiber/Auftraggeber berechtigt, 1 % von der Auftragssumme abziehen. Konkret waren ca. 10 Mio. DM strittig.“[Fra00, S. 39]

Es wird demnach dringend empfohlen, bei Vereinbarung der Zielverfügbarkeit auch die geltenden Gewichtungsfaktoren festzulegen, wenn die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit mit diesen berechnet werden soll.

### 3.4.2 Geringe Aussage der Gesamtverfügbarkeit

Ist dieses Problem gelöst, ergibt sich zudem das Problem der geringen Aussagekraft des Gesamtverfügbarkeitswertes. Zur Veranschaulichung wird das Beispiel des dreigassigen Lagers mit einer Vorzone erweitert. Über die Fördertechnik und mit Hilfe eines Querverschiebewagens werden zwei Arbeitsplätze bedient, vgl. Abbildung 3.4. Das Beispiel ist der VDI 3581 entnommen.

Der gleiche Verfügbarkeitswert kann eine Vielzahl von Lagerzuständen beschreiben, wie in Tabelle 3.6 dargestellt. Während in Fall A mit dem Verschiebewagen nur ein wichtiges Element relativ lang ausfällt, sind in Fall B mehrere Elemente ähnlich lange betroffen. Da diese aber einen niedrigeren Gewichtungsfaktor haben, ergibt sich der selbe Gesamtverfügbarkeitswert von 95 %. In Fall C sind die Ausfallzeiten mit jeweils 4 Minuten relativ kurz, dafür sind alle Anlagenelemente betroffen. Auch in diesem Fall berechnet sich eine Gesamtverfügbarkeit von 95 %.

**Tabelle 3.6** Denkbare Anlagenzustände bei gleichem Verfügbarkeitswert, Basis: 8 h Einschaltzeit

Element	$k_i$	Ausfallzeit [min]		
		Fall A	Fall B	Fall C
1 Einlagerstich	0,50	-	-	4
2 Auslagerstich	0,50	-	-	4
3 Arbeitsplatz 1	0,50	-	20	4
4 Arbeitsplatz 2	0,50	-	-	4
5 Verschiebewagen	1,00	24	-	4
6 Fördertechnik 1	0,17	-	-	4
7 Fördertechnik 2	0,17	-	12	4
8 Fördertechnik 3	0,17	-	-	4
9 Fördertechnik 4	0,17	-	-	4
10 Fördertechnik 5	0,17	-	14	4
11 Fördertechnik 6	0,17	-	-	4
12 Regalbediengerät 1	0,33	-	-	4
13 Regalbediengerät 2	0,33	-	30	4
14 Regalbediengerät 3	0,33	-	-	4
15 Materialflussrechner	1,00	-	-	4
Gesamtverfügbarkeit		95 %	95 %	95 %

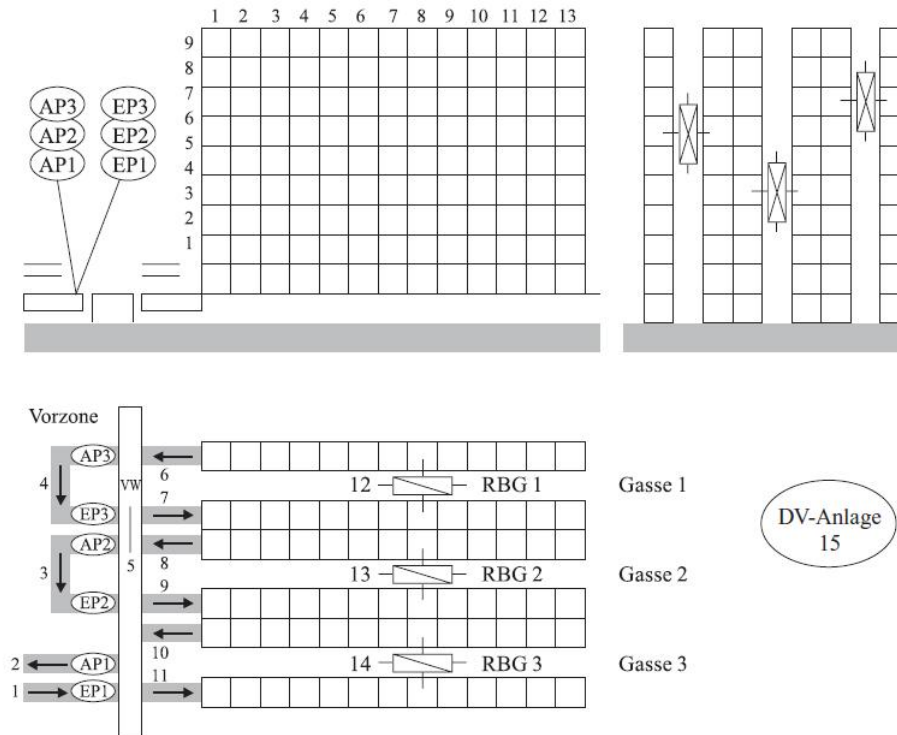


Abbildung 3.4 Layout des Beispiellagers, [VDI04a, S. 7]

Die Konsequenzen für den Betrieb der Anlage werden sich in den drei Fällen allerdings deutlich voneinander unterscheiden. Während die vielen kurzen Ausfälle von Fall B wahrscheinlich zu einem Großteil durch gesteigerte Leistung oder Puffer kompensiert werden können, wird der längere Zeit stillstehende Verfahrwagen den Betriebsablauf erheblich deutlicher beeinträchtigen. Es werden sich während des Ausfalls mehrere Warteschlangen aufbauen, die nach der Wiederinbetriebnahme erst nach und nach abgebaut werden können, was den Betriebsablauf zusätzlich stört.

Um den tatsächlichen Zustand der Anlage beurteilen zu können, muss daher neben der Gesamtverfügbarkeit auch bekannt sein, welche Elemente wie lange gestört waren. Sind diese Werte allerdings bekannt, ergibt sich aus der Gesamtverfügbarkeit kein wesentlicher Erkenntnisgewinn mehr.

### 3.5 Reihenfolge von Verfügbarkeitstest und Abnahmeerklärung

Ein Problem, ganz unabhängig von der Berechnung der Anlagenverfügbarkeit, ist die zeitliche Einordnung des Verfügbarkeitstests in den Abnahmeverlauf. Wie bereits in Kapitel 2.2.1, S. 14, erwähnt, gibt es in den Richtlinien dazu widersprüchliche Angaben. Nach den Richtlinien ist der Verfügbarkeitstest auch nach der Erklärung der Abnahme, im laufenden Betrieb, möglich. Allerdings hat jede gewählte Reihenfolge ihre spezifischen Nachteile, wie in Abbildung 3.5 gezeigt wird.

Gerade der Zeitabschnitt zwischen Nutzungsbeginn durch den Betreiber und Abnahmeerklärung ist wegen der ungeklärten Eigentumsfrage kritisch. In der VDI 3977 heißt es



Abbildung 3.5 Jeweilige Nachteile der verschiedenen Abnahmereihenfolgen

dazu: „Nach Abnahme des Lagersystems erfolgt der Gefahrenübergang an den AG [Anm.: Auftraggeber] und die Gewährleistung beginnt. Sollte eine Nutzung vor der Abnahme des Lagersystems durch den AG gewünscht werden, sind hinsichtlich des Gefahrenübergangs und der Gewährleistung besondere Vereinbarungen zu treffen“ [VDI93, S. 4].

Mit diesem kurzen und wenig hilfreichen Hinweis werden Lieferanten und Betreiber in einer sehr sensiblen Projektphase alleine gelassen.

Ein weiteres Problem ist, dass der Verfügbarkeitstest bei Soll-Leistung der Anlage durchgeführt werden soll, [VDI93, S. 3] die Anlage aber üblicherweise für mehrere Jahre Laufzeit mit erwarteter Leistungssteigerung geplant wird, so dass beim Verfügbarkeitstest die Soll-Leistung gar nicht dargestellt werden kann, was die Anforderung „bei Soll-Leistung“ unsinnig werden lässt [Fra00, S. 37]. Gegen die Vereinbarung niedrigerer Leistungswerte bei dem Verfügbarkeitstest steht allerdings das Sicherheitsbedürfnis der Anlagenbetreiber, die nachgewiesen bekommen wollen, dass die neue Anlage angemessen leistungsfähig und verfügbar ist.

### 3.6 Zusammenfassung Kapitel 3

Bei der Entwicklung des Kennwertes „Verfügbarkeit“ lag das Augenmerk auf den Funktionen, die die Anlage erfüllen sollte. Dabei ergibt sich die Funktion aus der entsprechenden Verknüpfung der Anlagenelemente. Die mathematischen Modelle konzentrieren sich dementsprechend darauf, die Verfügbarkeit der Einzelelemente zu berechnen und diese zur Gesamtverfügbarkeit zu verknüpfen. Zwei Ziele stehen sich dabei im Wege: Einerseits der Wunsch nach einem einfachen Modell, wie es mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren in FEM 9.222 und VDI 3581 realisiert wurde, und andererseits die adäquate Berücksichtigung von Puffern und Teilredundanzen, wie es die VDI 3649 beschreibt. Bisher ist es nicht gelungen, eindeutige und einfache Rechnungsgrundlagen bereitzustellen, die auch

Teilredundanzen und Puffer adäquat berücksichtigen.

Außerdem fehlen im Regelwerk Hinweise auf eine sinnvolle Abfolge von Betriebsbeginn, Abnahmeerklärung, Gewährleistungsbeginn und Verfügbarkeitstest und die Antwort auf die Frage, wer in diesem Übergangszeitraum wofür die Verantwortung und die Kosten trägt.

Alternative Berechnungsmethoden der Anlagenverfügbarkeit werden demnach an folgenden Kriterien gemessen:

1. Werden komplexe Anlagenlayouts mit Vermaschungen, Puffern und Teilredundanzen adäquat berücksichtigt?
2. Wird der praktische Ablauf des Verfügbarkeitstest mit der rechtlichen Erklärung der Abnahme sinnvoll und eindeutig miteinander abgestimmt?

---

## 4 Erfahrungen in der Praxis

Die Analyse der Richtlinieninhalte im vorherigen Kapitel hat einige Schwachstellen des Regelwerks aufgezeigt. Allerdings sind die Richtlinien nur Empfehlungen und haben keinesfalls bindenden Charakter. Sind sich die beteiligten Parteien einig, können sie in ihrem Vertrag zur Verfügbarkeitsabnahme im Wesentlichen vereinbaren, was sie möchten. Im folgenden Kapitel wird daher aufgezeigt, welche Rolle das Regelwerk in der Praxis spielt und welche Schwierigkeiten und Wünsche Anlagenbetreiber und Lieferanten in Bezug auf die AbnahmeprozEDUREN sehen.

### 4.1 Allgemeine Erfahrungen

Für dieses Kapitel wurden intensive Gespräche mit Anwendern, Lieferanten und Planern geführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Sichtweise von Planern in einigen Bereichen der Sichtweise von Anwendern ähnelt. So ist es ihnen für eine langfristige Kundenzufriedenheit wichtig, dass die Anlage als Ganzes schnell stabil läuft. In anderen Bereichen gleichen die Sichtweisen der Planer aber der Sichtweise der Lieferanten: So muss das Projekt zeitnah einen Abschluss finden, um die eigenen Kosten zu decken. Eigene Aspekte der Planer in Bezug auf die Verfügbarkeitsmessung wurden nicht gefunden, daher beschränkt wird sich im Folgenden die Analyse auf die Anwender und Lieferanten.

Die Gesprächspartner waren grundsätzlich schnell bereit, über das Thema zu sprechen und meist wurde deutlich dass die Thematik des Verfügbarkeitstests in der Praxis eine große Rolle spielt. Konkret veröffentlichbare Aussagen und Daten waren allerdings deutlich schwerer zu bekommen. Zum einen liegt es daran, dass das Tagesgeschäft sowohl von Anwendern als auch von Lieferanten nur selten Kapazitäten übrig ließ, um die Daten zu sichten, zusammenzustellen und der Autorin zur weiteren Auswertung zu übergeben. Zum anderen spielte es eine erhebliche Rolle, dass die Verfügbarkeitswerte wesentlicher Teil der Vertragserfüllung sind. Damit verbunden sind starke Bedenken vor Imageverlust oder gar juristischen Auseinandersetzungen, wenn der eigene Unmut über den Ablauf der Testprozeduren publik würde. Das äußerte sich in einem latenten Misstrauen gegen den Vertragspartner, was in spontanen Aussagen deutlich wird.

So kommentierte ein Teilnehmer den Vortrag über AbnahmeprozEDUREN [Mai08b] mit den Worten, die Anwender seien doch gar nicht interessiert an einem bestandenen Verfügbarkeits-test, sie wollten schließlich noch ein paar Prozente rausholen. Auch Herr Prof. Furmans erwähnte in einem Nebensatz seines Vortrags auf dem Materialflusskongress 2009 [HFSB09] seine dahingehende Beobachtung, dass Lieferanten hohe Verfügbarkeitsforderungen als Drangsalierung empfinden, und eine Methode, um zu ihren Lasten zusätzliche Preisnachlässe (durch Pönalen) zu bewirken.

Betreiber kontern darauf hin, dass sie schließlich 100 % der Auftragssumme für eine bestimmte Leistung zu zahlen haben, die in der Regel leicht unter 100 % liegt. Nachdem sie den Herstellern hier bereits ein Stück entgegen kommen, halten sie es für nachvollziehbar,

dass sie nicht auch noch bei der Verfügbarkeit entgegenkommen wollen [Tra08]. Auch kommt es vor, dass Betreiber das Gefühl haben, über den Tisch gezogen zu werden: „Wir hatten den Eindruck, daß die Hersteller darauf warteten, daß ihnen im Verlauf der Inbetriebnahme die Schwierigkeiten, die auftraten, erst nachgewiesen werden mußten, und sie vielleicht darauf gehofft hatten, daß die Schwachstelle so durchgeht, denn die Schwachstellenbehebung kostet Geld.“ [Arm81, S. 70]

Die nachfolgenden Erkenntnisse basieren im Wesentlichen auf den ausführlichen Informationen von drei Kooperationspartnern aus der Praxis und werden ergänzt durch veröffentlichte Berichte aus Literatur und aktuellen Medien. Die Kooperationspartner waren

1. LSG Sky Chefs, Frankfurt. Informationen zur Planung, Inbetriebnahme und Anlagenanlauf der Elektrohängebahn in der Cateringanlage FRA ZD, Frankfurt am Main [LSG09]
2. Transpharm Logistik GmbH, Ulm. Informationen zur Inbetriebnahme und Dauerfügbarkeit des Logistikzentrums in Ulm [Tra08]
3. Ein renommierter, international agierender Lieferant für Intralogistikanlagen. Informationen zur üblichen Vertragsgestaltung und Durchführung von Verfügbarkeits-tests [Ano08]

## 4.2 Erfahrungen von Anwendern

Plant ein Betreiber erstmals eine komplexe intralogistische Anlage, so ist für ihn die Inbetriebnahme viel mehr als nur der Arbeitsbeginn mit einer neuen Maschine, es ist vielmehr sehr häufig ein wichtiger Meilenstein in der Entwicklung des Unternehmens. Wurde bisher in gewachsenen Strukturen und Prozessen mit viel Improvisationstalent und vielen Helfern die Produktion in einem alten, verwinkelten, den Bedürfnissen nicht mehr genügendem Gebäude am Laufen gehalten, ist nun alles neu: Ein modernes Fabrikgebäude, üblicherweise viel geräumiger, heller und leichter sauber zu halten. Die Materialflüsse wurden in der Planungsphase lange, häufig mit Hilfe von externen Planern, analysiert, verschlankt, optimiert und graphisch dargestellt und nun mit der automatischen Anlage in Stahl gegossen. Ein Großteil der Arbeitsplätze wird nun mit Rechner-technik unterstützt, und die Arbeitsinhalte der einzelnen Mitarbeiter sind nun viel klarer definiert. Ein solcher Neubeginn hat außerdem häufig große Außenwirkung, vom öffentlichen Spatenstich mit Honoratioren aus dem nahen oder sogar fernen Umland bis hin zur Einplanung von regelmäßigen Betriebsführungen für interessierte Besucher. Es geht um viel: Um das Image des Unternehmens bei den eigenen Mitarbeitern und der Bevölkerung im Umland, das Ansehen bei den Geschäftspartnern und natürlich auch um viel Geld.

### 4.2.1 Die Verfügbarkeitsanforderung im Vertrag

Dementsprechend sind die Erwartungen und die Nervosität groß. Es wird daher versucht, bereits im Vorfeld an möglichst alle Eventualitäten zu denken und Probleme gar nicht erst entstehen zu lassen, und mit Hilfe der Abnahmetests eine möglichst hohe Sicherheit zu erreichen. Ein Maß für die Qualität der Anlage, vgl. S. 3, soll dabei die Verfügbarkeit sein, denn - so die zu Grunde liegende Annahme - nur wenn die Anlage verfügbar ist,

kann sie auch zufriedenstellend arbeiten. Die Forderungen an die Verfügbarkeit sind dementsprechend hoch:

„In über 80 % aller Ausschreibungen für logistische Systeme ist unter Verfügbarkeit ungefähr folgender Text zu lesen: Die Gesamtverfügbarkeit der Anlage ergibt sich als Produkt der Einzelverfügbarkeiten aller beteiligten Subsysteme und darf 98 % nicht unterschreiten. Die Verfügbarkeit ist vor der Abnahme der Anlage nachzuweisen“ [Sie90, S. 112].

Dies deckt sich mit den Informationen der Kooperationspartner: Für die Elektrohängebahn (EHB) wurde nach zwei Vortests mit einer Verfügbarkeitsforderung von 85 % bzw. 90 % für die Endabnahme 98 % für die Gesamtanlage und 99,5 % für Einzelelemente gefordert [LSG09]. Für das Logistikzentrum waren 98 % Gesamtverfügbarkeit und 99 % Einzelverfügbarkeiten gefordert [Tra08]. Die Kunden des Lieferanten fordern üblicherweise ebenfalls mindestens 98,5 % (vgl. Tabelle 4.4) [Ano08]. Die Richtlinien werden in den Verträgen als Grundlage erwähnt (z. B. „Die Berechnungen basieren auf den „Regeln über die Abnahme und Verfügbarkeit von Anlagen mit Regalbediengeräten und anderen Gewerken“ FEM 9.222“ [LSG09]), die Berechnungsgleichungen (2.1) für die Einzelverfügbarkeiten bzw. Gleichung (2.8) für die Gesamtanlage aber noch explizit mit aufgenommen. Die Gewichtungsfaktoren werden erst nach Vertragsabschluss im Rahmen der Feinplanung festgelegt. Üblicherweise wird in den Verträgen gefordert, die Verfügbarkeitsnachweise bei Soll-Leistung durchzuführen, bei der Elektrohängebahn wurde die für Vortests entsprechende der niedrigeren Verfügbarkeit auch eine niedrigere Leistungsforderung zu Grunde gelegt.

Deren konkrete Verteilung erfolgt meist auf Vorschlag des Lieferanten oder Anraten der Planer. Bei der Elektrohängebahn wurden die ortsfesten Segmente nach Materialfluss gewichtet, die beweglichen Fahrzeuge nach Redundanz ( $k_{\text{Fahrzeug}} = \frac{1}{150}$ ), vgl. S. 19. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Gewichtungsfaktoren. Darin wird beispielsweise gezeigt, dass Arbeitsplätze durchschnittlich am stärksten gewichtet werden, während Streckenabschnitte teilweise sehr gering und teilweise sehr stark gewichtet werden.

**Tabelle 4.1** Gewichtungsfaktoren der Elektrohängebahn

Segmentart	Durchschnitt $k_i$	Minimum $k_i$	Maximum $k_i$
Arbeitsplätze	0,055	0,013	0,164
Hubwerke	0,169	0,073	0,236
Streckenabschnitte	0,168	0,008	0,390
Fahrzeuge	0,007	0,007	0,007

Im Logistikzentrum wurden zunächst die Baugruppen gewichtet, die mit den verschiedenen Teilaufgaben betraut sind, und innerhalb der Baugruppen nochmals die Komponenten. Daraus resultieren die Gewichtungsfaktoren der Komponenten, die in Tabelle 4.2 zusammengefasst aufgelistet sind.

#### 4.2.2 Planung und Durchführung des Verfügbarkeitstest

Auch wenn es berechtigte Vorbehalte gegen zeitlich verteilte Abnahmeprozeduren gibt (vgl. Kapitel 3.5), werden sie häufig angewandt; so auch bei der Elektrohängebahn: Es wurden drei kombinierte Verfügbarkeits- und Leistungstests durchgeführt, dabei wurde



Tabelle 4.2 Gewichtungsfaktoren des Logistikzentrums

Baugruppe	Baugruppen- gewichtung	Komponenten- gewichtung	Resultierende Gewichtung der Komponenten
Auftragsstart	60 %	20 %	12 %
Verdichten	60 %	100 %	60 %
AKL-Geräte <sup>29</sup>	60 %	40 % - 100 %	24 % - 60 %
Sorter	70 %	12,5 % - 100 %	8,75 % - 70 %
Paletten packen	70 %	16,67 %	11,67 %
Mischkartons	40 %	100 %	40 %
Kommissionierung	40 %	25 % - 50 %	10 % - 20 %
Deckeln	20 %	100 %	20 %
Packen, Wiegen	30 %	10 % - 100 %	3 % - 30 %

sowohl der Durchsatz der Anlage als Maß für die Leistung, als auch die Ausfallzeiten als Maß für die Verfügbarkeit gemessen. Die ersten beiden Tests fanden vor der Inbetriebnahme statt, der letzte bei normalbetriebener Anlage zum Abschluss des Projekts, vgl. Abbildung 4.1.

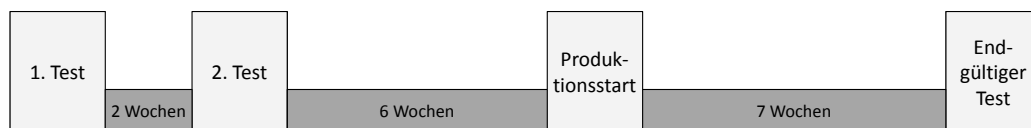


Abbildung 4.1 Zeitablauf der Verfügbarkeits-tests

Geplant waren für alle drei Tests drei aufeinanderfolgende Tage mit jeweils 7 Stunden Messzeitraum mit geschultem Personal des Betreibers und inklusive Transport von realistischen Beispieleinheiten. Die Verfügbarkeits- und Leistungsanforderungen waren zunächst 85 % der vertraglich vereinbarten Werte beim ersten, 90 % beim zweiten und schließlich 100 %. Das bedeutet für die Verfügbarkeit 83,3 %, 88,2 % und 98 % Verfügbarkeit.

Die tatsächliche Durchführung der beiden Vorabtests unterschied sich deutlich vom geplanten Ablauf: Es wurde jeweils nur an zwei Tagen getestet, davon wurde der erste Tag jeweils ohne Personal mit automatisch angestoßenen Fahraufträgen durchgeführt. Ursache dafür war, dass es von Seiten des Betreibers organisatorisch nicht möglich war, für die Testtage so viel Personal freizustellen, da parallel ja das Geschäft in der alten Anlage weiterlaufen musste. Auch war es nicht möglich, eine große Menge an Testmaterial zu bekommen, da dieses teuer ist, und die Bestände in den Anlagen grundsätzlich niedrig gehalten werden.

Die Verfügbarkeit war an beiden Testtagen größer als 90 % und damit größer als die jeweiligen Anforderungen. Nicht erreicht wurden die Leistungsanforderungen, worauf hin der zweite Test sogar nach 14 Tagen wiederholt wurde. Der Grund für die Minderleistung waren einerseits Ausfälle von Server und Anlagenelementen und andererseits Verzögerungen durch ungeschultes Personal und den gleichzeitig stattfindenden Test der Spülmaschinen, (anderes Gewerk). Vor allem das Problem von Software- und Serverproblemen tritt bei Tests häufiger auf, auch beim Leistungstest einer Erweiterungsstufe

<sup>29</sup>AKL: Automatisches Kleinteilelager

im Logistikzentrum traten mehrere Stunden Verzögerung ein. Da nicht abzusehen war, wie lange die Verzögerung dauern würde, war das gesamte Testpersonal zum untätigen Warten gezwungen, was nicht nur lästig sondern natürlich auch teuer ist [Tra08]. Der letzte Test fand ca. 7 Wochen nach Betriebsstart statt, es wurde im laufenden Betrieb gemessen (automatische Aufzeichnung, Anwesenheit von Vertretern von Betreiber, Planer und Lieferanten). Die Ergebnisse der gewichteten Anlagengesamtverfügbarkeit der Elektrohängebahn entsprechen den Anforderungen (vgl. Tabelle 4.3, dort auch die Ergebnisse des Logistikzentrums). Die Verfügbarkeit der Einzelelemente wurde nicht betrachtet.

**Tabelle 4.3** Ergebnisse der abschließenden Verfügbarkeits-tests

	Elektrohängebahn [LSG09]	Logistikzentrum [Tra08]
Anzahl Testtage	3	5
Stunden pro Tag	7	8
Durchschnittliche V.	99,84 %	99,35 %
Minimale V.	99,72 %	98,98 %
Maximale V.	99,93 %	99,94 %

### 4.2.3 Die Aussagekraft der Verfügbarkeitswerte für den Echtbetrieb

Die Verfügbarkeitsanforderung findet ihren Einzug in die Verträge als Sicherheit für den Betreiber der Anlage, dass diese auch die an sie gestellten Anforderungen erfüllen kann (vgl. Kapitel 1.1). Dies gilt zum einen kurzfristig, bei der Inbetriebnahme der Anlage, als auch langfristig zur Instandhaltung. Nach den Erfahrungen der Betreiber erfüllt der Verfügbarkeitskennwert diesen Anspruch nur unzureichend.

#### Garantie für guten Anlagenanlauf?

Die Ergebnisse der Verfügbarkeitsvortests haben die Anforderungen jeweils übertroffen, auch die Leistung entsprach bei der Wiederholung des zweiten Vortests den Erwartungen. Die Schlussfolgerung, dass die Anlage darauf hin bereit war für den Echtbetrieb, konnte von diesem Ergebnis aber nur bedingt abgeleitet werden, wie die Erfahrung bei Produktionsstart der Elektrohängebahn zeigte: Über die Elektrohängebahn läuft der wesentliche Materialfluss durch die Cateringanlage. Dieser muss gewährleistet sein, um die termingerechte Versorgung der Flugzeuge mit den entsprechenden Speisen, Getränken und sonstigen Waren sicherstellen zu können. Ist dies nicht möglich, verspäten sich die nicht versorgten Flüge, was den Ablauf am Flughafen empfindlich stört und enorme Kosten verursacht. Trotz der einwandfreien Verfügbarkeitswerte konnte die Anlage bei Betriebsstart diese Aufgabe in den ersten Stunden nicht durchführen, so dass ca. 30 % der geplanten Flüge durchschnittlich eine Stunde Verspätung hatten und davon ca. 17500 Passagiere betroffen waren, vgl. [AFX08].

Die Probleme konnten zwar zügig behoben werden (vgl. Kapitel 5.3.2), trotzdem hätten alle Beteiligten auf diese Erfahrung gerne verzichtet. Die Ursache lag nicht in der Technik, sondern vielmehr in der Software und Arbeitsfehlern des Personals, das zwar an der Anlage geschult worden war, aber noch nicht sicher eingearbeitet war, was durch den

großen psychologischen Druck eines Anlagenstarts von 0 auf 100 noch verstärkt wurde. Diese Faktoren haben allerdings keinen Einfluss auf den Messwert „Verfügbarkeit“ und so wurde der Mangel bei den Vortests auch nicht deutlich.

### **Langfristige Verfügbarkeitsmessung für die Instandhaltung?**

Die langfristigen Verfügbarkeitswerte liegen üblicherweise deutlich niedriger als die fast an die 100 % Werte bei der Verfügbarkeitsabnahme, wie bereits vom Bover ( [VB01] bei seinen Untersuchungen feststellte. Das liegt daran, dass die Betreiber nicht mehr nach technischen Ausfällen und anderen Ausfällen unterscheiden, wie es bei dem Abnahmetest der Fall ist.

Außerdem interessieren für eine sinnvolle Instandhaltungsplanung und -durchführung in erster Linie die konkreten Ausfälle der Anlage. Aus diesem Grund wurde im Logistikzentrum die Verfügbarkeitsmessung nach der Abnahme stark vereinfacht. Auf eine Gewichtung von Ausfallzeiten wird nun vollständig verzichtet. Stattdessen werden die ungewichteten Verfügbarkeitswerte (nach Gleichung (2.1) und deren Durchschnittswerte pro Gewerk aufgelistet. Die Anlagengesamtverfügbarkeit berechnet sich ebenfalls nach Gleichung (2.1), wobei die Summe aller Ausfallzeiten des Tages mit der Betriebszeit in Beziehung gesetzt wird. Das ergibt Werte von 40-60 %, was im Vergleich zu den Testwerten der Abnahme erschreckend niedrig erscheint, aber den Vorteil hat, dass einzelne Ausfälle stärker repräsentiert werden und so schneller auffallen und behoben werden können [Tra08].

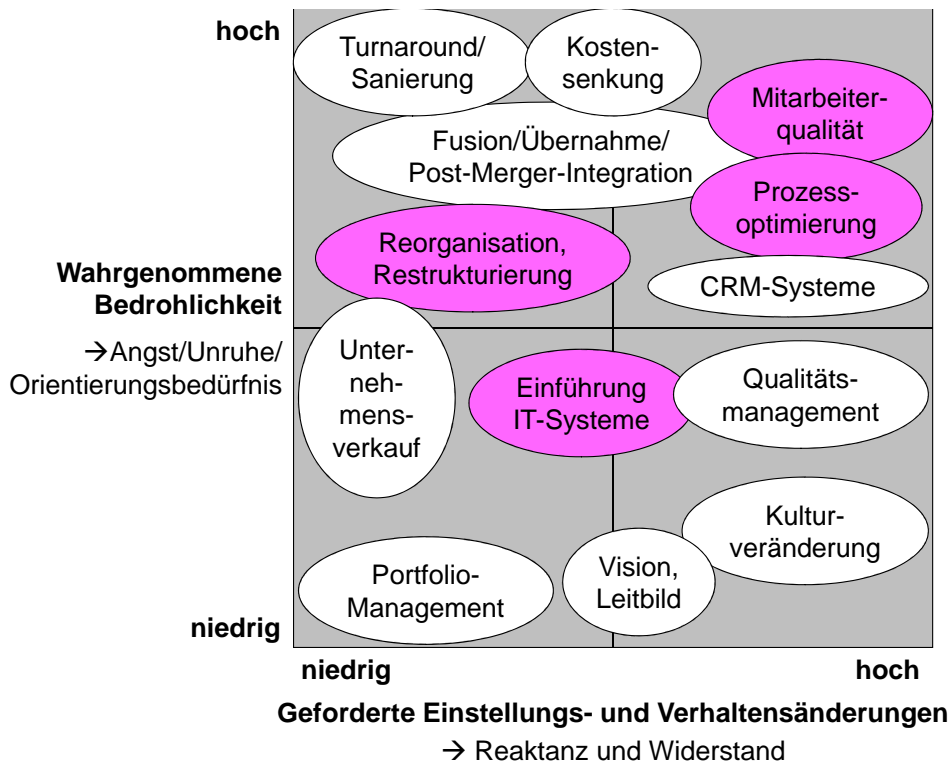
### **4.2.4 Der unterschätzte Faktor: Die Emotionen der eigenen Mitarbeiter**

Wie eingangs erwähnt, ändert sich der Arbeitsablauf für Mitarbeiter ganz entscheidend durch die intralogistische Anlage. Daneben darf nicht vernachlässigt werden, dass diese Veränderungen für die einzelnen Mitarbeiter häufig negative Emotionen hervorrufen: „Zwei Emotionen spielen bei Veränderungen eine herausragende Rolle: zum einen Angst, zum anderen ein Gefühl, das man in der Psychologie »Reaktanz« nennt - eine Mischung aus Unwillen, Abwehr und Trotz, und das zur Verteidigung oder Wiederherstellung der bedrohten persönlichen Handlungsfreiheit motiviert.“ [Ber10, S. 13] Je höher die wahrgenommene Bedrohlichkeit eines Veränderungsprozesses, desto größer die bei den Mitarbeitern hervorgerufene Angst, je größer die geforderte Einstellungs- und Verhaltensänderung, desto größer die Reaktanz. Berner ordnet in Abbildung 4.2 verschiedene Veränderungen diesem Emotionsraster zu.

Die Einführung einer intralogistischen Anlage ist häufig verbunden mit einer Prozessoptimierung oder Restrukturierung, begleitet von der Einführung neuer Software und Mitarbeiterschulungen (in Abbildung 4.2 rot hinterlegt). Sie ruft demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit zumindest bei einigen Mitarbeitern Unwillen und Angst aus.

In Hinblick auf den Verfügbarkeitsstest kann dies zur Folge haben, dass Mitarbeiter, die befürchten, von dem technischen System in ihrer Handlungsfreiheit eingeschränkt oder gar ersetzt zu werden, kein Interesse an einer hohen Verfügbarkeit der Anlage haben. Dies kann bedeuten, dass sich die Mitarbeiter nur langsam einarbeiten lassen, bemerkte Mängel nicht melden oder beseitigen und - in Extremfällen - die Anlage sogar sabotieren.

Um die Emotionen und negativen Folgen einzudämmen, empfiehlt Berner frühzeitige Information über die geplanten Änderungen und Auswirkungen der Veränderung (vgl.



**Abbildung 4.2** Zwischen Angst und Trotz - typische Gefühlslagen bei unterschiedlichen Veränderungsvorhaben, nach [Ber10, S. 17]

[Ber10, S. 162ff]). Nach den Erfahrungen von [Tra08] zahlt sich vor allem ein klares Konzept zum Change-Management aus, in dem besonders darauf eingegangen wird, welche Rolle der einzelne Mitarbeiter in der zukünftigen Organisation zu spielen hat. Wenn die Mitarbeiter individuell und spezifisch frühzeitig informiert und später darauf aufsetzend geschult werden, mindert sich üblicherweise ihre Abwehrhaltung sehr stark.

Gelingt es, die Befürchtungen der Mitarbeiter zu zerstreuen, oder gar nicht erst entstehen zu lassen, muss trotzdem mit „emotionalen“ Auswirkungen auf die Verfügbarkeit gerechnet werden, wenn durch Neugier und Spieltrieb die Möglichkeiten der neuen Anlage erkundet und ausgereizt werden, und dadurch ebenfalls Ausfälle entstehen. Diese spielphase der Mitarbeiter ebbt allerdings üblicherweise von selbst wieder ab.

### 4.3 Erfahrungen von Lieferanten

Während für Anlagenbetreiber eine neue Anlage ein eher singuläres Ereignis darstellt, ist es für Anlagenlieferanten Tagesgeschäft. Trotzdem sind gerade die Verfügbarkeitstests keineswegs Routine, wie im Folgenden dargestellt wird.

Werden Lieferanten nach ihren Erfahrungen mit Verfügbarkeitstests gefragt, gibt es im Wesentlichen drei Kategorien von Antworten: der problemlose, weil nicht stattfindende Verfügbarkeitstest, der normal verlaufende Verfügbarkeitstest und der desaströs verlaufende Verfügbarkeitstest. Im Folgenden werden zunächst die beiden Extremvarianten beleuchtet und anschließend der Normalfall anhand eines Beispiels genauer dargestellt.

### 4.3.1 Der günstigste Verfügbarkeitsnachweis

Ziel des Verfügbarkeitsstestes aus Lieferantensicht ist die Bestätigung des Kunden, dass die Anlage mit der zugesicherten Verfügbarkeit funktioniert. Im günstigsten Fall benötigt der Kunde dafür keinen Test, so dass der damit verbundene Aufwand inklusive der Kosten nicht anfällt. Dieser optimale Fall tritt immer dann auf, wenn die Anlage einerseits im Zuge der Inbetriebnahme und Anlaufphase so stabil läuft, dass der Kunde mit der erlebten Verfügbarkeit zufrieden ist, und andererseits das Verhältnis zwischen Kunde und Lieferant so gut ist, dass der Kunde darauf vertrauen kann, dass der Lieferant bei Bedarf auch nach der Abnahme bei evtl. noch auftretenden Problemen konstruktiv an einer Lösungsfindung mithilft.

Obwohl es keine konkreten Zahlen für die Häufigkeit dieses vertrauensvollen Nicht-Nachweises gibt, gibt es mehrere Anhaltspunkte dafür, dass eine Vielzahl von Anlagen auf diese Weise abgenommen wird: Auf der Intralogistikmesse „LogiMat“ im Jahr 2007 wurden mit zwölf zufällig ausgewählten Lieferanten unterschiedlicher Größenordnung qualitative Interviews geführt. Bei diesen Interviews gaben drei dieses Vorgehen an. Bei einem auf Lagertechnik spezialisierten Lieferanten ist der Verzicht auf den Nachweis der Normalfall, man konnte sich nur an einen geforderten und durchgeführten Verfügbarkeitsstest innerhalb von 30 Jahren erinnern. Ein zweiter, international tätiger Lieferant berichtete sogar von gezieltem Vertrauensaufbau zum Kunden, um den Verfügbarkeitsstest überflüssig zu machen.

Auch der Lieferant des Projekts in Kapitel 4.3.3 schätzt, dass ca. die Hälfte seiner mittelständischen Kunden auf den Verfügbarkeitsstest verzichtet.

### 4.3.2 Der desaströse Verfügbarkeitsnachweis

Neben diesem für Kunde und Lieferant günstigen Verlauf des Verfügbarkeitsnachweises gibt es allerdings auch nicht wenige Fälle, die geradezu desaströs enden. In der Einleitung wurde bereits sehr eindrucksvoll von einem solchen Beispiel berichtet: Der Verfügbarkeitsstest war bestens vorbereitet, trotzdem traten Schwierigkeiten auf, aufgrund derer der Test sich auf 28 Tage Dauer ausdehnte, was die Kosten explodieren ließ und die Beteiligten teilweise bis an den Rand ihrer persönlichen Leidensfähigkeit brachte (vgl. Kapitel 1.1, Seite 2).

Diese Beschreibung deckt sich mit den Erfahrungen beim erfolglosen Versuch, die Verfügbarkeitsstests bei Projekten eines großen deutschen Konzerns auszuwerten:

„Das Hauptargument war, dass mehr oder weniger alle Projekte dieser Art letztendlich mit einem *Industrie-Abkommen* beendet werden, das im Wesentlichen (juristisch ausgedrückt) einen Vergleich zwischen den jeweils bestehenden gegenseitigen Claims [Ansprüche, Anmerkung der Autorin] darstellt. Auf der einen Seite arbeiten die Kunden produktiv mit der Anlage, was eigentlich (innerhalb von üblicherweise 6 Wochen) eine Zahlungsverpflichtung hinter sich herzieht, auf der anderen Seite werden vom Lieferanten diverse *Unzulänglichkeiten* zugegeben, die man erst irgendwie *verspätet* oder nur eingeschränkt beseitigt hat. Ebenfalls bewertet werden alle Arten von Leistungen, die der Lieferant auf seine Kosten erbracht hat, ohne rechtlich dazu verpflichtet zu sein (Änderung an Bedienmasken, Reports, Schichtbegleitung, . . .), diese werden dann mit den zusätzlichen Aufwänden verrechnet, die der Kunde wegen behaupteter oder tatsächlich bestehender Unzulänglichkeiten hatte und evtl. auch noch hat“ [Her07].

Um solche langwierige Missverständnisse und Desaster zu vermeiden, müssen im Vorfeld eine Reihe von Festlegungen getroffen werden. Bei mehreren Lieferanten ist vor allem die Verteilung der Verantwortung eindeutig zu klären, am besten im Rahmen einer Generalunternehmerschaft. Außerdem sollten vor dem Verfügbarkeitstest folgende Fragen beantwortet sein:

- Für welches System wird die Verfügbarkeit ermittelt (einzelne Elemente, Teilsysteme, Gesamtsystem)?
- Aus welchen Elementen wird das System wie verknüpft (Gewichtungsfaktoren, Berechnungsformel)?
- Bei welcher Leistung/Last wird geprüft (die Hochrechnung auf nicht darstellbare Maximalleistung ist unzulässig)?
- Wie werden die Messergebnisse gemittelt (z. B. erst Tageswerte, dann Durchschnitt der Tageswerte)?
- Wann und wie lange wird getestet?
- Wie ist der Gefahrenübergang bei bereits laufender Produktion und noch ausstehendem Verfügbarkeitstest geregelt?

Ist dies gewährleistet und ist die Anlage eher klein, sind die Chancen deutlich erhöht, dass der Verfügbarkeitstest ohne unliebsame Überraschungen ablaufen kann.

### 4.3.3 Der normale Verfügbarkeitsnachweis

Anhand eines Beispiels wird nun ein solcher *normaler* Verfügbarkeitstest beschrieben.

#### Projektbeschreibung

Bei dem Beispielprojekt handelt es sich um ein Distributionszentrum für die Versorgung mehrerer Verkaufshäuser. Der Lieferant handelte als Generalunternehmer für das automatische Hochregallager mit mehreren zehntausend Palettenstellplätzen, elf Regalbediengeräten, Paletten-Fördertechnik, Stahlbau, Materialflusssystem mit Anbindung an das Warehouse Management System des Kunden und Anlagenvisualisierung. Die geforderten Verfügbarkeiten werden in Tabelle 4.4 dargestellt [Ano08].

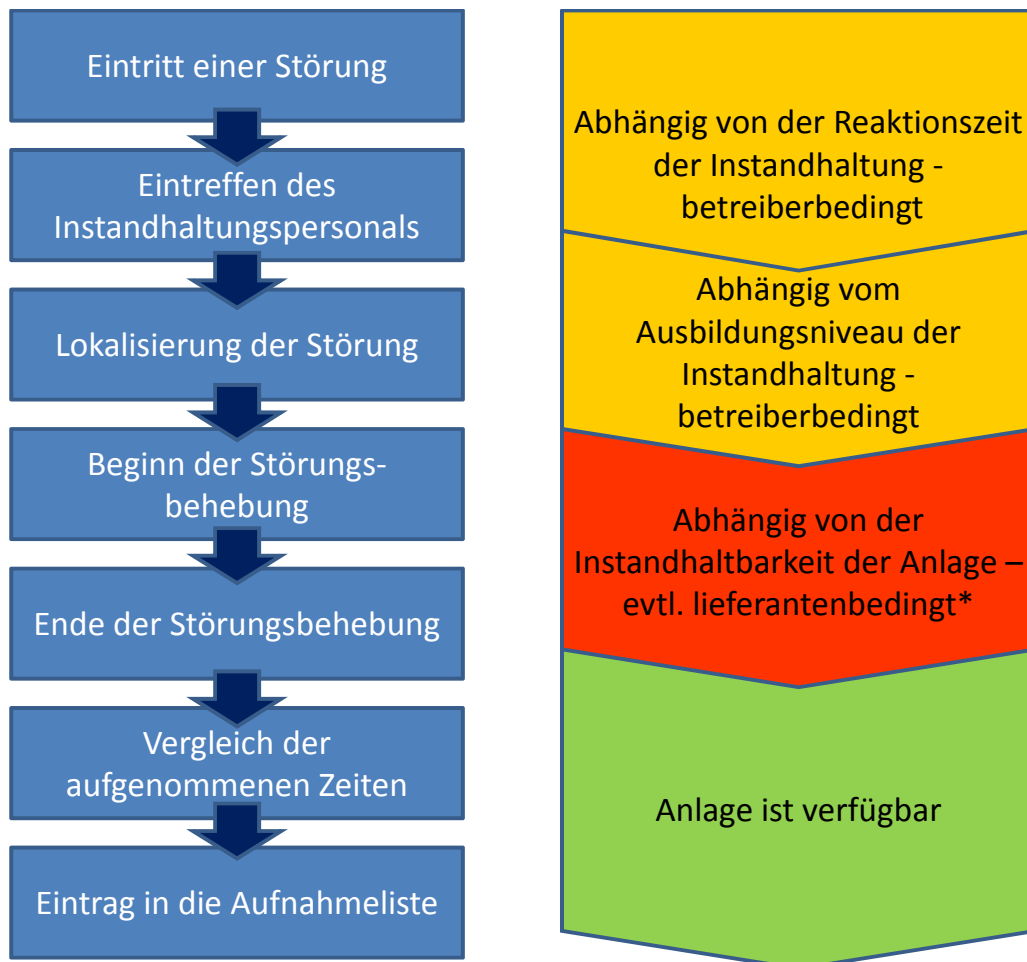
**Tabelle 4.4** Geforderte Verfügbarkeiten

Gewerk	gef. Verfügbarkeit
Materialflussrechner <sup>30</sup> :	mind. 99,5 %
Regalbediengeräte:	mind. 99,0 %
Fördertechnik:	mind. 98,5 %

Grundlage für die Verfügbarkeitsberechnung sind die bekannten Richtlinien FEM 9.222, FEM 9.221, VDI 3977 und VDI 3581, insbesondere Gleichung 2.8, vgl. Kapitel 2.2, S. 14f.

Wie branchenweit üblich wird für den Verfügbarkeitstest vorausgesetzt, dass das Personal zur Bedienung der Anlage und das Personal zur Störungsbeseitigung an der Anlage jeweils ausreichend qualifiziert ist, und sich die notwendigen Ersatzteile in der Nähe der Anlage befinden. Es wurde vereinbart, dass der Test 3-6 Monate nach Inbetriebnahme an 5 Tagen im normalen Schichtbetrieb, d. h. an 12 Stunden pro Tag stattfinden soll.

<sup>30</sup>Auf den Materialflussrechner wird im Folgenden nicht eingegangen.



\*nur diese Zeit wird für den Verfügbarkeitsnachweis erfasst, anschließend Ursachenanalyse

**Abbildung 4.3** Ablauf der Stördatenerfassung

Nach den Erfahrungen des Generalunternehmers hat sich die manuelle Erfassung der Störzeiten bewährt, wie sie in Abbildung 4.3 dargestellt ist. Dabei wird allerdings auf die Anlagensvisualisierung als Basisinformation zurückgegriffen. Zum einen sind Anlagenstillstände, die zum Teil durch Softwarefehler hervorgerufen werden, nicht automatisch erfassbar, da sich solche Fehler häufig auch in die automatische Erfassungssoftware fortpflanzen. Zum anderen werden übermäßige Wartezeiten im betrieblichen Ablauf, nicht-verfügbares Material und ähnliche eher organisatorische Faktoren mangels Alternativen ohnehin manuell in Listen erfasst. Wenn Ursachen oder Störzeiten nicht sofort zuordenbar sind, werden diese trotzdem in die Erfassungslisten aufgenommen und mit „?“ gekennzeichnet. Nach Ablauf eines Testtages werden alle Punkte gemeinsam durchgesprochen. Stellt sich dabei heraus, dass einige Punkte nicht zugeordnet werden können, geht die Ausfallzeit nicht zu Lasten des Lieferanten.

Da in der Praxis die Bediener der Anlage mit der Aufnahme der Anlagenstörung in der Liste nicht noch zusätzlich belastet werden können, wird separates Personal für die Überwachung der Anlage und Erfassung der Störungen benötigt. Der Kunde stellt eine Person als Schriftführer und zur Zeitmessung, sowie einen Instandhaltungsmitarbeiter. Der Lieferant stellt eine Person zur Kontrolle der Zeitmessung und eine weitere Person

zur allgemeinen Unterstützung.

Die Überwachung der Anlage erfolgt zentral über die Visualisierung am Materialflussrechner. Die Störungen werden, entsprechend der vertraglichen Vereinbarung, durch den Kunden behoben. Vom Generalunternehmer wird der Ablauf der Zeitaufnahme überwacht.

Die verschiedenen Elemente haben einerseits unterschiedliche Bedeutung für die Funktionserfüllung der Anlage und sind andererseits teilweise mehrfach vorhanden, so dass Störungen zumindest teilweise kompensiert werden können. Dies wird durch Gewichtungsfaktoren berücksichtigt, mit denen die Ausfallzeiten der jeweiligen Elemente beaufschlagt werden.

In Absprache mit dem Kunden werden im vorliegenden Projekt die einzelnen Elemente mit den Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 4.5 versehen. Diese wurden dabei in Anlehnung aller drei Methoden, vgl. S. 19, ohne Berechnung festgelegt.

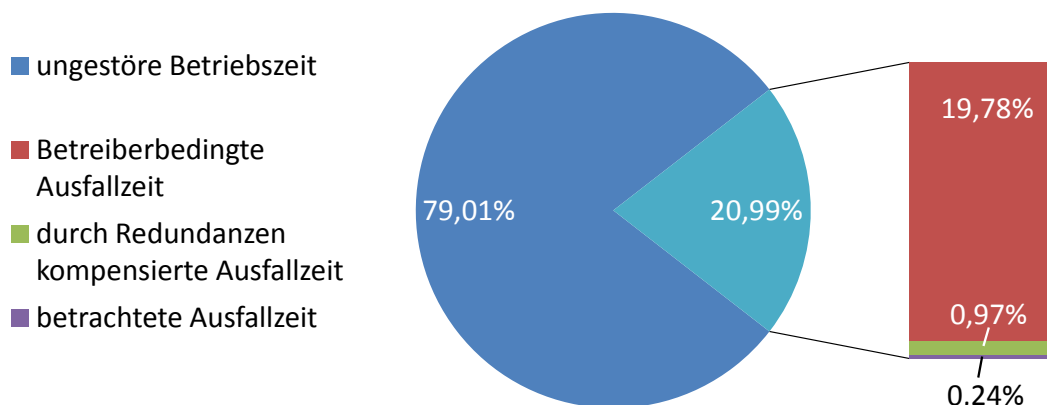
**Tabelle 4.5 Gewichtungen**

Element	Anzahl	Gewichtung gesamtes Gewerk	Gewichtung pro Element
RBG	11	100 %	20 %
Zu- und Abförderer von RBG	22	100 %	10 %
Hauptförderstrecke	2	100 %	66,6 %
Beschickungsstation	4	100 %	33,3 %
Zuförderer zum Verschiebewagen	11	100 %	9,5 %

### Auswertung der Stördaten

Die Betriebszeit und die ermittelten Störungszeiten werden in die Auswerteliste übertragen und mit den Gewichtungsfaktoren multipliziert. Die erreichte Verfügbarkeit wird automatisch berechnet. Der Mittelwert aller Tagesverfügbarkeiten ergibt die Gesamtverfügbarkeit.

Nach den fünf Testtagen mit insgesamt 52 Stunden Testdauer ergibt sich eine Verteilung der Zeiten, wie sie in den Abbildungen 4.4 und 4.5 dargestellt ist.



**Abbildung 4.4** Ausfallzeiten der Regalbediengeräte

Von den insgesamt 79 Ausfällen werden nur sechs dem Lieferanten zugeordnet, von denen wiederum nur zwei eindeutig technisch bedingt waren, bei den anderen vieren



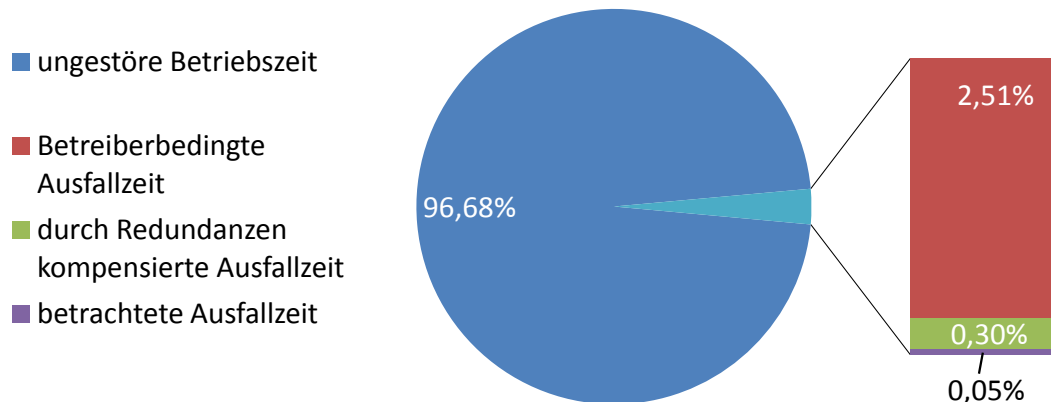


Abbildung 4.5 Ausfallzeiten der Fördertechnik

konnte die Ursache nicht ermittelt werden. Die betreiberbedingten Ausfälle hatten meistens ihre Ursache in flatternder Plastikfolie, die mehrfach Sensoren blockierte, oder in Fehlern der externen Datenverarbeitung.

Tabelle 4.6 Erreichte Verfügbarkeit

Gewerk	geforderte Verfügbarkeit	gesamte Verfügbarkeit <sup>31</sup>	lieferantenbedingte Verf.	technische Verfügbarkeit <sup>32</sup>
Fördertechnik	99,0 %	97,2 %	99,7 %	<b>99,9 %</b>
Regalbediengeräte	98,5 %	79,8 %	98,8 %	<b>99,8 %</b>

### Interpretation

Obwohl der Verfügbarkeitsstest bei diesem Projekt reibungslos und erfolgreich verlaufen ist, werden an seinem Beispiel dennoch zwei Probleme deutlich:

Zum einen der beträchtliche **Aufwand**: Vier Personen sind eine ganze Woche damit beschäftigt, die Anlage zu beobachten. Die automatisiert mitgeschriebenen Stillzeiten alleine reichen nicht aus, da diese die Ursache einer Störung nicht erfassen, die aber wesentlich für die Zuordnung der Verantwortung und damit der Anrechnung in die Verfügbarkeitsrechnung ist. Die betroffenen Beobachter sind gezwungenermaßen unproduktiv, sie verbessern weder die Anlage, noch können sie anderweitig aktiv zum (weiteren) Projekterfolg beitragen. Dennoch sind sie durch ihre Aufgabe gebunden und können nicht für produktivere Aufgaben eingesetzt werden. Sowohl für Lieferanten als auch für Betreiber ist dies eine teure Angelegenheit.

Zum anderen ist immer wieder eine latente **Unzufriedenheit** der Anlagenbetreiber mit dem Ergebnis spürbar: Erst werden mit dem beschriebenen großen Aufwand Stillstandszeiten erfasst, von denen dann aber nur ein Bruchteil in die Verfügbarkeitsberechnung geht. Das erzeugt das Problem, dass der Fokus auf alle Stillstände gelegt wird (vergleiche Tabelle 4.6 → gesamte Verfügbarkeit), obwohl nur die vertraglich relevante *technische* Verfügbarkeit für den Verfügbarkeitsnachweis und damit für die rechtliche Abnahme von Bedeutung ist. Lieferanten sehen sich daher häufig dem unterschwelligem Vorwurf

<sup>31</sup>Betreiber- und lieferantenbedingte Verfügbarkeit

<sup>32</sup>Lieferantenbedingte Verfügbarkeit inkl. Gewichtung

ausgesetzt, sie würden die Verfügbarkeit schönrechnen, obwohl das Prozedere zur Verfügbarkeitsberechnung im Einklang mit den bestehenden und vertraglich zur Grundlage genommenen Richtlinien steht. Dieses Problem ließe sich lösen, wenn dem Anlagenbetreiber frühzeitig die beschriebene Diskrepanz zwischen aufgenommenen und ausgewerteten Ausfallzeiten frühzeitig bewusst gemacht werden würde.

### 4.4 Zusammenfassung Kapitel 4

Die Untersuchung dieser Beispielfälle, dargestellt aus Sicht von Betreibern und Lieferanten, bestätigt eine bereits lange bestehende Beurteilung der Abnahmesituation: „Es zeigt sich immer wieder, daß Hersteller und Betreiber unter Inbetriebnahme zweierlei verstehen: Der Hersteller meint damit, daß nach seiner Zeit der Probeläufe die Inbetriebnahme mit geringerer Anfangsleistung und mit natürlichen Fehlern beginnen kann. Der Betreiber meint, daß mit Beginn der Inbetriebnahme mit echter Ware eine hohe Anfangsleistung und eine entsprechende Anlagenstabilität vorhanden ist“ [Arm81, S. 69].

Die Durchführung eines Verfügbarkeits-tests zur Angabe eines Anlagenkennwerts hat für den Betreiber keinen wesentlichen Informationswert: Vor Anlagestart befindet sich die Anlage in einem unrealistischen Testzustand, der mit den realen Arbeitsbedingungen nicht zu vergleichen ist. Hat sich die Anlage unter realen Bedingungen eingespielt und ist in der Lage ihre Aufgabe zu erfüllen, bringt eine Bestätigung dieser Tatsache in Form eines Zahlenwerts dagegen keinen Mehrwert mehr gegenüber der täglichen Erfahrung mit der Anlage. Stattdessen wünschen sich Betreiber eine Anlage, die möglichst von Anfang an, die an sie gestellten Anforderungen erfüllt und eine Sicherheit, dass die vertraglichen Zusicherungen auch eingehalten werden.

Lieferanten wünschen sich Prozeduren, deren Testergebnisse von allen Beteiligten akzeptiert werden, bei gleichzeitiger Minimierung des Aufwands für den Test.

Die Betreiber wünschen sich eine funktionierende Anlage, die Lieferanten eine faire Beurteilung der technischen Ausfälle. Außerdem soll der Aufwand für den Test möglichst klein, die Aussagekraft der Ergebnisse dafür groß sein. Alternative Prozeduren werden nach folgenden Kriterien beurteilt:

1. Gibt das Testergebnis Auskunft darüber, ob die Anlage in der Lage ist, ihre Aufgabe zu erfüllen?
2. Werden Lieferanten gegen unberechtigte Anforderungen geschützt, die aus Ausfällen resultieren, die außerhalb ihres Einflussbereiches liegen?
3. Verringert sich der Aufwand gegenüber den heute üblichen Testprozeduren?

---

## 5 Verfügbarkeitsentwicklung

Die Empfehlungen der Richtlinien, wann und wie die Verfügbarkeit von neuen Anlagen getestet werden sollen, basieren auf verschiedenen Annahmen. Diese sollen im folgenden Kapitel dargestellt und auf ihren Realitätsbezug hin untersucht werden.

Bereits in Kapitel 4, S. 40 wurde darauf hingewiesen, wie schwierig es ist, konkrete Daten zur Analyse zu bekommen. Für die folgenden Auswertungen liegen die Daten von zwei Anlagen für mehrere Monate ab Anlagenstart vor. Diese werden ergänzt von einem veröffentlichten Bericht über den Anlauf einer weiteren Anlage (siehe Abschnitt 5.2).

Aufgrund der geringen Anzahl an vorliegenden Datenreihen ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, statistisch gesicherte Aussagen über intralogistische Anlagen im Allgemeinen zu treffen. Trotzdem lassen sich aus den Ergebnissen wichtige Erkenntnisse in Form von Indizien ableiten.

### 5.1 Ausgangslage

Im Kapitel 2.2.1, S. 14f, wurde bereits dargestellt, dass im geltenden Regelwerk der Verfügbarkeitstest „in der konstanten Betriebsphase“ [VDI92b, S. 13] nach ca. 3 Monaten über eine Testdauer von 5 - 10 Tagen empfohlen wird.

Der Rat, die konstante Betriebsphase abzuwarten, basiert auf der Erfahrung, dass neue Anlagen erst eine Einschwingphase mit relativ vielen Ausfällen durchlaufen müssen, bevor sich die Verfügbarkeit stabilisiert: „Eine hohe Verfügbarkeit wird in der Regel erst nach einem ausreichend langen Einlaufbetrieb erreicht.“ [FEM89, S. 7]. In der FEM 9.222 wird dies graphisch verdeutlicht, vgl. Abbildung 5.1: Die beiden Hüllkurven sollen zeigen, dass der Messfehler bei wenigen Messwerten enorm groß sein kann. Erst nach ca. 40 Ausfällen, so die damaligen Untersuchungsergebnisse [Zah09], schwankt das Messergebnis nur noch gering um die tatsächliche Anlagenverfügbarkeit.

Zu einem weiteren Einflussfaktor auf die Verfügbarkeit äußern sich die Richtlinien eher qualitativ: Der Einfluss des Personals, bzw. der Qualifikation des Personals. So wird in allen Richtlinien auf deren Bedeutung hingewiesen, so ist in [FEM89, S. 4] sorgfältig geschultes und geübtes Personal wichtig für eine geringe Störungsanfälligkeit der Anlage und qualifiziertes Instandhaltungspersonal entscheidend für kurze Ausfallzeiten. Die Bedeutung von gut geschultem Personal für eine optimale Instandhaltung wird in [VDI04a, S. 14] genauso betont wie auch in [VDI92b, S. 13f]. Dort findet sich auch eine Abbildung, die den Zusammenhang von Personal und Verfügbarkeit darstellt, vgl. Abbildung 5.2<sup>33</sup>.

Für die Messung der Verfügbarkeit im Rahmen des Abnahmetests allerdings wird, nach den Empfehlungen des Regelwerks, der Einfluss des Personals bewusst ignoriert, in dem

---

<sup>33</sup>Die Ursache für die vergleichsweise geringen Verfügbarkeitswerte und den steigenden Trend der Verfügbarkeit des zugrundeliegenden Beispiels werden nicht angegeben. Wahrscheinlich handelt es sich um Betreiberdaten, die ohne Gewichtung bzw. Unterscheidung nach Verursacher ausgewertet werden und damit automatisch eine niedrigere Verfügbarkeit ergeben, wie in Kapitel 4.2.3, S. 45 dargestellt.

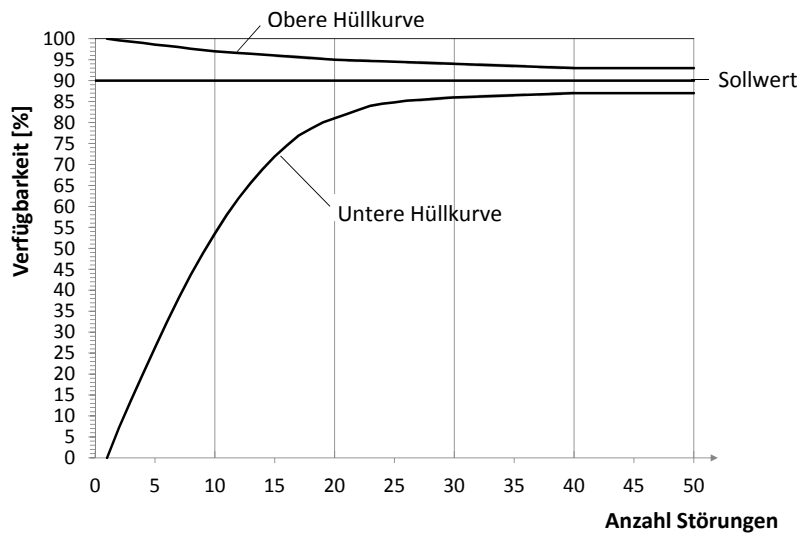


Abbildung 5.1 Genauigkeit der Ermittlung der Verfügbarkeit [FEM89, S. 6]

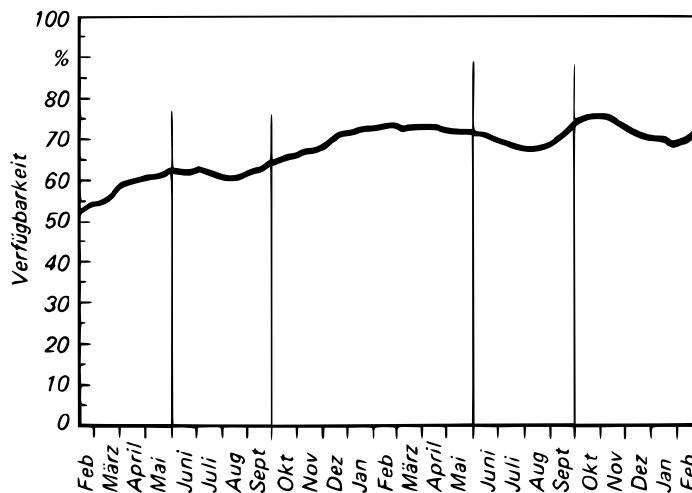
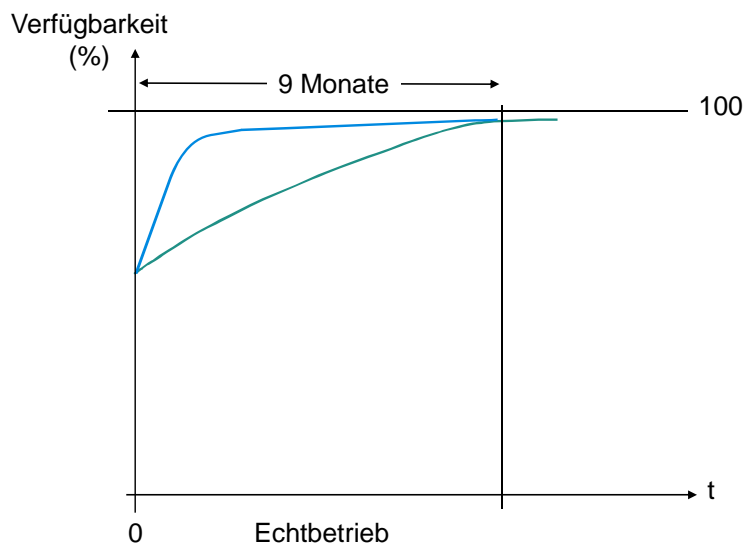


Abbildung 5.2 Verfügbarkeit eines Systems über zwei Jahre [VDI92a, S. 13]

die Anteile der Ausfallzeit, die durch Verzögerungen durch das Personal entstehen, für die Verfügbarkeitsberechnung nicht berechnet werden.



**Abbildung 5.3** Wann erreicht die Verfügbarkeit stabil das gewünschte Niveau? [Sch06, S. 15]

Zusammenfassend bilden folgende Annahmen das Gerüst für den herkömmlichen Ablauf des Verfügbarkeitsnachweises:

1. Die geforderte Verfügbarkeit wird erst nach einer Einfahrphase erreicht.
2. Innerhalb von drei Monaten hat die Anlage die geforderten Kennwerte erreicht.
3. Nach dem Einschwingen bleibt die Verfügbarkeit konstant hoch.
4. Der Messwert der Abnahme ist richtungsweisend für folgende Betriebsphase.
5. Der Einfluss des Personals kann für den Verfügbarkeitsnachweis ausgeklammert werden.

Bisher ist allerdings ungeklärt, ob diese Annahmen auch zutreffend sind. In einer Systemstudie [BNS76, S. 20] wurde festgestellt, dass automatische Ver- und Entsorgungssysteme in Krankenhäusern rund 9 Monate benötigten, um die geforderte Verfügbarkeit zu erreichen, was das dreifache des in den Richtlinien genannten Zeitraums ist, vgl. Abbildung 5.3. Außerdem stieg die Verfügbarkeit in dieser Zeit auch nicht kontinuierlich an, sondern wies erhebliche Einbrüche auf, vgl. Abbildung 5.4. Scheid, Mitautor der Studie, bezweifelte in einem Vortrag über Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit [Sch06], dass sich an diesem zeitlichen Verlauf heutiger Inbetriebnahmen wesentlich verändert hat.

Es ist ein nachvollziehbarer Ansatz, den Einfluss des Bedienpersonals für die Bewertung des technischen Systems auszuschließen, wenn man - wie im Regelwerk - davon ausgeht, dass die Qualifikation des Personals und die Qualität der Anlage, vgl. S. 3, unabhängig von einander sind. Wenn es aber zur Charakteristik der Inbetriebnahme einer Intralogistikanlage gehört, dass die Qualifikation des Personals einer systematischen Lernkurve folgt, erscheint es sinnvoll, dies in die Planung der AbnahmeprozEDUREN mit ein zu kalkulieren.

## 5.2 Die untersuchten Anlagen

Im folgenden Abschnitt werden die drei Anlagen vorgestellt, auf deren Informationen zur Verfügbarkeitsentwicklung die anschließenden Untersuchungen basieren.

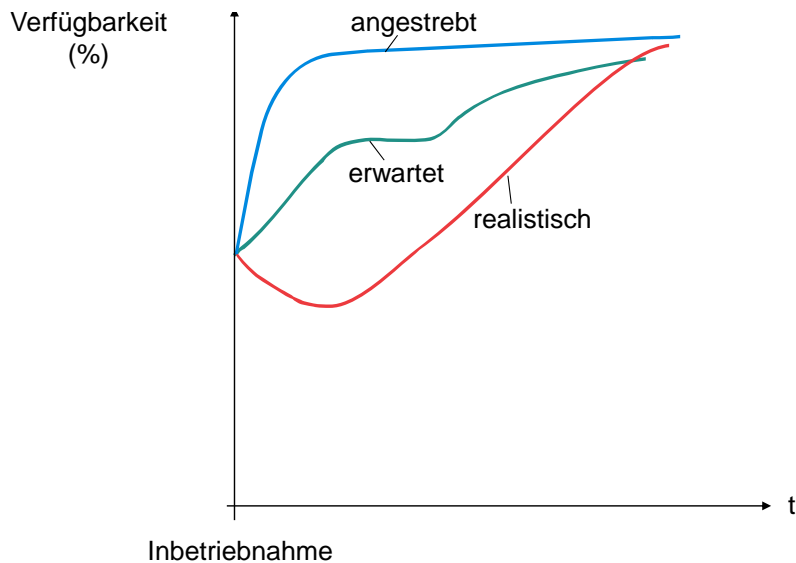


Abbildung 5.4 Wie entwickelt sich die Verfügbarkeit in den ersten Monaten? [Sch06, S. 14]

### 5.2.1 Verteilzentrum

Von der ersten Anlage, dem Verteilzentrum der Vereinigten Vertragsauslieferung (VVA), einem Dienstleistungsunternehmen der Bertelsmann AG, liegen keine Verfügbarkeitsdaten vor, dafür aber ein sehr ausführlicher Bericht [Arm81] über die gesamte Inbetriebnahmephase. Diese fand zwar bereits von 30 Jahren statt, sodass davon auszugehen ist, dass einige der damals auftretenden Probleme in dieser Form sich heute nicht mehr wiederholen würden. Nichtsdestotrotz galten damals bereits die gleichen Annahmen zur Verfügbarkeitsentwicklung wie heute. Aus diesem Grund sollen die damaligen Erfahrungen hier ebenfalls ausgewertet werden.

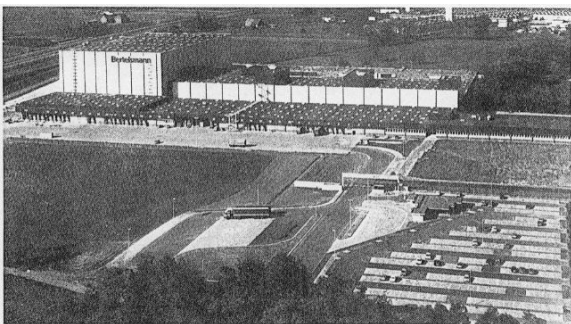


Abbildung 5.5 Ansicht des Verteilzentrums aus dem Inbetriebnahmejahr [Arm81]

Die Anlage setzt sich zusammen aus einem Hochregallager, einem fahrerlosem Transportsystem und einem Nachschub- und Zwischenlager. Sie wurde in den Jahren 1976 bis 1979 konzipiert und erbaut und 1980/81 in Betrieb genommen. Ihre Aufgabe war die Lagerhaltung und Auslieferung der Bücher für die eigenen Clubs sowie für über 170 konzerneigene und fremde Verlage.

### 5.2.2 Regalbediengeräte einer Kommissionieranlage

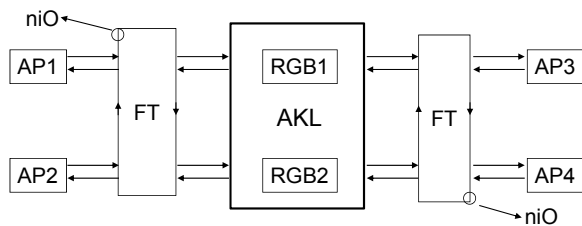


Abbildung 5.6 Layout Behälterlager mit zwei Regalbediengeräten

Die erste konkrete Datenreihe stammt aus einer Kommissionieranlage mit einem zwei-gassigen Behälterlager (AKL), das insgesamt 4 Arbeitsplätze (AP) auftragsgemäß mit Behältern versorgt. Dazu werden die benötigten Behälter an beiden Stirnseiten des Lagers ausgeschleust und über einen Förderkreislauf (FT) an einen der jeweils zwei Arbeitsplätze gefördert.

Aussortierte Ware wird an den Ausschleuspunkten (niO) aus dem System entfernt. Die Anlage steht in Wittlich an der Mosel und wurde im Dezember 2006 in Betrieb genommen. Zur Auswertung liegen die Störungsdaten der beiden Regalbediengeräte von Oktober 2006 bis einschließlich Februar 2007 vor [Ds07].

### 5.2.3 Elektrohängebahn

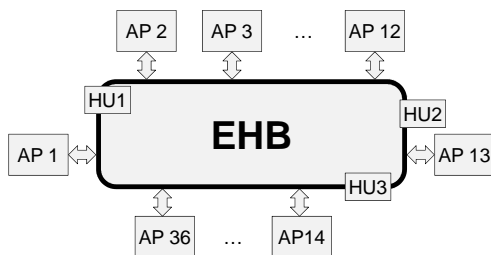


Abbildung 5.7 Prinzipskizze der Elektrohängebahn

Die umfangreichsten Daten stammen von der Elektrohängebahn (EHB), die bereits in Kapitel 4 vorgestellt wurde. Die 150 Fahrzeuge fahren über 1600 m Schienen und 74 Weichen auf zwei Ebenen und ver- und entsorgen 36 Arbeitsplätze (AP). Der Streckenverlauf ist in 69 Streckenabschnitte aufgeteilt.

Neben den Hubwerken (HU), die direkt vor den Arbeitsplätzen angeordnet sind und gemeinsam mit diesen betrachtet werden, gibt es noch drei weitere extra betrachtete Hubwerke. Mit der automatischen Gehängereinigungsstation ist die Anlage damit in 244 Elemente aufgeteilt, für die täglich die Ausfallzeit protokolliert wird. Zur Auswertung liegen die Daten für sieben Monate vor, zum Zeitpunkt der ersten Datenaufnahme ist die Anlage 3 Tage in Betrieb. Neben den Elementausfallzeiten liegt außerdem für jeden Tag die berechnete Gesamtverfügbarkeit vor [LSG09].

## 5.3 Auswertungen

Zu den verschiedenen Annahmen (vgl. S. 55) werden Daten von mindestens einer der Anlagen untersucht und ausgewertet.

### 5.3.1 Einschwingverhalten

Die erste Untersuchung widmet sich dem angenommenen Einschwingverhalten. Anhand der Ausfalldaten der EHB-Elemente wird untersucht, ob sich tatsächlich am Beginn der Anlagedauer eine Häufung von Ausfallzeiten beobachten lässt. Die Elemente wurden dazu

nach ihrer jeweiligen Funktion den Gruppen Arbeitsplätze, Fahrzeuge und Streckenabschnitte zugeordnet.

Das Verhalten einzelner Elemente wird nur in Einzelfällen durch eine deutliche Einschwingphase geprägt, der Großteil der Elemente hat keine Ausfälle oder nur wenige Einzelausfälle zu verzeichnen oder die Ausfälle treten sporadisch und unregelmäßig auf. Der zeitliche Verlauf einer Auswahl von Einzelelementen ist im Anhang A.1 dargestellt. Auch bei der Summenbetrachtung der Streckenabschnitte sind die Ausfälle über den gesamten Betrachtungszeitraum verteilt, vgl. Abbildung 5.11, ein Einschwingverhalten ist nicht zu erkennen.

Bei der Summenbetrachtung von der Gesamtanlage (Abbildung 5.8), wie auch bei der Gruppe der Arbeitsplätze (Abbildung 5.9) und Fahrzeuge (Abbildung 5.10) ist deutlich eine Phase mit großer täglicher Ausfallzeit zu erkennen, auf die eine Absenkung von Wochenmittelwert und Wochenstandardabweichung folgt.

Diese Einschwingphase wird üblicherweise mit der Frühausfallphase des Erklärungsmodells „Badewannenkurve“<sup>34</sup> erklärt, das im Kapitel 6.3.2 auf seine Eignung in diesem Anwendungsfall überprüft wird.

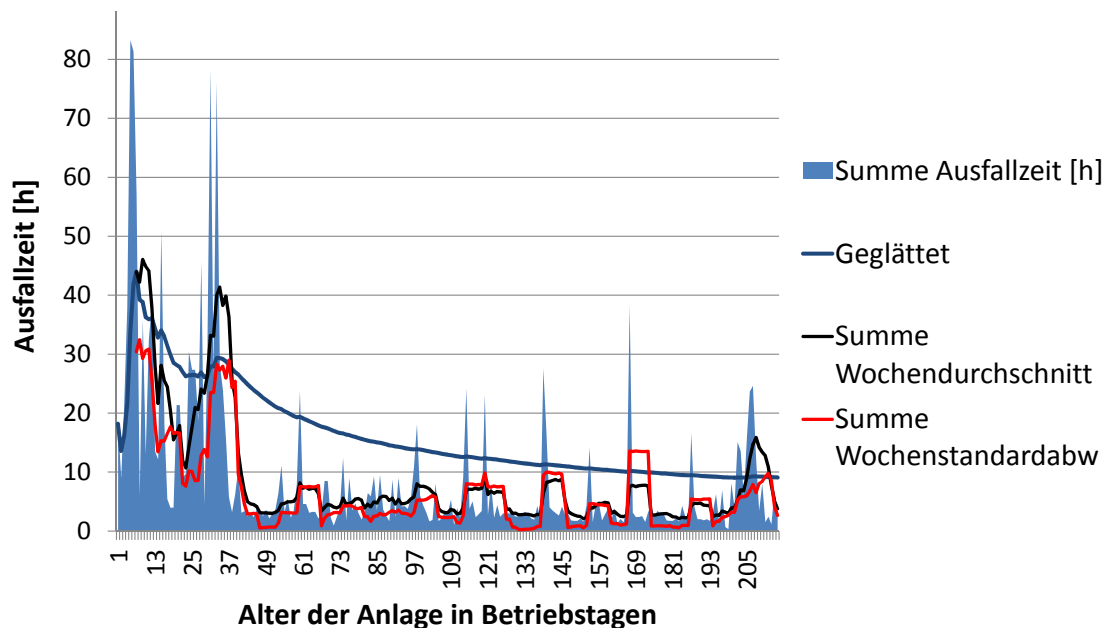


Abbildung 5.8 Gesamtanlage

### 5.3.2 Einschwingdauer

Wie am Beispiel der Elektrohängebahn gesehen, kann grundsätzlich eine Einschwingphase am Anfang der Betriebsdauer eines intralogistischen Systems stehen. Als Nächstes stellt sich die Frage nach ihrer Dauer. Dazu werden zunächst die Erfahrungen des Verteilenzentrums betrachtet und anschließend der Verfügbarkeitsverlauf der Regalbediengeräte und der Elektrohängebahn ausgewertet. Dazu werden die Gesamtverfügbarkeitsdaten der

<sup>34</sup>Durch ausreichende Glättung, exemplarisch in Abbildung 5.8 durchgeführt, ähnelt die Kurve des Ausfallverhaltens der „Badewanne“ aus Abbildung 6.7.



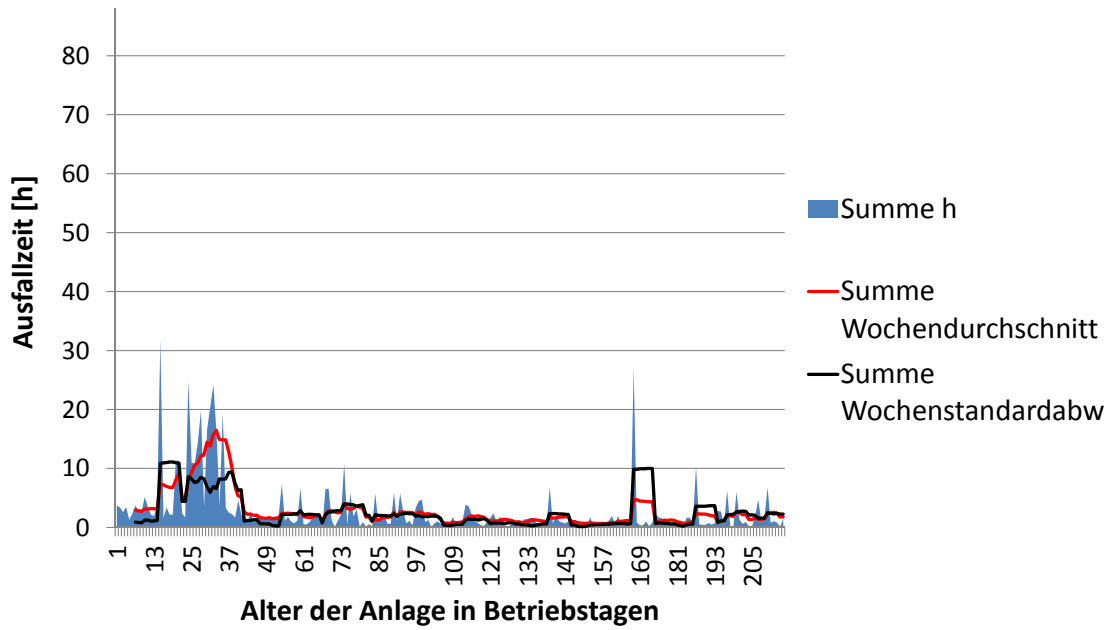


Abbildung 5.9 Arbeitsplätze

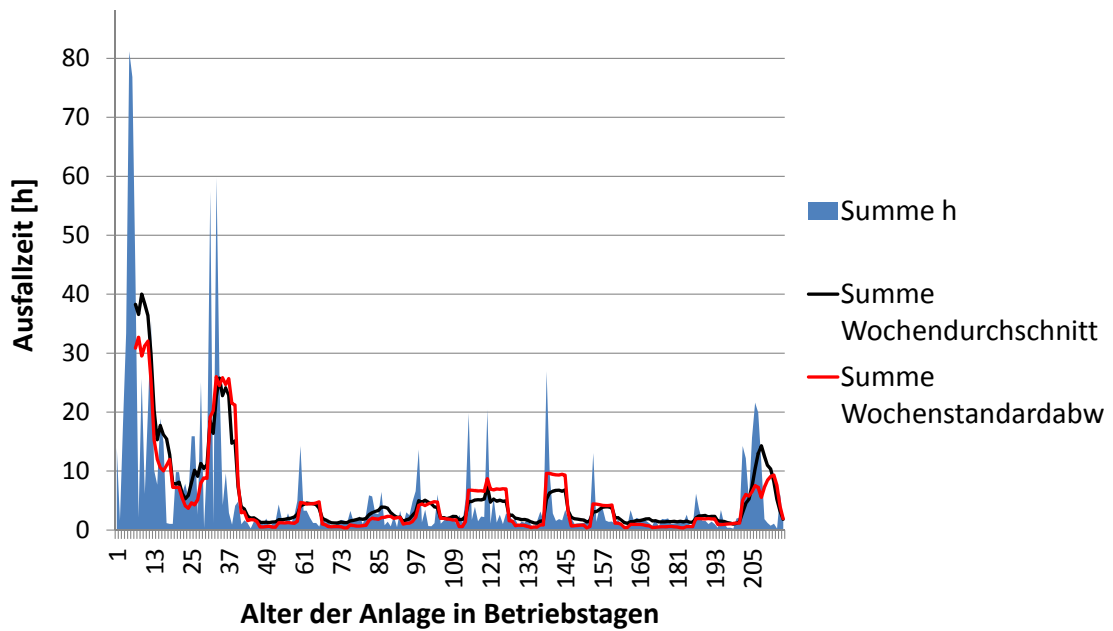


Abbildung 5.10 Fahrzeuge

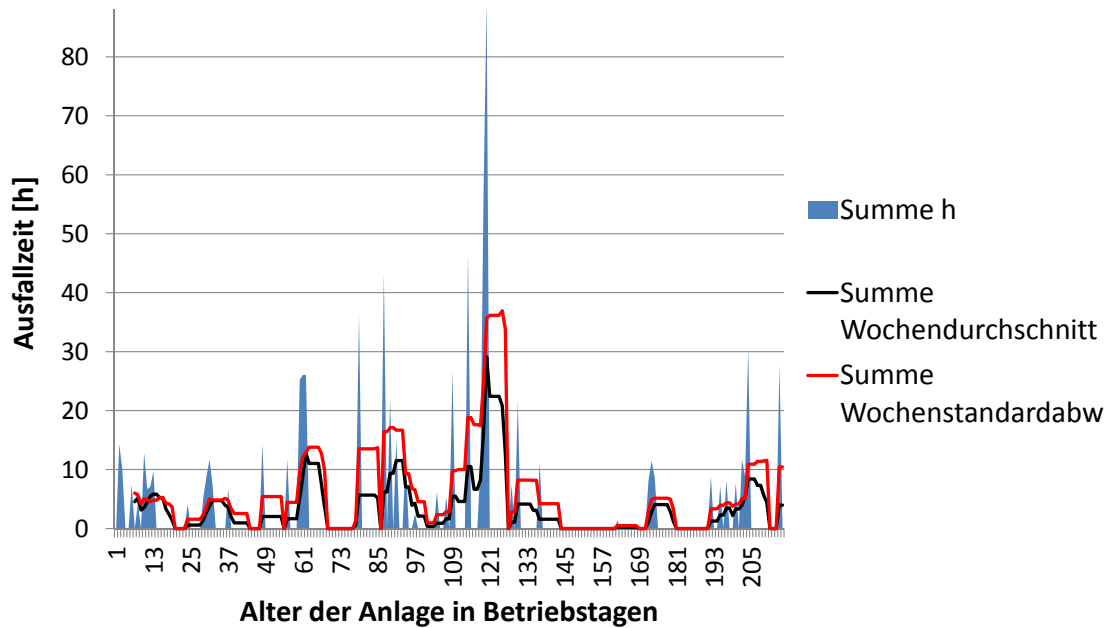
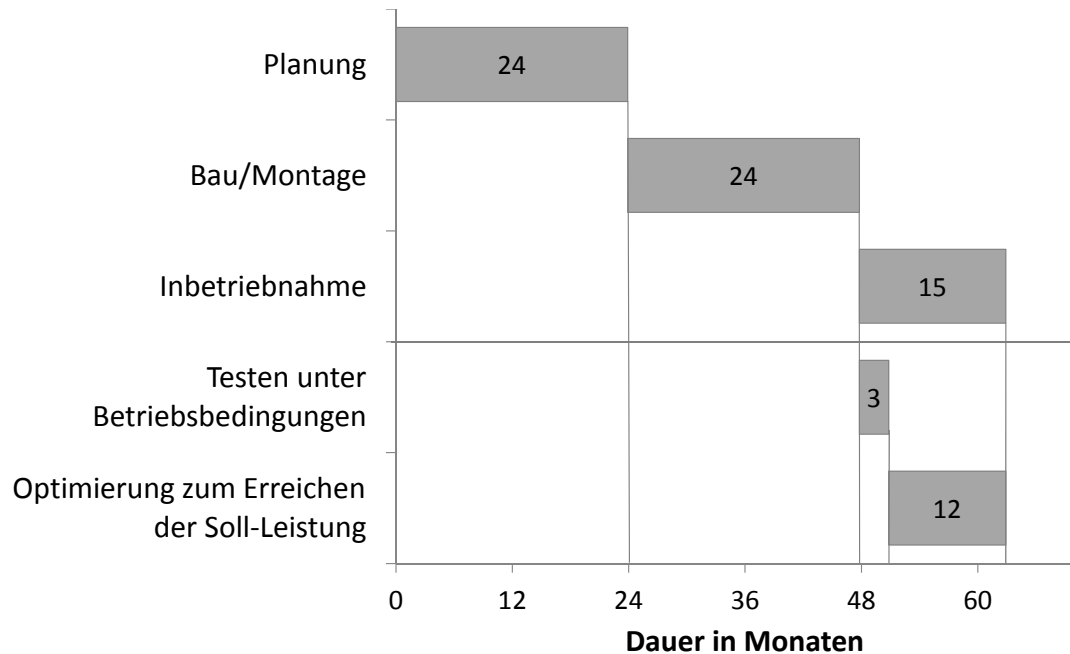


Abbildung 5.11 Streckenabschnitte

EHB herangezogen (berechnet aus den gewichteten Ausfallzeiten der Einzelelemente, verknüpft nach Gleichung (2.8), Gewichtungsfaktoren: Tabelle 4.1).

Das Neubauprojekt des Verteilzentrums war in drei Phasen aufgeteilt, vgl. Abbildung 5.12. Auf die Planungs- und die Bau/Montagephase von jeweils 24 Monaten folgte die Inbetriebnahmephase. Mit 15 Monaten nahm diese ca. ein Viertel der gesamten Projektlaufzeit in Anspruch. Sie wurde im 2-Schichtbetrieb durchgeführt, so dass diese Zeitpanne ca. 5.000 Betriebsstunden umfasst. Im ersten Teil, dem Testen unter Betriebsbedingungen (explizit nicht mit Hilfe von einigen wenigen Testpaletten) traten in allen Systemteilen Schwachstellen auf, die die Gesamtfunktion beeinträchtigten und von denen bis zum Ende dieser Phase nur etwa 25 % behoben worden waren. Die anschließende Optimierungsphase wurde benötigt, um die restlichen Schwachstellen zu beseitigen und die durch die Schwachstellen aufgetretenen Störungen zu beheben. Auch die Software musste noch verbessert werden. Außerdem traten in dieser Phase auch noch gehäuft Arbeitsfehler des Personals auf. Es liegen keine Daten über die Verfügbarkeit der Anlage vor, aber es kann angenommen werden, dass in dieser Phase gehäufte Ausfallzeiten vorlagen und somit die Einschwingdauer des Verteilzentrums deutlich über drei Monaten lag.

Die Verfügbarkeitswerte der beiden Regalbediengeräte schwanken in den ersten Betriebswochen sehr stark, erst nach 8 Wochen haben sich die beiden Geräte insoweit stabilisiert, dass ihr gemeinsames Wochenmittel (rote Kurven) für einen Zeitraum von 3 Wochen konstant die Anforderung erfüllt, vgl. Abbildung 5.13. Kurz vor den Betriebsferien sinkt die durchschnittliche Verfügbarkeit auf 97,6 % bei zunehmender Schwankung der Tageswerte. Nach den Betriebsferien dauert es ca. 3 Wochen, bis die durchschnittliche Verfügbarkeit wieder stabil mit geringen Schwankungen über 98 % liegt. Gegen Ende der Betrachtungszeit ist ein weiterer Einbruch der Verfügbarkeit zu verzeichnen, beide Effekte werden in Abschnitt 5.3.5 genauer beschrieben. Aufgrund der vorliegenden Daten lässt sich nicht sagen, ob es zu einem späteren Zeitpunkt zu einer Stabilisierung



**Abbildung 5.12** Darstellung des Zeitrahmens über den Projektlauf, nach [Arm81, S. 68]

des Verfügbarkeitsverhaltens kommen wird, oder ob die Schwankungen von Dauer sein werden.

Bereits in Abbildung 5.8 wird deutlich, dass die Tagesausfallzeiten der Elektrohängebahn nach ca. 5 Wochen deutlich zurück gehen. In Abbildung 5.14 wird der zeitliche Verlauf des gleitenden Durchschnitts der vergangenen 7 Tagesverfügbarkeitswerte und der dazugehörigen Standardabweichung dargestellt. Der Verlauf der Standardabweichung zeigt ebenfalls, dass nach ca. 5 Wochen eine deutliche Verringerung der Verfügbarkeitschwankungen eintritt. Anschließend sinkt die Standardabweichung kontinuierlich weiter, bis diese sich nach knapp 3 Monaten auf einem sehr niedrigen Niveau stabilisiert.

Prinzipiell scheint es möglich zu sein, wie bei der Elektrohängebahn, innerhalb von drei Monaten die Verfügbarkeit auf ein stabiles Niveau zu heben. Die Beispiele vom Verteilzentrum und den Regalbediengeräten zeigen aber, dass nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden kann.

### 5.3.3 Vergleich Testergebnis und nachfolgende Verfügbarkeitsentwicklung

Da nur von der Elektrohängebahn Informationen zum Verfügbarkeitstest im Rahmen der Abnahme vorliegen, kann nur über diese Anlage eine Aussage getroffen werden. Die Anforderung an die Gesamtanlage war 98 % Gesamtverfügbarkeit (vgl. Tabelle 4.2.1, S. 41), die mit durchschnittlich 99,84 % im Testzeitraum (vgl. Tabelle 4.3, S. 44) eindeutig erfüllt wurde. Im Vergleich mit den vorliegenden Verfügbarkeitswerten der sich an den Test anschließenden 153 Tage zeigt sich, dass der Testwert zwar etwas höher liegt als der Mittelwert der Betriebswerte (99,40 %), aber die Grundaussage „Anforderung erfüllt“ durchaus zutreffend ist, vgl. Abbildung 5.15. Nur an 8 Tagen wird die Sollmarke nicht

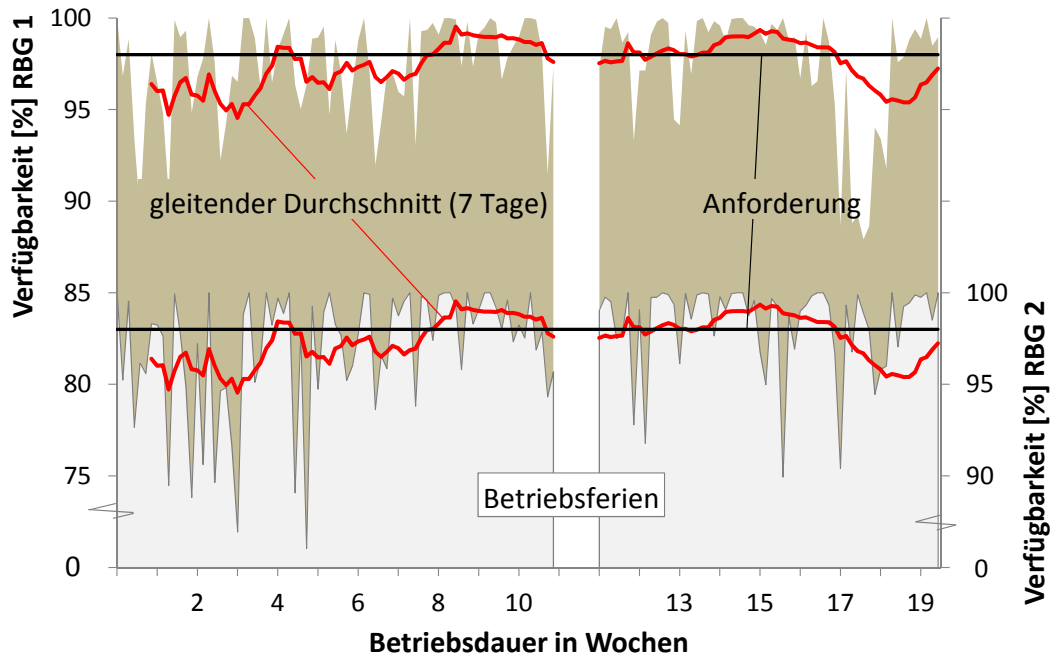


Abbildung 5.13 Verfügbarkeitsentwicklung der Regalbediengeräte

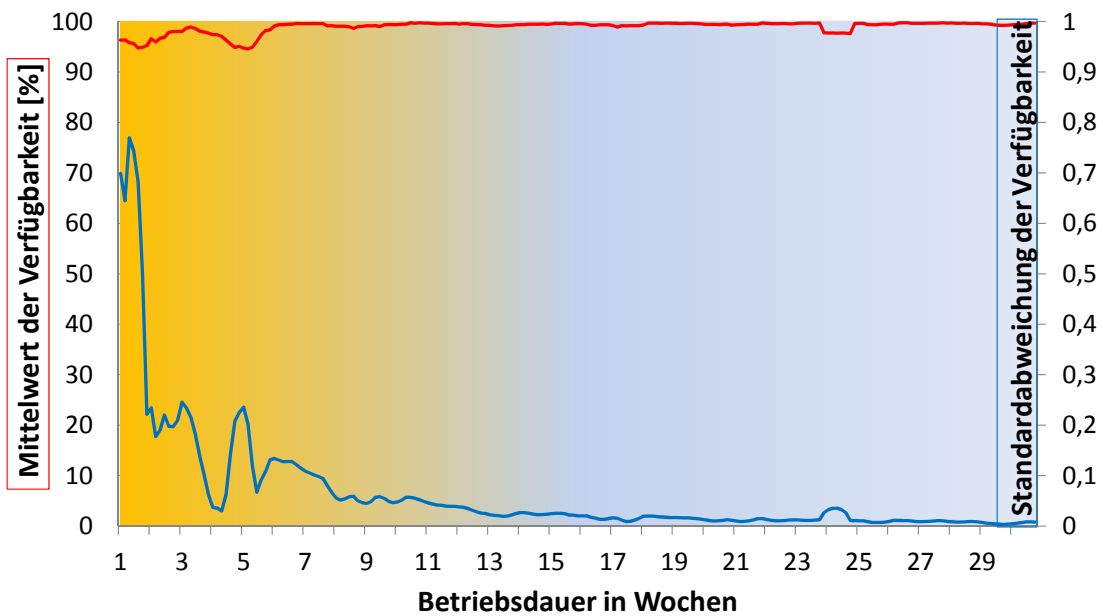


Abbildung 5.14 Gleitender Mittelwert und Standardabweichung der Anlagenverfügbarkeit pro Tag der Elektrohängebahn (7 Tage)

erreicht, vgl. Abschnitt 5.3.5.

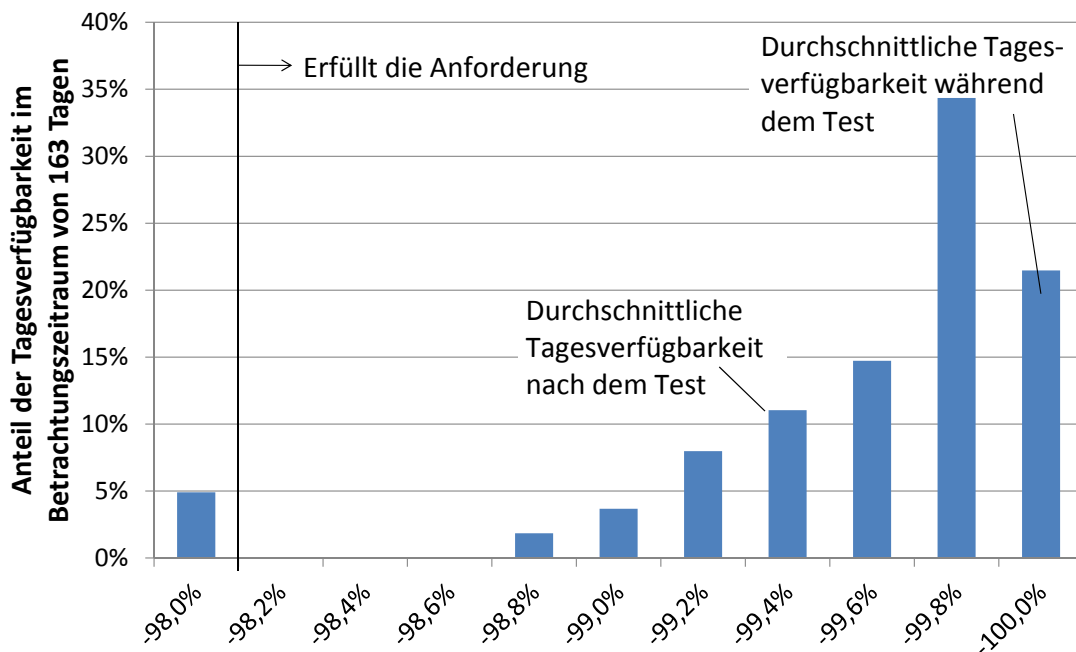


Abbildung 5.15 Histogramm der Tagesverfügbarkeitswerte nach dem Test

Die ursprünglich geforderte Elementverfügbarkeit von 99,5 % wurde im Test nicht nachgeprüft, vgl. Kapitel 4.2.1. Diese Forderung wäre im Betrachtungszeitraum der ersten 7 Monate nur an einem einzigen Tag erfüllt gewesen: Am 3. Dezember 2008 hatten alle Elemente eine Verfügbarkeit von mindestens 99,5 %<sup>35</sup>. Wahrscheinlich sollte mit dieser Forderung der Anspruch an qualitativ hochwertige und zuverlässige Komponenten unterstrichen werden, vgl. das erwähnte Sicherheitsbedürfnis des Anwenders, Kapitel 1, S. 1.

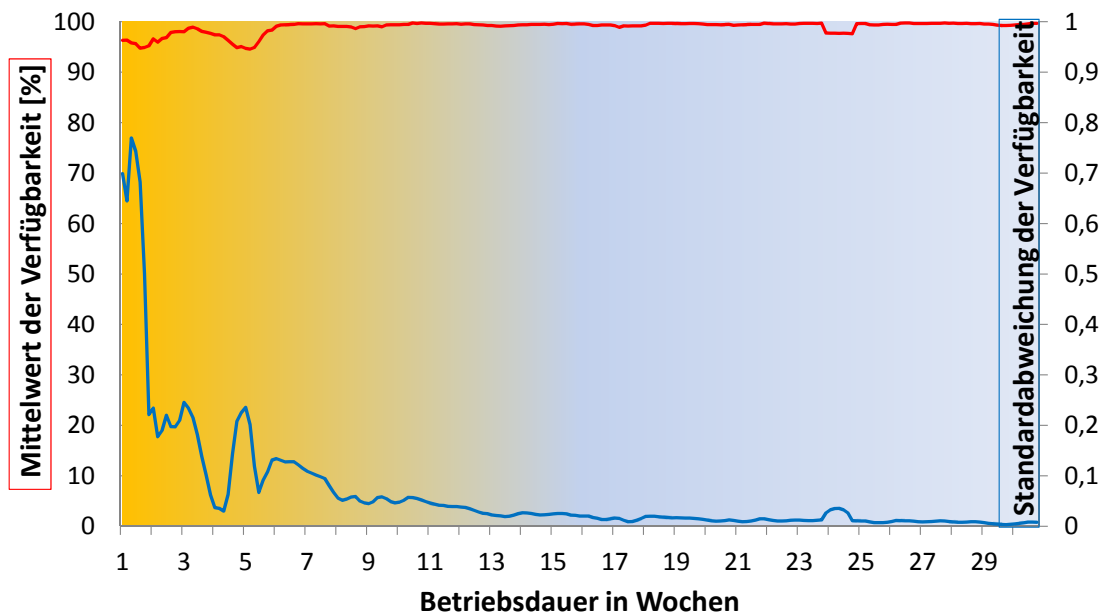
### 5.3.4 Entwicklung der Verfügbarkeit nach dem Abnahmetest

Wie eben dargestellt, erfüllt die Elektrohängebahn nach dem Verfügbarkeitstest im Wesentlichen dauerhaft die Verfügbarkeitsanforderungen. Trotzdem stellt sich die Frage, ob es hier ebenfalls einen zeitlichen Verlauf gibt.

Bei der Verfügbarkeitsentwicklung des Verteilzentrums gibt es einen interessanten Effekt: Hatten die Regelbediengeräte nach 3 Monaten Laufzeit durchschnittlich 7,2 Störungen pro 1000 Spiele, stiegen diese nach 9 Monaten auf durchschnittlich 8,1 Störungen pro 1000 Spiele an, um später wieder auf die 7,2 Störungen zurück zu gehen. Die Störungsdauer lag bei durchschnittlich 16 Minuten, vgl. [Arm81, S. 71f]. Inwieweit der Verfügbarkeitstest mit diesem Effekt in Zusammenhang zu bringen ist, lässt sich aus dem Bericht nicht erschließen.

<sup>35</sup>Neben dem offensichtlichen Widerspruch in der Praxisanwendung, ist es auch rechnerisch nicht sinnvoll, beide Forderungen gleichzeitig zu stellen: Die geforderte Elementenverfügbarkeit von 99,5 % erlaubt jedem Element eine Ausfallzeit von 432 Sekunden (7,2 Minuten) pro Tag. Dieser Grenzfall ergibt allerdings eine Gesamtverfügbarkeit von 92,8 %, die Anforderung an das Gesamtsystem wäre damit erheblich verfehlt.

Die Entwicklung der Verfügbarkeit der Elektrohängebahn lässt sich in 5 Phasen einteilen, die in Abbildung 5.16 gezeigt und in Abbildung 5.17 beschrieben werden.



**Abbildung 5.16** Einteilung der Verfügbarkeitsentwicklung in fünf Phasen

In Tabelle 5.1 werden Detailkennwerte der Phasen, unterteilt nach den Funktionsgruppen, genauer aufgelistet. Dabei zeigt sich, dass sich grundsätzlich die Tendenz feststellen lässt, dass sich die Werte von Phase 1 bis Phase 3 verbessern, um in Phase 4 spürbar abzusacken. In Phase 5 erholen sich die Werte wieder. Dies gilt im Wesentlichen für den Anteil der Elementtage mit Störungen (A), wie für die mittlere Tagesstörungszeit (B) und deren Standardabweichung (C). Zur Berechnung von B und C wurden die Tage ohne Störungen nicht berücksichtigt.

Die Verteilung der Störungsdauer (Abbildung 5.18) zeigt außerdem, dass sich die Phasen 1, 4 und 5 sehr ähneln. Dabei dauert ein Großteil der täglichen Störungszeiten zwischen 10 Sekunden und 2 Minuten. In Phase 2, verschiebt sich diese Häufung auf Störungsdauern von 2 - 30 Minuten, was bei einer gleichzeitigen Senkung der durchschnittlichen Störungsdauer auf 9,2 Minuten die deutliche Stabilisierung des Anlagenverhaltens unterstreicht. In Phase 3, während der Abnahme, sinkt sowohl die Häufung der Störungsdauern auf unter als 10 Sekunden, als auch die durchschnittliche Störungszeit auf 3,7 Minuten.

Betrachtet man die vier Phasen 2-5 nach dem Einschwingvorgang, so lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Das Verfügbarkeitsverhalten der Phasen unterscheidet sich voneinander deutlich; in Phase 2 stabilisiert sich die Anlage, in Phase 3 weist sie Bestwerte auf, wahrscheinlich aufgrund der hohen Konzentration aller Beteiligten während des Verfügbarkeitsnachweises bei Prüfungsatmosphäre. In Phase 4 fällt das Verfügbarkeitsniveau und läuft instabiler, bis sich die Anlage in Phase 5 wieder erholt, ohne allerdings die Spitzenwerte aus Phase 3 ganz zu erreichen. Es ist erkennbar, dass sich zwischen Phase 3 und 4 ein wesentlicher Einflussfaktor auf das Anlagenverhalten ändert.

Die entscheidende Änderung der Randbedingungen zwischen Phase 3 und Phase 4 ist der Abschied des Lieferantenpersonals. Der deutlich erkennbare Knick in der Verfügbarkeitsentwicklung, der bisher vermutet wurde, vgl. Abbildung 5.4, S. 56, aber hier erstmals



Abbildung 5.17 Beschreibung der Phasen

Tabelle 5.1 Detailkennwertentwicklung in den fünf Phasen

Phase	Tage	Arbeitsplätze (21)			Hubwerke (3)			Fahrzeuge (150)		
		A %	B min	C min	A %	B min	C min	A %	B min	C min
1	35	43,0	56,2	144,8	81,9	36,6	88,4	22,1	34,6	135,8
2	15	20,0	27,5	38,9	40,0	18,7	22,2	16,4	5,6	21,8
3	3	17,5	24,9	28,8	44,4	10,0	7,1	27,6	1,6	4,0
4	14	20,1	30,0	27,7	54,8	23,0	23,5	33,6	3,8	7,5
5	149	15,4	32,3	68,0	27,3	15,8	36,5	29,1	4,3	25,9
Gesamt	216	20,5	39,9	99,0	39,0	23,6	58,9	27,4	8,3	55,1

Phase	Tage	Streckenteile (69)			Gehängereiniger (1)			Gesamt (244)		
		A %	B min	C min	A %	B min	C min	A %	B min	C min
1	35	0,7	6,9	2,4	1,0	5,2	0,0	30,1	38,8	135,1
2	15	0,2	10,5	3,8	0,0	0,0	0,0	20,0	9,2	26,1
3	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,9	3,7	11,0
4	14	0,4	22,3	6,1	2,4	0,1	0,0	37,8	6,4	13,4
5	149	0,3	18,0	18,7	0,2	14,3	0,0	32,0	6,5	31,6
Gesamt	216	0,4	14,7	15,4	0,5	6,5	5,8	31,2	11,6	61,2

- A: Anteil der Tage, an denen Störungen auftraten
- B: Mittlere Tagesstörungszeit (ohne Nullstörungstage)
- C: Standardabweichung der Tagesstörungszeit (ohne Nullstörungstage)

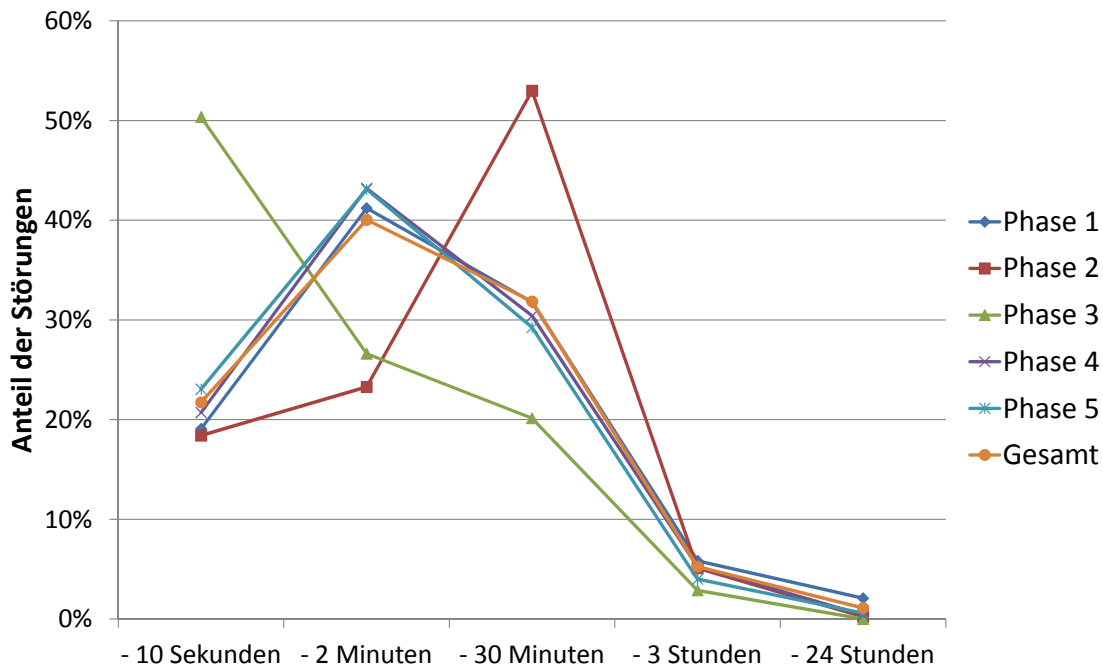


Abbildung 5.18 Verteilung der Störungsdauern

so deutlich gezeigt werden konnte, erklärt sich durch den Verlust des Wissens und der Erfahrung. Dieser Verlust muss erst wieder kompensiert werden, was im Lauf von Phase 4 zu gelingen scheint.

### 5.3.5 Betriebsphase

#### Regelmäßige Unterschreitung der Verfügbarkeitsanforderung

Die Anlagenverfügbarkeit unterschreitet im Untersuchungszeitraum nach dem Verfügbarkeitstest 8 mal die Verfügbarkeitsanforderung von 98 %. Drei dieser Einbrüche fanden in Phase 4, kurz nach dem Abschied des Lieferantenpersonals, statt. Der Vergleich der durchschnittlichen Ausfallzeiten der Elemente zeigt, dass an den Einbruchtagen die Ausfallzeiten der Hubwerke um den Faktor 10 ansteigen, die der Arbeitsplätze um den Faktor 4. Die Ausfallzeiten der Fahrzeuge (Faktor 2,7) und der Streckenabschnitte (Faktor 7) steigen ebenfalls, allerdings fallen diese Zeiten wegen ihrer geringen Absolutwerte kaum ins Gewicht, vgl. Abbildung 5.19. Nähere Hintergründe zu den Ausfällen liegen nicht vor.

#### Abhängigkeit vom Personal

Der beschriebene Rückgang der Verfügbarkeit der Elektrohängebahn in Phase 4 deutet bereits auf einen Zusammenhang zwischen der Qualifikation der Mitarbeiter und der Anlagenverfügbarkeit hin. Es gibt noch weitere Hinweise. So wurden im Verteilzentrum die anfänglichen technischen Durchsatz-Minderleistungen durch verstärkten, außerordentlichen Personaleinsatz ausgeglichen. In Abbildung 5.20 ist der Verlauf der Personaleinsatzkurve in Beziehung zum Leistungsstand der automatisierten Materialflusssysteme gesetzt worden. Aus der Abbildung „geht hervor, daß zeitweise bis zu 100 %



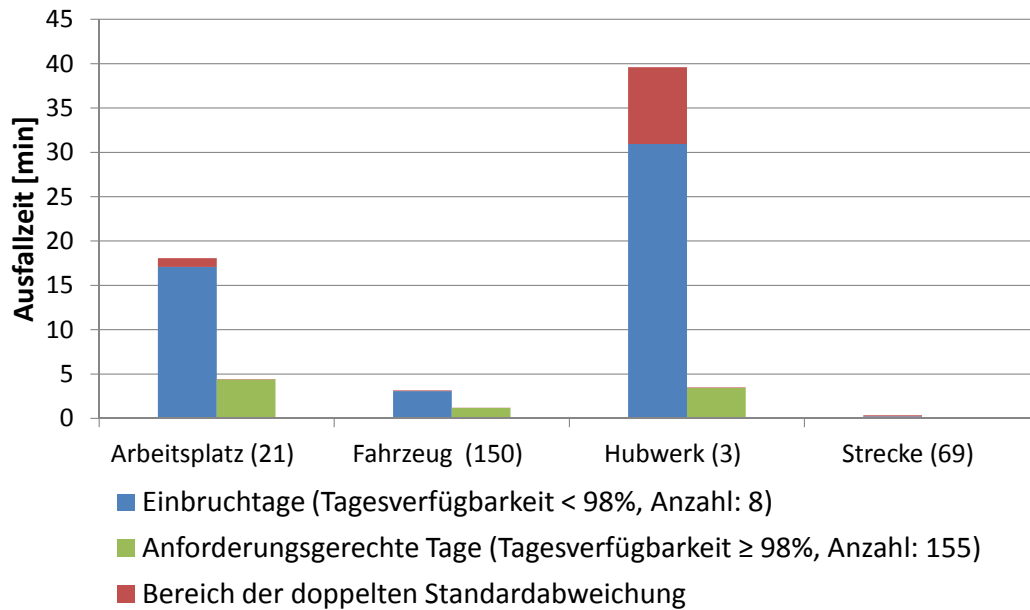


Abbildung 5.19 Vergleich der durchschnittlichen Ausfallzeiten

Aushilfskräfte mehr eingesetzt werden mussten, als es sonst in unserem Geschäft üblich ist.

Hierdurch entstand auch ein ständiger Wechsel der Mitarbeiter an den verschiedensten Arbeitsplätzen. Wenn der erste Mitarbeiter angelernt war, kam nach einiger Zeit ein neuer Mitarbeiter oder Mitarbeiterin an diesen Platz, mit dem/der das Training von vorne begann, weil dieser/diese oft - trotz vorheriger Schulung - erst mal wieder naturgemäß die Fehler seines Vorgängers machte.

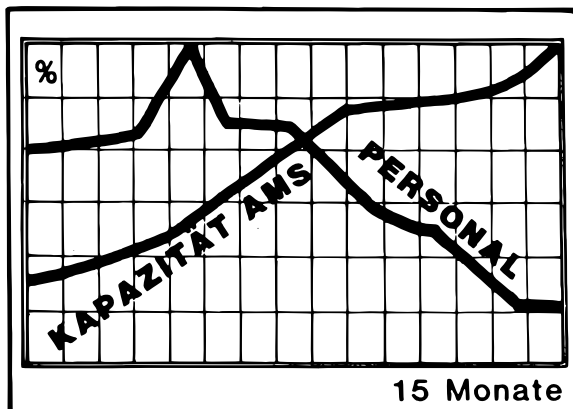


Abbildung 5.20 Vergleich

Personaleinsatz-Durchsatz [Arm81, S. 73]

Verstärkt wird dies durch die Hintergrundinformationen zur Verfügbarkeitsentwicklung der Regalbediengeräte. In Abbildung 5.13, S. 62, ist neben den Schwankungen der Verfügbarkeit auch die übliche 98 % Anforderung dargestellt. Es zeigt sich, dass die Verfügbarkeit nach den Betriebsferien eine Art Wiederanlauf durchläuft, in dem die Verfügbarkeit drei Wochen lang kontinuierlich ansteigt. Die Einbrüche zwischen den Wochen 16 und 19 wurden nach Angaben des Betreibers beeinflusst durch eine längere Schulung direkt an den Regalbediengeräten und Inventurtätigkeiten.

Erst im Laufe der Zeit, als der Bedarf an Aushilfskräften abnahm, trat eine entscheidende Besserung der Arbeitsqualität ein“[Arm81, S. 73]. Gemeinsam mit den Erkenntnissen der Elektrohängebahn deutet dies zum Einen darauf hin, dass nicht nur eine neue Anlage, sondern auch das dazugehörige Bedienpersonal ein Einschwingverhalten aufweist und dass diese Einschwingphasen eher unterschiedlich lange dauern.

## 5.4 Zusammenfassung Kapitel 5

Die Empfehlungen zur Durchführung des Verfügbarkeitstests aus dem Regelwerk wurden auf fünf Annahmen herunter gebrochen. Diese Annahmen wurden mit den Verfügbarkeitsdaten von drei Anlagen verglichen und folgende Schlussfolgerungen gezogen:

1. Die geforderte Verfügbarkeit wird erst nach einer Einfahrphase erreicht.

**Teilweise bestätigt:** Diese Annahme wurde anhand der Ausfallzeiten der Elektrohängebahn und ihrer Einzelelemente untersucht. Es zeigte sich, dass viele der Einzelelemente ein gleichbleibendes Ausfallverhalten ohne erkennbare Einfahrphase vorweisen. Zusammengefasst in Funktionsruppen allerdings ist eine Einschwingphase deutlich erkennbar. **Ergebnis:** Mit einer Einschwingphase ist nicht zwingend zu rechnen, gerade bei Anlagen mit vielen Elementen ist ihr Vorhandensein aber durchaus wahrscheinlich.

2. Innerhalb drei Monaten hat die Anlage die geforderten Kennwerte erreicht.

**Teilweise bestätigt:** Es wurde der Bericht über die Projektdauer des Verteilzentrums ausgewertet und die Entwicklung des gleitenden Durchschnitts der Verfügbarkeit inkl. Standardabweichung der Regalbediengeräte und der Elektrohängebahn untersucht. Es zeigte sich, dass die Einfahrphase der Elektrohängebahn nach knapp drei Monaten beendet war. Bei dem Verteilzentrum dauerte die Phase deutlich länger. Die Daten der Regalbediengeräte (5 Monate) lassen keinen eindeutigen Schluss darüber zu, ob diese ein Einschwingverhalten aufweisen und wann es abgeschlossen ist. **Ergebnis:** Es ist durchaus möglich, dass die Einschwingphase innerhalb von 3 Monaten abgeschlossen sein kann. Dies ist allerdings nicht zwingend voraussetzbar.

3. Nach dem Einschwingen bleibt die Verfügbarkeit konstant hoch.

**Nicht bestätigt:** Es wurde der Bericht über die Entwicklung des Ausfallverhaltens des Verteilzentrums ausgewertet. Die Verfügbarkeitsdaten der Elektrohängebahn wurden in 5 Phasen eingeteilt und miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass bei beiden Anlagen nach dem Erreichen eines stabilen, hohen Niveaus die Verfügbarkeit noch einmal absinkt, wie von Scheid vermutet, vgl. Abbildung 5.4, S. 56. Ursache dafür ist vermutlich der Abschied des Lieferantenpersonals. **Ergebnis:** Nach dem Einschwingen kann die Verfügbarkeit erneut spürbar absinken.

4. Der Messwert der Abnahme ist richtungsweisend für folgende Betriebsphase.

**Bestätigt:** Es wurden die Verfügbarkeitstestergebnisse der Elektrohängebahn mit den Verfügbarkeitswerten der Folgezeit verglichen. Das Testergebnis liegt etwas über dem Durchschnitt der Verfügbarkeit der Folgezeit. Sowohl im Test als auch in der Folgezeit erfüllt die Anlage die Anforderung „Verfügbarkeit > 98 %“. Die Untersuchung widerspricht nicht der Annahme, dass das Testergebnis eine Aussage über die Folgezeit treffen kann.

5. Der Einfluss des Personals kann für den Verfügbarkeitsnachweis ausgeklammert werden.

**Widersprochen:** Es wurde der Bericht über den Personaleinfluss im Verteilzentrum ausgewertet und die Verfügbarkeitsschwankungen der Regalbediengeräte mit Hintergrundinformationen erklärt. **Ergebnis:** Die Qualifikation von Bedien- und Instandhaltungspersonal folgt einer Lernkurve und beeinflusst damit deutlich die Verfügbarkeit von intralogistischen Systemen, vgl. Abbildung 5.20, S. 67. Sie sollte daher dringend im Verfügbarkeitstest berücksichtigt werden.

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse werden alternative Prozeduren für Verfügbarkeitstests nach folgenden Kriterien beurteilt:

1. Berücksichtigen die Prozeduren ein mögliches Einschwingverhalten der Anlage?
2. Berücksichtigen die Prozeduren das erwartete Langzeitverhalten der Anlage?
3. Berücksichtigen die Prozeduren den Einfluss des Personals?

# 6 Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie

Im folgenden Kapitel soll der Stand der Forschung zur Technischen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit aufgezeigt werden.

## 6.1 Vielfältige Definitionen von Zuverlässigkeit

In der begriffsbestimmenden DIN-Norm 40041 und der VDI-Richtlinie 4001 Blatt 2 "Terminologie der Zuverlässigkeit" werden den verschiedenen Definitionen auch die englische Übersetzung der Fachbegriffe zugeordnet<sup>36</sup>. Die deutsch-englischen Begriffspaare werden allerdings nicht einheitlich bzw. eindeutig verwendet. Ausgehend von den Auffälligkeiten dieser beiden Regelwerke wird im folgenden Abschnitt die Zuverlässigkeit zunächst über ihren Sprachgebrauch analysiert.

Die Mehrdeutigkeit des deutschen Begriffs „Zuverlässigkeit“ wird deutlich an der Vielzahl von Übersetzungsmöglichkeiten ins Englische: z. B. „trustworthiness“, Zuverlässigkeit, Vertrauenswürdigkeit, oder „tenacity“, Zuverlässigkeit, Verlässlichkeit. Im technischen Zusammenhang sind die beiden Begriffe „dependability“ und „reliability“ gebräuchlich. Sie werden je nach Anwendungsfall verwendet. In der erneuten Übersetzung dieser beiden Begriffe vom Englischen zurück ins Deutsche werden die verschiedenen Akzente deutlich, vgl. Abbildung 6.1.

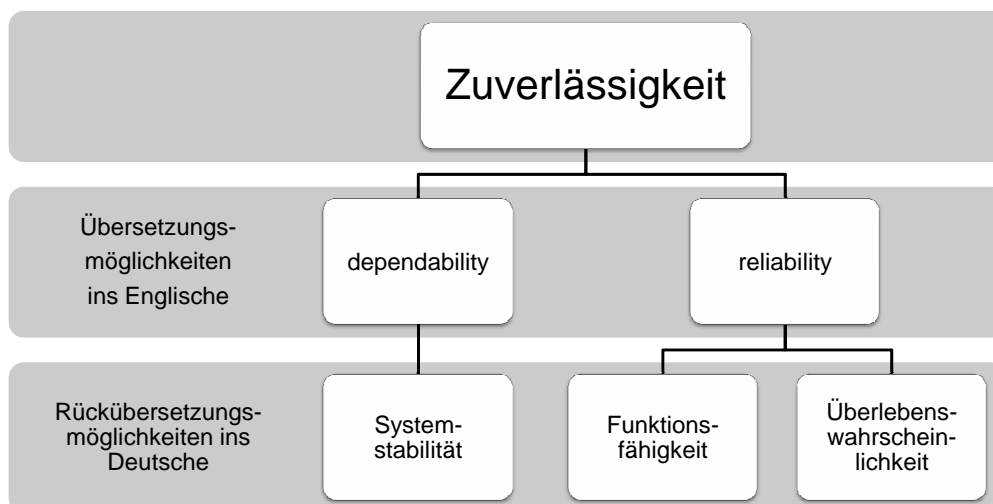


Abbildung 6.1 Zuverlässigkeit - Begriffe

<sup>36</sup>In DIN 40041 findet sich zusätzlich die französische Übersetzung

**Zuverlässigkeit, engl.: dependability**

Der englische Begriff *dependability* kann neben Zuverlässigkeit auch mit Systemstabilität oder Verlässlichkeit übersetzt werden. Daran wird deutlich, dass damit eine charakteristische Eigenschaft eines Gesamtsystems gemeint ist. In den technischen Regeln und Normen wird diese Art der Zuverlässigkeit demnach definiert als „zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft“ [VDI05, S. 59], bzw. als „Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderungen zu erfüllen“ [DIN90, S. 2]. Eine Beschaffenheit wiederum ist in derselben Norm definiert als die „Gesamtheit der Merkmale und Merkmalswerte einer Einheit“.

Besonders deutlich wird der Charakter von Zuverlässigkeit als Überbegriff oder zusammenfassendem Ausdruck, wenn er in Titeln von Lehrbüchern oder Normen verwendet wird: „Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau“ [BL04] oder „DIN 40041:Zuverlässigkeit“ [DIN90].

**Zuverlässigkeit, engl.: reliability**

Im Kapitel 2.3.1, S. 21 wurde „*reliability*“ bereits vorgestellt als Teilnamensgeber des Akronymes RAMS neben der Verfügbarkeit (*Availability*), Instandhaltbarkeit (*Maintainability*) und Sicherheit (*Safety*, im Sinne von Unfallsicherheit, hier nicht: Sicherheit vor unbefugtem Zugriff) im Titel der DIN-Norm 50126 [DIN00]. Die Definition der Norm greift damit ein Schlagwort auf, das durch das seit den 1950er Jahren jährlich in den USA stattfindende „*Reliability and Maintainability Symposium*“ geprägt wurde, welches sich selbst als „RAMS“ abkürzt und als das wichtigste internationale Diskussionsforum für den gesamten Themenkomplex gilt [RAM10]. Die Zuverlässigkeit im Sinne von *reliability* ist demnach ein Attribut einer Einheit, das mit einem konkreten Wert beziffert werden kann. Es gibt wiederum zwei Anwendungsmöglichkeiten des Begriffs, vgl. Abbildung 6.1.

**reliability, dt.: Überlebenswahrscheinlichkeit** ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit eine geforderte Funktion für ein gegebenes Zeitintervall ( $t_1, t_2$ ) erfüllen kann“ [VDI05, S. 50], [DIN90, S. 7]. Auf die Anwendung dieser Zuverlässigkeitsbedeutung wird in Abschnitt 6.2.1 eingegangen.

**reliability, dt.: Funktionsfähigkeit** ist die Fähigkeit bzw. Eignung einer Einheit, eine geforderte Funktion für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen [DIN90, S. 3], [VDI05, S. 20]. Auf eine Anwendung dieser Zuverlässigkeitsbedeutung wird in Abschnitt 6.3.1, S. 78 eingegangen.

## 6.2 Unterteilung in der Anwendung

Ein wichtiges Kriterium für die Wahl des zu verwendenden Zuverlässigkeitsbegriffs ist die Art der betrachteten Einheit. Es gilt zu unterscheiden, ob die Einheit nach einem Ausfall instandgesetzt<sup>37</sup> werden kann oder mit dem Ausfall das Ende ihrer Lebensdauer erreicht

<sup>37</sup>Der in der Literatur noch gebräuchliche Begriff „Reparatur“ wird im Rahmen dieser Arbeit durch den genormten Begriff „Instandsetzung“ ersetzt [DIN03].

hat. Je nach dem stehen verschiedene Kenngrößen zur Beurteilung der Zuverlässigkeit zur Verfügung.

### 6.2.1 Zuverlässigkeitskenngrößen von nichtinstandsetzbaren Einheiten

Die Zuverlässigkeitskenngrößen von Einheiten, die mit dem ersten Ausfall gleichzeitig das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, basiert auf der Lebensdauerzeit  $TTF$ <sup>38</sup>. Ein typisches Bauteil ist die Glühbirne.

Zur Verdeutlichung des Sachverhalts wird eine fiktive Ausfallcharakteristik angenommen und in den aufeinander aufbauenden Abbildungen 6.2 bis 6.5 dargestellt.

#### Ausfalldichte

Zur Ermittlung der Bauteilspezifischen Zuverlässigkeitskenngrößen wird zunächst eine bestimmte Anzahl gleichartiger Einheiten gleichartig belastet und die Lebensdauerdauer  $TTF$  bis zum Ausfall gemessen.

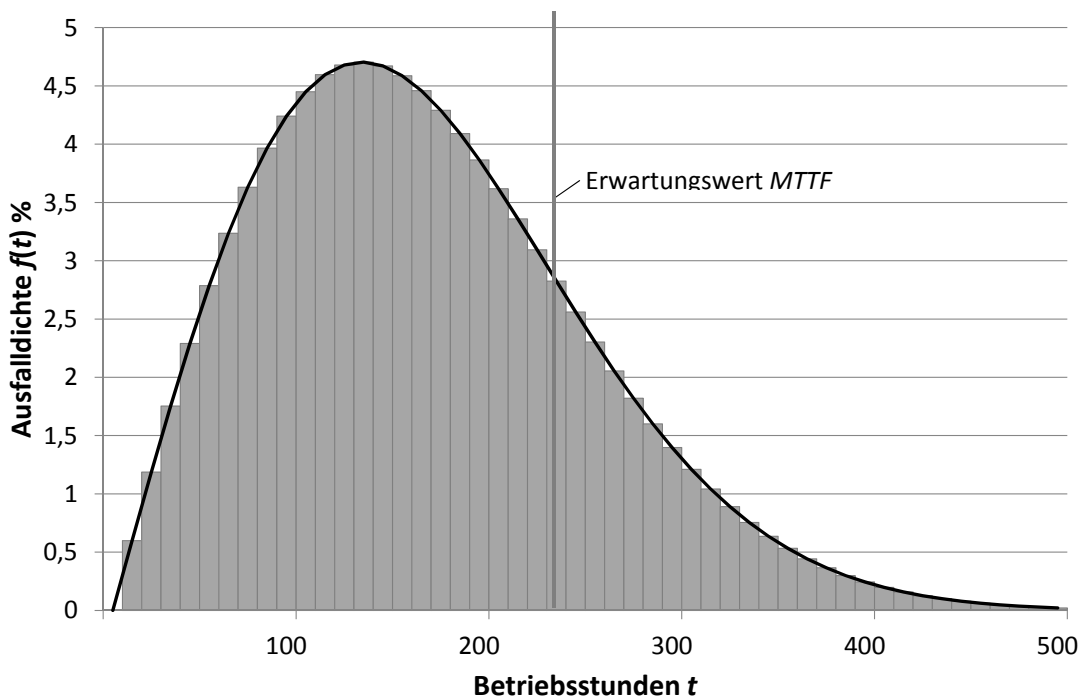


Abbildung 6.2 Histogramm der Ausfallhäufigkeiten und Dichtefunktion  $f(t)$  (Anzahl der Ausfälle  $n \rightarrow \infty$ ), nach [BL04, S. 13]

Die Ausfalldichte  $f(t)$  dieser Bauteilart wird ermittelt, indem anschließend die gemessenen Ausfallzeiten  $TTF$  der Größe nach geordnet in Klassen eingeteilt werden. In Abbildung 6.2 wurden fünfzig Klassen gewählt. Die Anzahl der gemessenen  $TTF$  pro Klasse bestimmt deren Höhe in der Darstellung. Im betrachteten Fall fallen ca. 0,6 % der Bauteilstichprobe nach einer Lebensdauer zwischen 10 und 20 Betriebsstunden aus. In der vierzehnten Klasse, zwischen 120 und 130 Betriebsstunden, ist die Wahrscheinlichkeit

<sup>38</sup>Time To Failure, engl.: Funktionszeit bis zum Ausfall

mit ca. 4,7% am Größten, dass ein Bauteil dieser Art ausfällt. In den darauf folgenden Klassen verringert sich die Wahrscheinlichkeit wieder, es gibt aber auch Bauteile die mit einer sehr langen Lebensdauer in die letzten zehn Klasse fallen, mit einer Lebensdauer von 400 bis 500 Betriebsstunden. Wird die Klassenanzahl vergrößert bis hin zu unendlich vielen Klassen, nähert sich das Histogramm immer stärker dem Graphen der Ausfalldichte  $f(t)$  an, der sich bei einer unendlichen Klassenanzahl bildet.

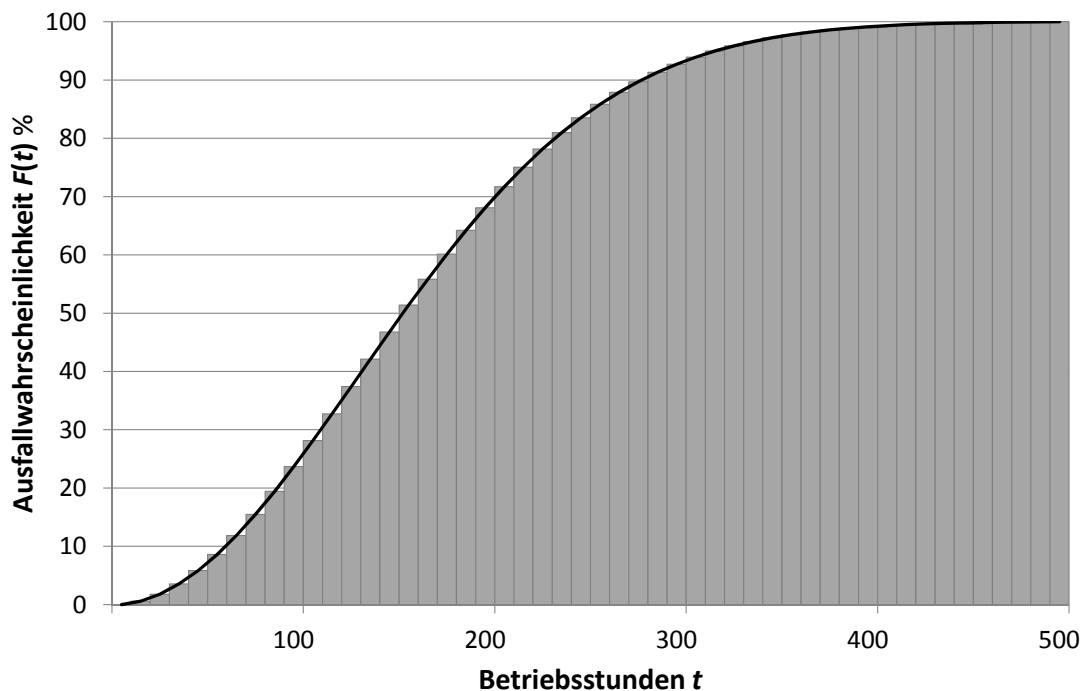
Der Erwartungswert der Ausfalldichte nach Gleichung (6.1) ist der Mittelwert der Lebensdauern  $MTTF$ <sup>39</sup>, bei einer unendlich großen Anzahl an Bauteilen.

$$\begin{aligned} E(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \\ MTTF &= \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt \end{aligned} \quad (6.1)$$

### Ausfallwahrscheinlichkeit

Die Aufsummierung der Ausfalldichte ergibt die Ausfallwahrscheinlichkeit. Diese beschreibt die Summe der Ausfälle als Funktion der Zeit. Diese kann einerseits durch Integrierung der Ausfalldichte berechnet, oder durch Aufsummierung der Klassen bei unendlicher Klassenanzahl ermittelt werden.

$$F(t) = \int f(t) dt \quad (6.2)$$



**Abbildung 6.3** Histogramm der Summenhäufigkeit und Verteilungsfunktion  $F(t)$  (Anzahl der Ausfälle  $n \rightarrow \infty$ ), nach [BL04, S. 17]

Abbildung 6.3 zeigt, dass beim gewählten Beispiel nach ca. 160 Betriebsstunden 50% der Bauteile ausgefallen sind, nach ca. 280 Betriebsstunden 90% und nach

<sup>39</sup>Mean Time To Failure, engl.: Mittlere Funktionszeit bis zum Ausfall

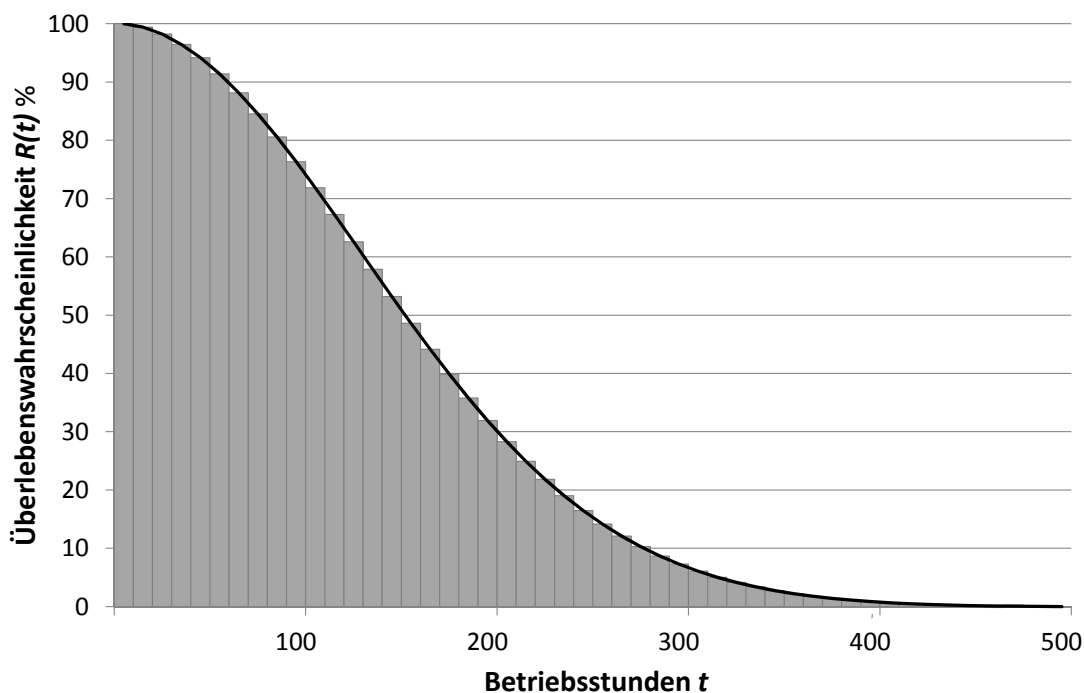
500 Betriebsstunden alle Bauteile. Für ein einzelnes Bauteil bedeutet dies, dass es mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % nach 160 Betriebsstunden ausgefallen sein wird, und mit 90 % Wahrscheinlichkeit nach 280 Betriebsstunden.

### Überlebenswahrscheinlichkeit

In vielen Anwendungsfällen ist die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Betriebsdauer funktionierend zu erreichen interessanter, als die Wahrscheinlichkeit, bis dahin schon ausgefallen zu sein. Diese Wahrscheinlichkeit wird mit Zuverlässigkeit oder Überlebenswahrscheinlichkeit bezeichnet [BL04, S. 20] und ist damit einer der beiden Übersetzungsmöglichkeiten von „reliability“.

Die Wahrscheinlichkeit des Bauteils zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  ausgefallen zu sein und die Wahrscheinlichkeit, diesen Zeitpunkt zu überleben ergänzen sich zu 100 %, vgl. Gleichung (6.3):

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (6.3)$$



**Abbildung 6.4** Histogramm der Überlebenshäufigkeit und die Funktion der Ausfallwahrscheinlichkeit (Anzahl der Ausfälle  $n \rightarrow \infty$ ), nach [BL04, S. 19]

In Abbildung 6.4 wird deutlich, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit im Wesentlichen eine Spiegelung der Ausfallwahrscheinlichkeit darstellt.

### Ausfallrate

Die Ausfallrate  $\lambda(t)$  ist das Verhältnis von Ausfällen (zum Zeitpunkt  $t$  bzw. in Klasse  $i$ ) zur Summe der noch intakten Einheiten (zum Zeitpunkt  $t$  bzw. in Klasse  $i$ ) [BL04, S. 22]. Sie



wird umso größer, je mehr Einheiten in einem betrachteten Zeitabschnitt ausfallen bzw. je weniger Einheiten diesen Zeitabschnitt überleben.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6.4)$$

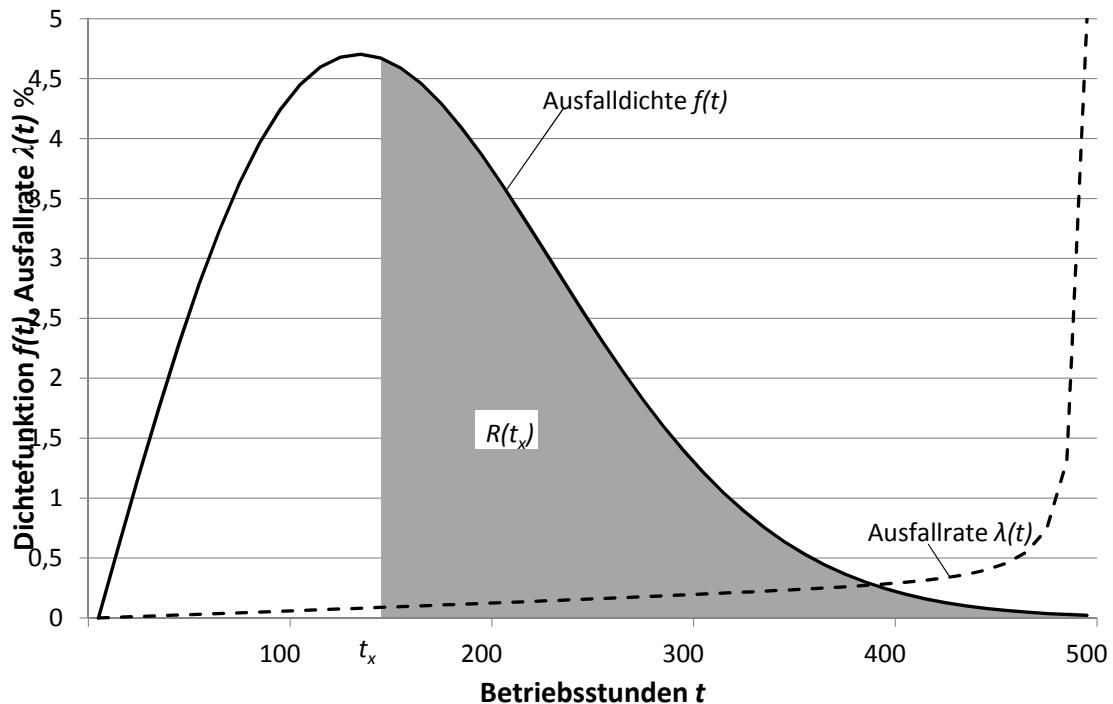


Abbildung 6.5 Ausfallrate  $\lambda(t)$  aus Dichtefunktion  $f(t)$  und Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$ , nach [BL04, S. 23]

Ändert sich die Ausfallrate nicht über die maximal mögliche Lebensdauer, gilt Gleichung (6.5):

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}, \text{ wenn } \lambda(t) = \text{const.} \quad (6.5)$$

In Abbildung 6.5 ist der Graph der Ausfalldichte und die Überlebenswahrscheinlichkeit als darunterliegende Fläche dargestellt. Im betrachteten Beispiel steigt sie linear über die Zeit an. In diesem Fall ist die Anwendung von Gleichung 6.5 nicht zulässig.

## 6.2.2 Zuverlässigkeitskenngrößen von instandsetzbaren Systemen

Wesentliches Merkmal von instandsetzbaren Systemen ist, dass sich Funktionszeiten und Stillstandszeiten abwechseln. Ein Bauteil hat nicht eine Lebensdauer, wie bei den nichtinstandsetzbaren Systemen, sondern viele Funktionszeiten, die aber ebenfalls mit  $TTF$ <sup>40</sup> bezeichnet werden. Für manche Fragestellungen wird die erste Funktionszeit  $TTFF$ <sup>41</sup> noch gesondert betrachtet, ansonsten kann dieser Wert auch als erste Stillstandszeit  $TTF$

<sup>40</sup>Time To Failure, engl.: Funktionszeit zwischen zwei Ausfällen bei instandsetzbaren Systemen

<sup>41</sup>Time To First Failure, engl.: Lebensdauer bis zum ersten Ausfall

des Elementes betrachtet werden. Analog zu dem Vorgehen bei der Ermittlung der Lebensdauerverteilung bei nichtinstandsetzbaren Systemen kann aus der Gesamtsumme der gemessenen  $TTF$  eines oder mehrerer gleichartiger Bauteile die Funktionsdauerdichte und der Erwartungswert  $MTTF$ <sup>42</sup> ermittelt werden<sup>43</sup>.

Die auftretenden Stillstandszeiten zwischen den Funktionszeiten sind ein Maß für die Instandhaltbarkeit.

### Instandhaltbarkeit

Die Instandhaltbarkeit ist die „Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung für die Instandhaltung bei festgelegten Mitteln und Verfahren“ [DIN90, S. 8] oder konkreter, die „Fähigkeit einer Einheit, unter gegebenen Anwendungsbedingungen in einem Zustand erhalten bzw. in ihn zurückversetzt werden zu können, indem sie eine geforderte Funktion erfüllen kann, wobei vorausgesetzt wird, dass die Instandhaltung unter den gegebenen Bedingungen mit den vorgeschriebenen Verfahren und Hilfsmitteln durchgeführt wird“ [VDI05, S. 24]. Zur Beschreibung der Instandhaltungszeiten dient der Kennwert  $TTM$ <sup>44</sup>. Nach [DIN03] werden Maßnahmen der Instandhaltbarkeit aufgeteilt in die Bereiche „Wartung“, „Inspektion“, „Verbesserung“ und „Instandsetzung“. Während die ersten drei Bereiche vorausschauende, präventive Maßnahmen darstellen, können Instandsetzungsmaßnahmen sowohl geplant als auch ungeplant stattfinden: Geplante Instandsetzung ist beispielsweise die Ersetzung von Einzelteile nach einer definierten Betriebstundenzahl. Ungeplante Instandsetzungsmaßnahmen werden dann nötig, wenn unvorhergesehene Stillstände auftreten. Alle geplanten Instandhaltungsmaßnahmen werden zusammengefasst mit dem Kennwert  $TTPM$ <sup>45</sup>. Ungeplante Instandsetzungszeiten werden mit dem Kennwert  $TTR$ <sup>46</sup> beschrieben<sup>47</sup>. Je kleiner  $TTR$ , desto besser ist das System instandzusetzen. Wiederum analog zu dem Vorgehen bei der Ermittlung der Lebensdauerverteilung bei nichtinstandsetzbaren Systemen bzw. den Funktionszeiten bei instandsetzbaren Systemen können aus den ermittelten Ausfallzeiten  $TTR$  eines oder mehrerer gleichartiger Bauteile die Instandsetzungsdichte und der Erwartungswert  $MTTR$ <sup>48</sup> ermittelt werden.

In Tabelle 6.1 werden die Kennzahlen von nichtinstandsetzbaren und instandsetzbaren Systemen zur Verdeutlichung gegenübergestellt.

Sowohl die Charakteristik der Funktionszeiten als auch die der Ausfallzeiten haben Einfluss auf die Verfügbarkeit eines instandsetzbaren Systems.

### Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit ist definiert als „Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls eine geforderte Funktion unter gegebener

---

<sup>42</sup>Mean Time To Failure, engl.: Mittlere Funktionszeit zwischen zwei Ausfällen

<sup>43</sup>In der Intra-logistik ist statt dessen der Kennwert  $MTBF$  gebräuchlich, vgl. Kapitel 2.2.2, insbesondere Gleichung (2.2). Auf diesen Unterschied wird in Kapitel 6.3.3 genauer eingegangen.

<sup>44</sup>Time To Maintenance, engl.: Instandhaltungsdauer

<sup>45</sup>Time To Preventive Maintenance, engl.: Präventive Instandhaltungsdauer

<sup>46</sup>Time To Repair, engl.: Ausfallzeit

<sup>47</sup>Präventive Instandhaltungsmaßnahmen spielen für die Verfügbarkeitstest im Rahmen der Abnahme keine Rolle, daher wird auf diese Maßnahmen im Folgenden nicht mehr eingegangen.

<sup>48</sup>Mean Time To Repair, engl.: Mittlere Ausfallzeit

**Tabelle 6.1** Vergleich nichtinstandsetzbare Systeme / instandsetzbare Systeme

	nichtinstandzu- setzende Systeme	instandsetzbare Systeme	
Datengrundlage	viele gleich- artige Bauteile	eines oder mehrere gleichartige Bauteile	
Protokollierte Zeiten	Lebensdauer bis zum Ausfall	Ausfallzeiten	Zeitabstände zwischen den Ausfällen
Messwert	$TTF$	$TTR$	$TTF$
charakteristischer Kennwert	$MTTF$	$MTTR$	$MTTF$

nen Bedingungen erfüllen zu können, vorausgesetzt, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind“ [VDI05, S. 52].

Diese Definition beinhaltet eine Fallunterscheidung in der Zeitbetrachtung, die bei [BL04, S. 355ff] und [Bir07, S. 170ff] in der Unterteilung der Verfügbarkeit erklärt wird: Wird die Verfügbarkeit zu einem gegebenen Zeitpunkt betrachtet, so handelt es sich um die Punktverfügbarkeit, und analog dazu um die Intervallverfügbarkeit bei der Betrachtung eines gegebenen Intervalls.

Für sehr große Zeitintervalle geht die Intervallverfügbarkeit in die Dauerverfügbarkeit  $A_D$  über und bezeichnet einen Zustand in dem die Punktverfügbarkeit zu jedem beliebigem Messzeitpunkt der Dauerverfügbarkeit entspricht. Diese berechnet sich nach bei [BL04, S. 356] nach Gleichung (6.6):

$$A_D = \frac{MTTF}{MTTF + \bar{M}} \quad (6.6)$$

$MTTF$  steht dabei für die mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen.  $\bar{M}$  steht für die mittlere Stillstandszeit und kann unterschiedliche Ausprägungen annehmen, je nachdem, welche Zeiten man betrachtet oder im Gegenteil von der Betrachtung ausschließt. In [VDI86a, S. 7] werden vier verschiedene Ergebnisse aufgeführt und von [Die99, S. 8] in Abbildung 6.6 dargestellt. Betrachtet man bei der inneren Dauerverfügbarkeit rein technische Ausfälle und außerplanmäßige Instandsetzungen ist  $\bar{M} = MTTR$  und Gleichung (6.6) wird zu Gleichung (6.7) der inneren Dauerverfügbarkeit  $A_D^{(i)}$ :

$$A_D^{(i)} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (6.7)$$

Während der Verfügbarkeitstests im Rahmen der Abnahme von intralogistischen Anlagen wird demnach die innere Dauerverfügbarkeit berechnet. Dabei wird angenommen, dass zum Testzeitpunkt die Anlage stabil läuft und den Zustand der Dauerverfügbarkeit erreicht hat. Außerdem werden Stillstandszeiten nicht berücksichtigt, die auf Bedienfehler des Betreiberpersonals zurückzuführen sind. Der Zuverlässigkeit wird bei instandsetzbaren Systemen als Überbegriff gemäß der Definition für „dependability“ verstanden.

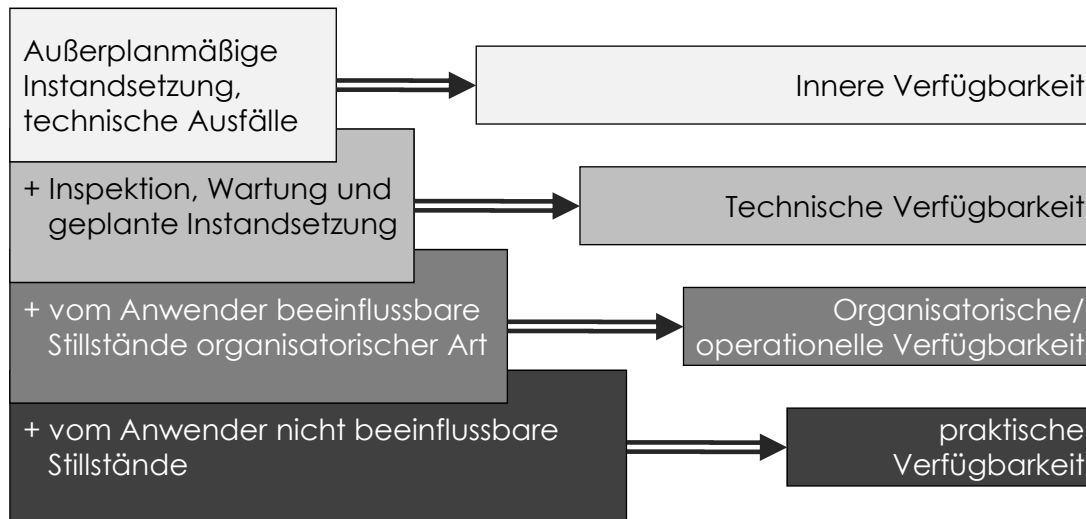


Abbildung 6.6 Verfügbarkeitskenngrößen nach [VDI86a],  
in Anlehnung an [Die99, S. 8]

## 6.3 Widersprüche bei Anwendung in der Intralogistik

Eine intralogistische Anlage ist in ihrer Gesamtheit ein instandsetzbares System, für das bei den heute durchgeführten Verfügbarkeits-tests im Rahmen der Abnahme die innere Dauerverfügbarkeit ermittelt werden soll. Die Kennwerte für nichtinstandsetzbare Einheiten finden hier keine Anwendung. Diese Einordnung findet in der Literatur allerdings häufig nicht statt, was an den folgenden Beispielen verdeutlicht wird.

### 6.3.1 Berechnung der Zuverlässigkeit

Traditionell wurden in der Intralogistik die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit als zwei getrennte Attribute betrachtet: Die Zuverlässigkeit gibt Auskunft über die Störanfälligkeit des Systems und berechnet sich nach Gleichung (3.1) aus der Anzahl der richtigen bzw. störungsfreien Funktionserfüllungen  $n_r$  und der Anzahl der falschen bzw. gestörten Funktionserfüllungen  $n_f$  (vgl. Kapitel 3.1, S. 26 sowie [FEM89, S. 2], [VDI83, S. 2]). Sie entspricht dabei im Wesentlichen der genannten Definition für Funktionsfähigkeit.

Die Verfügbarkeit dagegen ist als Maß für die nutzbare Betriebszeit einer Anlage ein davon zunächst unabhängiges Merkmal der Anlage und berechnet sich aus dem Verhältnis von nutzbarer Betriebszeit zu Gesamtbetriebszeit (vgl. Kapitel 2.2.2, S. 15, v.a. Gleichung (2.1) und (2.2)).

Dagegen ist auch nichts einzuwenden. Allerdings wird in einem Teil der Literatur die Zuverlässigkeit nicht als Funktionsfähigkeit eingeführt, sondern aus der Überlebenswahrscheinlichkeit hergeleitet: So heißt es in [AFI<sup>+</sup>08, S. 865] nach der Darstellung der Überlebenswahrscheinlichkeit, „für die Anwendung in der Intralogistik würde eine zweckmäßige Definition gewählt“, die sich dann als Funktionsfähigkeit, vgl. S. 71, herausstellt.

Bei [VB01] wird Gleichung (3.1) als ereignisbezogener Ansatz zur Zuverlässigkeitsbestimmung eingeführt, der „ergänzend“ nach den Kenngrößen nichtinstandsetzbarer Systeme genannt wird, ohne darauf einzugehen, dass diese Gleichung nur für instandsetz-

bare Systeme angewandt werden kann und sich außerdem von der Zuverlässigkeit im Sinne der Überlebenswahrscheinlichkeit grundlegend unterscheidet.

Wie in Kapitel 3.1, S. 26ff bereits dargelegt, ist die Problematik der verschiedenen Zuverlässigkeitsdefinitionen in der Intralogistik allerdings nicht völlig unbekannt: So wurde in der Neuauflage der Richtlinie 3581 vollständig auf den Begriff der Zuverlässigkeit verzichtet, um Verwechslungen zwischen dem Überbegriff „Zuverlässigkeit“ und dem Attribut „Zuverlässigkeit“ zu vermeiden, vgl. [Mai10c, S. 73].

### 6.3.2 Badewannenkurve

Das in Kapitel 5.3.1 vorgestellte Einschwingverhalten wird gerne mit der sogenannten Badewannenkurve erklärt, z. B. in [VB01, S. 47]. Die Badewannenkurve war lange Zeit das vorherrschende Erklärungsmodell der Entwicklung der Ausfallrate über die Zeit. Obwohl bereits Mitte der 1970er herausgefunden wurde, dass die Badewannenkurve nur eines - und eher selten zutreffendes - von sechs verschiedenen Modellen ist [Mou97, S. 4 & S. 12ff], dominiert sie noch immer die Erklärungen des Ausfallverhaltens.

Abgesehen von der überproportional häufigen Erwähnung im Vergleich zur praktischen Relevanz, ist die Ausfallrate eine Kenngröße für nichtinstandsetzbare Systeme, wie in Abschnitt 6.2.1 dargestellt. Soll für instandsetzbare Systeme eine Ausfallrate berechnet werden, werden wiederum eine große Anzahl gleichartiger Systeme benötigt, deren Zeiten bis zum ersten Ausfall oder die Zeiten zwischen zwei Ausfällen betrachtet werden. Für ein einziges System kann keine Ausfallrate berechnet werden.

Dargestellt in Abbildung 6.7 weist die Badewannenkurve drei Phasen auf: In der Phase der Frühausfälle ist damit zu rechnen, dass viele Exemplare der betrachteten Einheiten ausfallen. Von den Einheiten, die diese Phase „überlebt“ haben, fallen in der zweiten Phase der Zufallsausfälle nur wenige aus. In der dritten Phase fallen dann aufgrund von Materialermüdung und Verschleiß die verbleibenden Einheiten aus.

Da intralogistische Anlagen mit dem gezeigten Einschwingverhalten auch am Anfang viele Ausfälle haben, die mit der Zeit weniger werden, wird dies gerne mit dem kurzen Hinweis auf „die Badewannenkurve“ erklärt<sup>49</sup>. Eine einzige intralogistische Anlage kann aber per Definition keine Ausfallrate im Sinne der Gleichung 6.4 haben. Daher kann dieser Kennwert und dessen mögliche Form der Badewanne nicht ohne weitere Erklärung mit dem Einschwingverhalten der Anlagen in Verbindung gebracht werden.

### 6.3.3 MTF und MTBF

Bei der Einführung des Kennwerts *MTTF* bei instandsetzbaren Systemen wurde bereits auf die Nähe zum Kennwert *MTBF* hingewiesen. Unübersehbar wird der Zusammenhang bzw. Widerspruch beim Vergleich der Gleichung für die Verfügbarkeit in den Fachbüchern zur Zuverlässigkeit (Gleichung (6.7), S. 77 [BL04, Bir07]) und zur Intralogistik (Gleichung (2.2), S. 17, z. B. [FEM89, VDI04a, AFI<sup>+</sup>08]): In der Zuverlässigkeitstheorie wird mit *MTTF* gerechnet, in der Intralogistik mit *MTBF*.

In der Zuverlässigkeitstheorie ist der Kennwert *MTBF* ebenfalls definiert, als Mittlerer Zeitabstand zwischen zwei Ausfallzeitpunkten, der Zusammenhang der Kennwerte *TBF*,

<sup>49</sup>Z. B.: „Darüber hinaus finden Verfügbarkeitsabnahmen stets zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme statt und liegen somit zu Beginn der ersten Phase der Badewannenkurve.“ [VB01, S. 47]

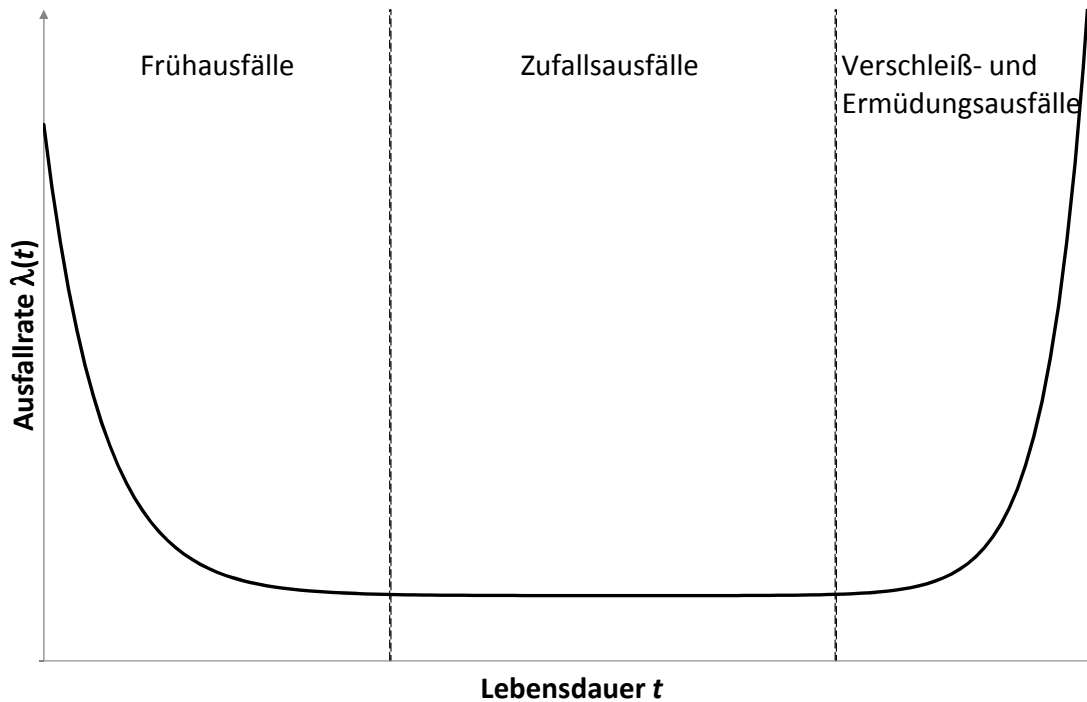


Abbildung 6.7 Die „Badewannenkurve“: Möglicher Verlauf der Ausfallrate von Produkten oder Systemen

$TTF$  und  $TTR$  in der Zuverlässigkeitstheorie wird in Abbildung 6.8 verdeutlicht. Es gilt Gleichung (6.8) [VDI86b, S. 29]:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (6.8)$$

Aus dieser theoretischen Sicht erscheint die in der Intralogistik gebräuchliche Gleichung (2.2) demnach falsch.

In der Intralogistik allerdings wird unter  $MTBF$  das verstanden, was in der Theorie mit  $MTTF$  bezeichnet wird, nämlich die mittlere ausfallfreie Zeit zwischen zwei Ausfällen, vgl. Kapitel 2.2.2, S. 15f. So unterscheidet sich nicht das Verständnis der einzusetzenden Zeiten, sondern die Namensgebung<sup>50</sup>. Die Verwendung des Kennwerts  $MTBF$  wird seit der Formulierung der ersten Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsberechnungen für die Intralogistik von Gudehus [Gud76a, S. 1031] verwendet und hat sich auch international durchgesetzt (vgl. Gleichung 2.15, S. 22).

Ein kurzer Hinweis auf die „in der Literatur unzutreffende Verwendung“ des Kennwerts  $MTBF$  von Bovert [VB01, S. 24] ändert nichts an der Mehrdeutigkeit des Begriffs, die in Abbildung 6.9 verdeutlicht wird.

Bei der zukünftigen Verwendung des Kennwerts  $MTBF$  in der Intralogistik sollte auf die Mehrdeutigkeit hingewiesen und seine Wahl in Abgrenzung von  $MTTF$  begründet werden, wie es auch in DIN 40041 praktiziert wird, vgl. [DIN90, S. 7].

<sup>50</sup>Allerdings wird auch in der Theorie nicht immer exakt unterschieden. So wird in [BL04] bei der Vorstellung der Grundbegriffe der Kennwert  $MTBF$  als Mittlere Lebensdauer bis zum nächsten Ausfall einer instandsetzbaren Einheit bezeichnet [BL04, S. 31], aber im ausführlichen Kapitel zu instandsetzbaren Systemen wird konsequent  $MTTF$  für diesen Zeitbegriff verwendet.

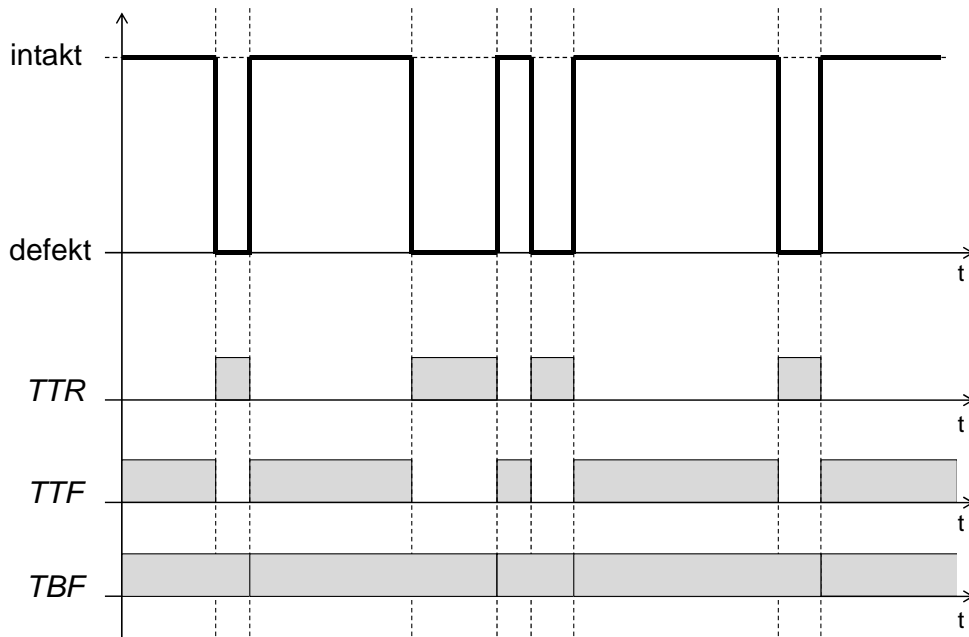


Abbildung 6.8 Zusammenhang  $TTR$ ,  $TTF$  und  $TBF$  in der Zuverlässigkeitstheorie

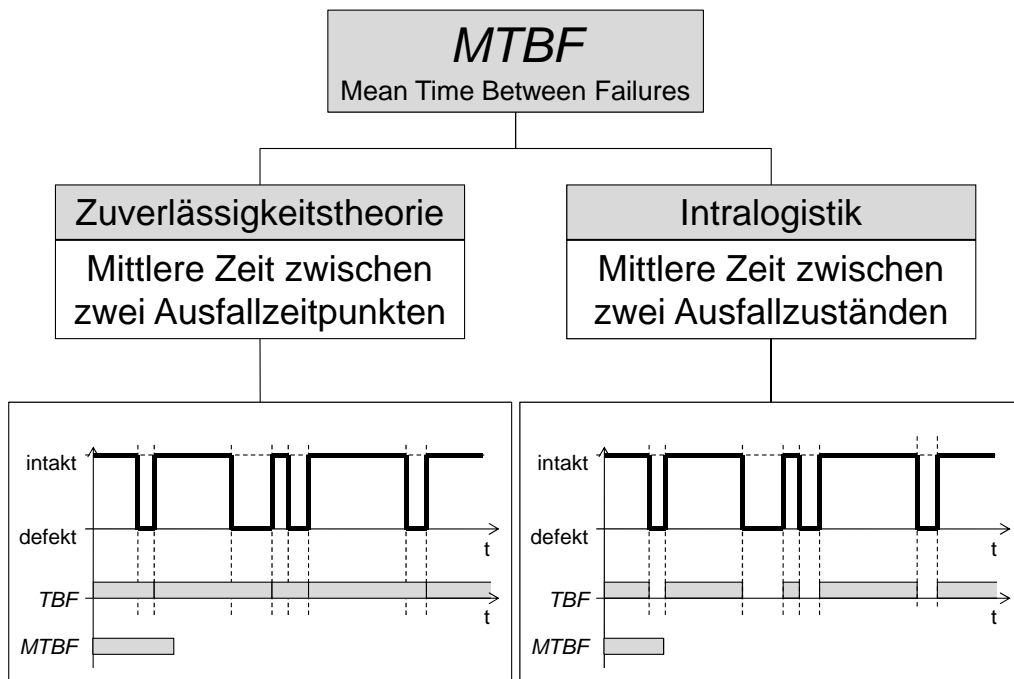


Abbildung 6.9 Unterschiedlicher Inhalt von  $MTBF$

### 6.3.4 Wahl des Verknüpfungsmodells

#### Boolesches Modell

Zur Verknüpfung der einzelnen Elemente eines Intralogistischen Systems, wie beispielsweise Regalbediengeräte, Verfahrwagen oder Förderstrecken wird im Regelwerk das Boolesche Modell vorgeschlagen, vgl. Kapitel 2.2.3, da es durch die Blockschaubilder anschaulich und leicht nachvollziehbar erklärt werden kann. Bereits in Kapitel 3.3.2 wurde allerdings gezeigt, dass einerseits komplexe Systeme die über eine Verknüpfung von seriellen und parallelen Elementen hinausgehen nicht dargestellt werden können und andererseits darauf aufbauenden Gleichungen nur für bestimmte Redundanzfälle gelten, die im Regelfall in der Intralogistik nicht vorliegen.

Aus theoretischer Sicht ist das Modell für diese Anwendung zudem nicht geeignet, da es nur für nichtinstandsetzbare Systeme gilt und die Systemelemente zum einen ein voneinander unabhängiges Ausfallverhalten vorweisen müssen und zum anderen diese nur die beiden Zustände „intakt“ und „defekt“ annehmen können [BL04, S. 78]. All diese Voraussetzungen treffen auf intralogistische Systeme nicht zu.

#### Alternative Modelle

Intralogistische Anlagen benötigen für den Verfügbarkeitstest ein Modell, das folgende Ausprägungen zulässt:

**Strukturen:** Intralogistische Systeme lassen sich häufig nicht allein durch serielle und parallele Verknüpfungsmodelle beschreiben. So verlaufen die weitverzweigten Wege von Gepäckförderanlagen in Kreisverkehren mit vielfältigen Ein- und Ausfahrten sowie Abkürzungen. Sie weisen daher komplexe Strukturen auf.

**Planmäßige Instandhaltungszeiten:** Diese stehen bereits bei der Auslegung der Anlage fest, sodass entsprechende zusätzliche Kapazitäten mit eingeplant werden. Sie sind daher für die Verfügbarkeitsabnahme nicht von Interesse.

**Außerplanmäßige Instandsetzungszeiten:** Im Gegensatz zu planmäßigen Instandhaltungszeiten sind diese wesentlich für die innere Verfügbarkeit und damit für die getestete Verfügbarkeit. Für das Berechnungsmodell ist eine Berücksichtigung von außerplanmäßiger Instandhaltung daher zwingend nötig.

**Zustände der Komponenten:** Für den Abnahmetest sind mindestens drei Zustände zu erfassen: 1. funktionsfähig, 2. gestört ohne Relevanz für den Verfügbarkeitstest<sup>51</sup> und 3. gestört mit Relevanz für den Verfügbarkeitstest. Diese Zustände können bei speziellem Bedarf noch weiter unterteilt sein. Das Berechnungsmodell muss daher mindestens 3 Zustände berücksichtigen.

**Ausfall- und Reparaturverhalten:** Vom Bovert [VB01, S. 59ff] hat das Verhalten von intralogistischen Systemen ausführlich untersucht und dabei die Ergebnisse älterer Untersuchungen [Neu78, S. 103], [Böc78, S. 242], [SR85, S. 88] im Wesentlichen bestätigt: Sowohl Ausfall- als auch das Reparaturverhalten lassen sich durch unimodale, rechtsschiefe Verteilungen darstellen, das Ausfallverhalten wird dabei am häufigsten durch die Weibull-Verteilung angenähert, das Reparaturverhalten

---

<sup>51</sup>Typisches Beispiel: Flatternde Plastikfolie aktiviert den Spaltsensor und das Regalbediengerät geht in den Sicherheitsstop, vgl. Kapitel 4.3.3, S. 50



durch die Lognormal-Verteilung (in 68 % der betrachteten Fälle). Aber für einzelne Datenreihen erweisen sich auch die Frechet-, Exponential- und Gamma-Verteilungsfunktionen als beste Annäherung. Für das Berechnungsmodell sollten daher die gängigen Ausfall- und Reparaturverhalten angenommen werden können.

**Tabelle 6.2** Übersicht und Vergleich der Berechnungsmodelle, nach [BL04, S. 396]

Modell	Literatur	A	B	C	D	E	F
Periodische Instandhaltung	[BL04, S. 360ff]	x	-	-	2	beliebig	-
Markov Modell	[VDI99a], [BL04, S. 365ff]	x	-	x	n	expon.	expon.
Boole-Markov	[BL04, S. 374f]	-	-	x	2	beliebig	-
Gewöhnlicher Erneuerungsprozess	[VDI84], [BL04, S. 375ff]	-	-	x	2	beliebig	-
Alternierender Erneuerungsprozess	[VDI84], [BL04, S. 380ff]	-	-	x	2	beliebig	beliebig
Semi-Markov-Prozess	[BL04, S. 389ff]	x	-	x	n	beliebig	beliebig
Petrinetze	[VDI06]	x	x	x	n	beliebig	beliebig
Systemtransporttheorie	[BL04, S. 391ff]	x	x	x	n	beliebig	beliebig
Intralogistische Anlage (Abnahme)	Kapitel 6.3.4, S. 82	x	-	x	$\geq 3$	beliebig	beliebig

- A: Geeignet für komplexe Strukturen      D: Zustände der Komponenten  
 B: Planmäßige Instandhaltung              E: Ausfallverhalten  
 C: Außerplanmäßige Instandsetzung      F: Instandsetzungsverhalten

In Tabelle 6.2 werden diese Ausprägungen mit den Charakteristika der Berechnungsmodelle verglichen, die für instandsetzbare Systeme grundsätzlich geeignet sind. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, wird auf die genannten Modelle nur so weit eingegangen, wie es für die Überlegungen hinsichtlich der praxisgerechten - und damit auch hinsichtlich des Aufwands vertretbaren - Vorgehensweise sinnvoll erscheint.

Es lässt sich insbesondere feststellen, dass das auch Markov-Modell, welches in der Literatur bereits für die Verfügbarkeitsberechnung von intralogistischen Systemen vorgeschlagen wurde [VB01, FJ08], dafür nicht geeignet ist. Es weist Einschränkungen hinsichtlich der verwendbaren Verteilungen auf und kann planmäßige Instandhaltungen nicht berücksichtigen. Von den untersuchten Modellen bleiben Semi-Markov-Prozesse, die Systemtransporttheorie und Petrinetze.

Neben der grundsätzlichen Eignung des theoretischen Modells ist die praxisgerechte Durchführbarkeit des Verfügbarkeits-tests auf Basis des Modells ein entscheidender Punkt: In Kapitel 4.4, S. 52 wird als wichtiges Kriterium für die Bewertung neuer Prozeduren genannt, dass sich der Aufwand gegenüber den heute üblichen Prozeduren verringert.

Semi-Markov-Prozesse vereinen die günstigen Eigenschaften von Erneuerungs- und Markovprozessen: das Modell ist nicht auf bestimmte Verteilungen begrenzt und in der Lage, mehr als zwei Zustände abzubilden. So können neben „intakt“ und „gestört“ auch Zustände wie „Wartezeit auf Ersatzteile“ oder „blockiert“ auftreten. Der Übergang

von einem Zustand in einen anderen zu einem bestimmten Zeitpunkt erfolgt mit der jeweiligen Semi-Markov-Übergangswahrscheinlichkeit. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit zu einer bestimmten Zeit in einem bestimmtem Zustand ist definiert durch ein System von Integralgleichungen.

Die Systemtransporttheorie basiert auf einer Analogie zur physikalischen Partikeltransporttheorie, mit deren Hilfe komplexe Systeme mit beliebiger Struktur modelliert werden können. Zur Näherungslösung der Transportgleichung, die die Basis der Verfügbarkeitsberechnung darstellt, ist allerdings eine Simulation nötig. Gleiches gilt bei den Petrinetzen, vgl. Kapitel 9.1. Weder die Lösung von Differentialgleichungen noch das zwingend notwendige Erstellen von Simulationsstudien erfüllt das Kriterium der Vereinfachung gegenüber der heutigen Ermittlung von Ausfallzeiten.

### Verschiebung der Systemgrenzen

Die bisher betrachteten Methoden untersuchen zunächst die Verfügbarkeit der Einzelelemente und berechnen darauf aufbauend eine Gesamtverfügbarkeit. Es wurde gezeigt, dass unter dieser Prämisse keine geeignete Methode zur Verfügbarkeitsmessung im Rahmen der Abnahme gefunden wurde, da entweder die notwendigen Voraussetzungen nicht gegeben sind, oder die Methoden für den Praxisgebrauch zu aufwendig sind.

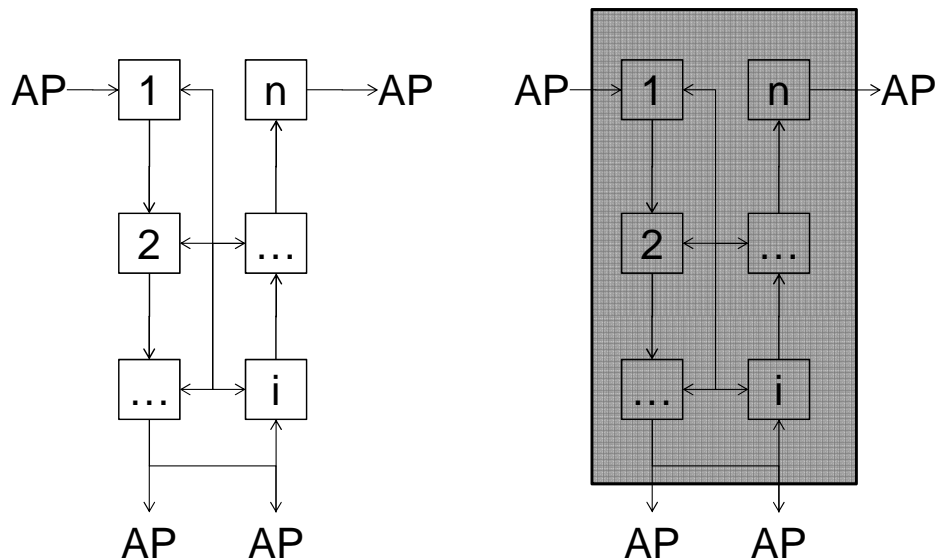


Abbildung 6.10 Verschiebung der Systemgrenzen [Mai09, S. 220]

Eine andere Möglichkeit, die Verfügbarkeit einer Intralogistikanlage zu beurteilen, ist die Veränderung der Systemgrenzen. In Abbildung 6.10 wird dargestellt, wie die Grenzen so gezogen werden, dass die einzelnen Systemelemente ausgeblendet werden. Damit konzentriert sich die Verfügbarkeitsbetrachtung auf die Ein- und Ausgänge des Systems.

Gleichzeitig verändert sich dadurch die Sicht auf die Anlage: Sie wird in dieser Perspektive als Ganzes wahrgenommen, die Systemelemente verlieren an Bedeutung, ihr

Zusammenspiel zur Erreichung des Anlagenzweckes (z. B. termingerechte Bereitstellung von Produkten) wird wichtiger. Für die konkrete Ausgestaltung der Verfügbarkeitsberechnung und des -nachweises ergeben sich damit neue Möglichkeiten, von denen einige im Kapitel 7.2, S. 88 vorgestellt werden.

## 6.4 Zusammenfassung Kapitel 6

Es wurde dargestellt, dass es in der Zuverlässigkeitstheorie und ihrer Anwendung in der Intralogistik Widersprüche gibt, die ihre Ursache in der Mehrdeutigkeit einiger Begriffe und der unzureichenden Abgrenzung von instandsetzbaren und nichtinstandsetzbaren Systemen hat. Die mehrdeutigen Begriffe sind im Folgenden zusammengefasst und übersichtlich dargestellt:

### *Zuverlässigkeit*

- Überbegriff über die gesamte Thematik, Synonym: Systemstabilität
- Maß der Funktionserfüllung, Synonym: Funktionsfähigkeit
- nichtinstandsetzbare Einheiten, Synonym: Überlebenswahrscheinlichkeit

### *MTTF*

- Verwendung bei nichtinstandsetzbaren Einheiten: Mittlere Lebenszeit einer Menge gleichartiger Einheiten
- Verwendung bei instandsetzbaren Einheiten: Mittlere Funktionszeit zwischen zwei Ausfällen einer oder mehrere gleichartiger Einheiten

### *MTBF*

- Definition in der Zuverlässigkeitstheorie: Mittlerer Zeit zwischen zwei Ausfallzeitpunkten
- Definition in der Intralogistik: Mittlere Funktionszeit zwischen zwei Ausfällen

Für die bisher in der Intralogistik verwendeten Verknüpfungsmodelle nach Boole und Markov fehlen die Voraussetzungen zur korrekten Anwendung. Komplexere Modelle, beispielsweise Petrinetze, wiederum sind für die praktische Anwendung nicht geeignet. Eine Möglichkeit zur theoriegerechten Verfügbarkeitsberechnung ist die Verschiebung der Systemgrenzen, sodass die Anlage als Ganzes betrachtet und an ihren Materialflussein- und -ausgängen beurteilt wird.

Alternative Berechnungsmethoden der Anlagenverfügbarkeit werden demnach an folgenden Kriterien gemessen:

1. Werden die verwendeten Kenngrößen eindeutig und im Einklang zur Zuverlässigkeitstheorie definiert?
2. Wird die Anlage als Ganzes betrachtet und anhand der Materialflussein- und -ausgänge beurteilt?

---

# Lösung

## Kapitel 7 - Kapitel 9

### 7 Neue AbnahmeprozEDUREN

Der vertraglich vereinbarte Kennwert "Verfügbarkeit" basiert auf der Annahme, dass hochverfügbare Technik allein notwendige Voraussetzung ist für die Sicherstellung logistischer Prozesse auf der Anlage und damit die termingerechte Bereitstellung der auftragsgemäßen Waren, vgl. Kapitel 1.3.3. Diese Annahme wird durch die gewonnenen Erkenntnisse in Teil 1.4.4 als unzureichend zurück gewiesen.

Statt dessen wird die These vertreten, dass neben der Verwendung zuverlässiger Bauteile deren anforderungsgerechte Auslegung entscheidend ist für die Gewährleistung der geforderten logistischen Prozesse. Daher wird ein Kennwert benötigt, der die intralogistische Anlage als Ganzes und ihre Befähigung beurteilen kann, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Um die Begriffe eindeutig gegeneinander abzugrenzen, wird der bisherige Verfügbarkeitskennwert im Folgenden als „technische Verfügbarkeit“ konkretisiert, weil er rein auf die Verfügbarkeit der technischen Anlagenkomponenten aufbaut, ohne weitere Einflüsse zu berücksichtigen.

#### 7.1 Vorschläge zur Vertragsgestaltung

In Kapitel 3.5 wurde deutlich, dass der zeitliche Abstand zwischen Betriebsstart der Anlage und Verfügbarkeitstest als letztem Bestandteil der Erklärung der Abnahme ein Problem darstellen kann. Die Art des Verfügbarkeitstests spielt dabei keine Rolle. Eine mögliche Abhilfe wäre, die gängige Praxis mehrerer getrennter Projektphasen auszuweiten: Während heute bereits die Planungsphase getrennt von Lieferung und Inbetriebnahme behandelt wird, könnte zukünftig auch die Inbetriebnahme als eigenständige Projektphase mit separaten vertraglichen Vereinbarungen und Rechnungsstellungen definiert werden. Bei dieser Aufsplittung wird die bisherige Abnahme der Gesamtanlage aufgeteilt in die Abnahmen der jeweiligen Phasenziele: Pflichtenheft, inbetriebnahmereife Anlage und stabiles Verfügbarkeitsniveau. Abbildung 7.1 stellt die vorgeschlagene Aufteilung mit zugeordneten Aufgaben und eindeutigem Abschluss dar.

Dabei ist es auch möglich, dass sich die Vertragspartner von Phase zu Phase unterscheiden, sodass für jede Phase entsprechende Experten herangezogen werden können. Eine umfassende Begleitung durch ein kompetentes Projektteam (z. B. aus den Reihen des Betreibers, oder durch Unterstützung erfahrener Dienstleister) ist allerdings sinnvoll.

**Die Planungsphase** ist dabei die Grundlage für alles nachfolgende. Hier müssen die Anforderungen an die neue Anlage und die Randbedingungen, unter denen der Betrieb arbeiten soll, genau analysiert und definiert werden. Diese Daten sind die Grundlage für

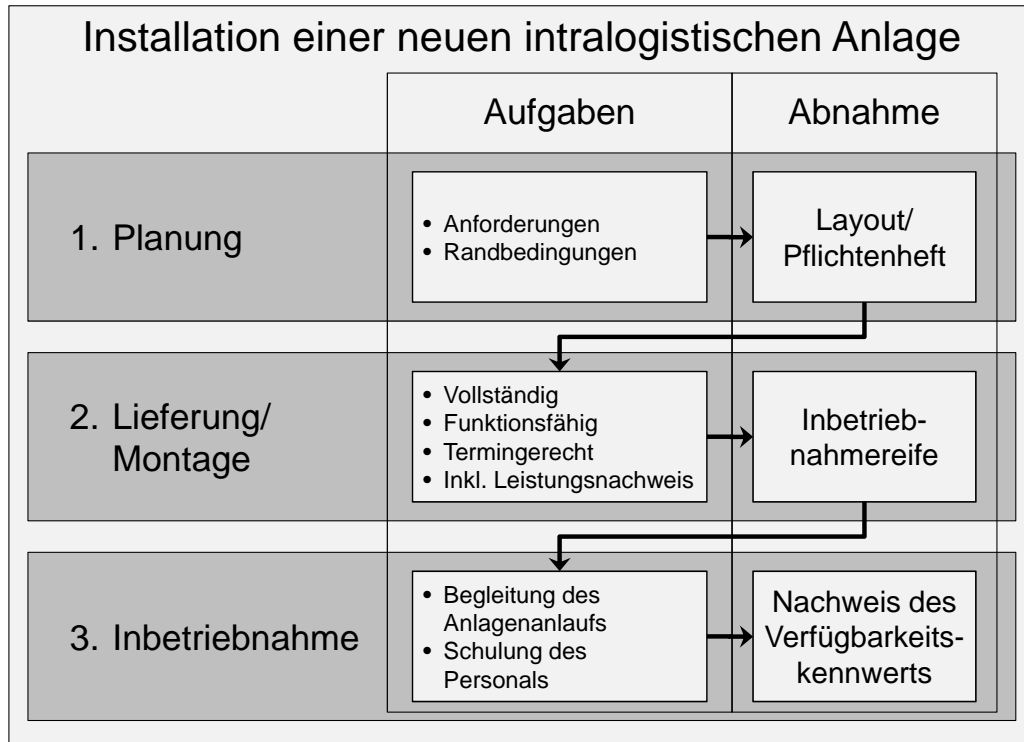


Abbildung 7.1 Projektphasen einer neuen Anlage

die Auslegung der Anlage und sinnvolle Betriebsstrategien (insbesondere die Instandhaltung). Abbildung 7.2 erläutert die Verantwortlichkeiten der Vertragsparteien während der Planungsphase.

Die Planungsphase findet ihren Abschluss in einem gemeinsam vereinbarten Pflichtenheft. Es ist darauf zu achten, Vorgehensweisen zu vereinbaren, für den Fall, dass eventuelle Planungsfehler erst in der Inbetriebnahme deutlich werden.

**In der Liefer- und Montagephase** wird die Anlage gemäß den Planungsunterlagen gefertigt und im Einsatzort installiert. Dabei müssen die üblichen Prozeduren und gesetzlichen Bestimmungen eingehalten werden. Nach den vereinbarten Funktions-, Sicherheits- und Leistungsnachweisen wird die Inbetriebnahmereife erklärt und die Gewährleistungsfrist beginnt.

Mit dem notwendigen Maßnahmen und Planungen zum Produktionsstart beginnt **die Inbetriebnahmephase**. Während der zu erwartenden Einschwingphase (vgl. Kapitel 5.3.1 und 5.3.2) mit schwankender Verfügbarkeit und häufigen Ausfällen wird evtl. zusätzliches Personal benötigt, um mögliche Kapazitätsprobleme aufzufangen und den Betriebsablauf zu gewährleisten. Intensive Begleitung und Schulung des Personals sind Maßnahmen, die heute häufig im Gesamtkonzept untergehen, da das Augenmerk auf die Installation der Technik liegt. Durch die Abgrenzung in einer eigenen Projektphase, evtl. mit neuen, auf Inbetriebnahme spezialisierten Vertragspartnern kann darauf ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Dies wird auch dringend geraten, insbesondere um potentiellen Ängsten und Widerständen zu begegnen. Alle genannten Maßnahmen müssen vom verantwortlichen Projektteam geplant und durchgeführt werden. Nach Ende der Einschwingphase, bei stabilem Anlagenverhalten endet die Inbetriebnahmephase mit erfolgreichem Verfügbarkeitsstest. Da der Fokus bei diesem Vorgehen auf einem stabilen Verfügbarkeitsniveau

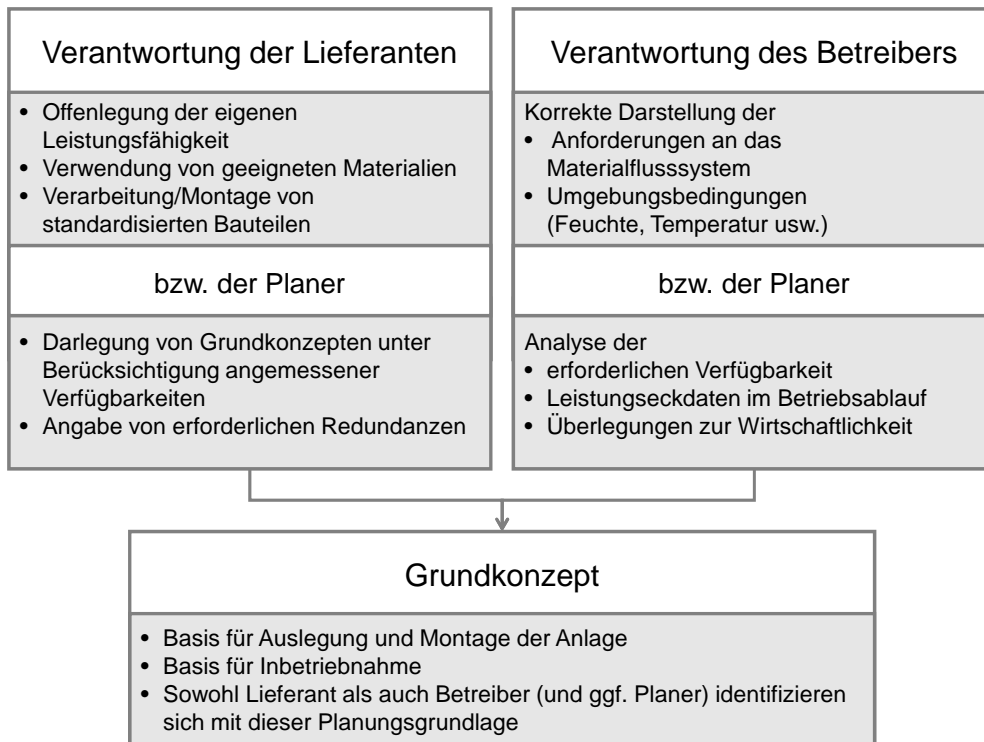


Abbildung 7.2 Verantwortung Anlagenkonzeption, in Anlehnung an [Hül90, S. 161]

und nicht mehr auf einem punktuellen Erreichen der Sollverfügbarkeit während des Testzeitpunkts liegt, wird wahrscheinlich auf die Ausbildung des Betriebspersonals größeren Wert gelegt, so dass der Verfügbarkeitsknick nach der Abnahme, vgl. Kapitel 5.3.4, S. 63, zumindest deutlich abgemildert wird, sofern er nicht ganz ausbleibt.

Während die vertragliche Trennung von Planungsphase und Montagephase bereits praktiziert wird, ist die Abtrennung der Inbetriebnahmephase sicherlich gewöhnungsbedürftig. Sie hat aber den Vorteil, dass der nötige Aufwand für die Inbetriebnahme frühzeitig transparent und sichtbar wird und eine Vermischung von technischer Zuverlässigkeit (abhängig von solider Verarbeitung von hochwertigem Material) und stabilem Anlagenlauf (abhängig von geeigneter Auslegung und qualifiziertem Personal) vermieden wird. Das hier entwickelte Vorgehen wird in Kapitel 8.3, S. 107 am Beispiellager verdeutlicht.

Der Kennwert der technischen Verfügbarkeit ist für einen solchen aufgeteilten Installationsprozess nicht geeignet. Im nächsten Abschnitt werden daher alternative Kennwerte vorgestellt.

## 7.2 Alternative Kennwerte

### 7.2.1 Gesamtanlageneffektivität

Nach den Erkenntnissen aus Kapitel 6 wird ein Kennwert benötigt, der die Anlage als Ganzes betrachtet. Das Instandhaltungskonzept „Total Productive Maintenance“ (TPM) ist ein Konzept zur optimalen Nutzung der Produktionsanlagen [Füg06, S. 12]. Ein wichtiger Kennwert dieses Konzeptes ist der „Overall Equipment Effectiveness“ (OEE), zu deutsch

Gesamtanlageneffektivität (GEA oder GEFF), der sich bereits mit seinem Namen als gesuchten Kennwert anbietet. Nach [KS08, S. 47] spiegelt dieser Kennwert die Effektivität einer Anlage während ihrer Betriebszeit wider. Damit ist er ein Maß für die Wertschöpfung einer Anlage. Sie gilt als das häufigste genutzte Maß in der Instandhaltung [KS08, S. 10]. Die Gesamtanlageneffektivität ist zunächst für Produktionsanlagen entwickelt, ist aber grundsätzlich auch für die Anwendung bei intralogistischen Anlagen übertragbar.

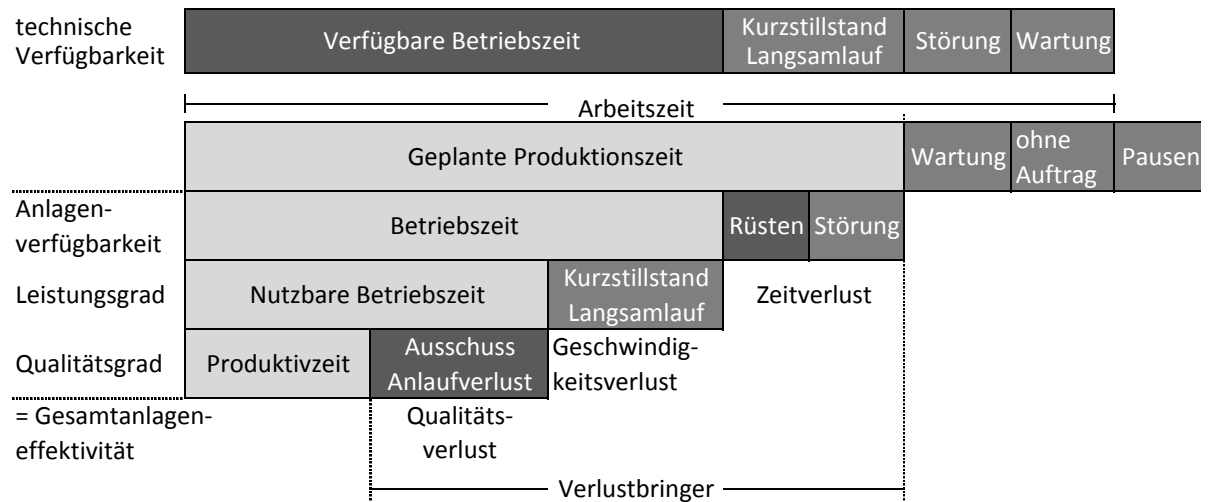


Abbildung 7.3 Gesamtanlageneffektivität und Verfügbarkeit, nach [Erl10, S. 71]

Wie in Abbildung 7.3 dargestellt berücksichtigt der Kennwert nicht nur Anlagenausfälle, sondern auch die Leistung und die Qualität der Anlage, vgl. S. 3. Dabei variieren die genauen Bezeichnungen in der Literatur, so wird der erste Faktor teilweise Verfügbarkeit [Erl10] und teilweise mit Gesamtnutzungsgrad [RZ07] genannt. Regber bietet mit Gleichung (7.1) eine konkrete Berechnungsanleitung:

$$\begin{aligned}
 GEFF &= \frac{TB_{Netto}}{T_{Geplant}} \cdot \frac{TT_{Geplant} \cdot n}{TB_{Netto}} \cdot \frac{n - n_{Ausschuss/Nacharbeit}}{n} \cdot 100\% \\
 &= \frac{TT_{Geplant} \cdot (n - n_{Ausschuss/Nacharbeit})}{T_{Geplant}} \cdot 100\%
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

$TB_{Netto}$	Nettobetriebszeit
$T_{Geplant}$	Geplante Laufzeit
$TT_{Geplant}$	Geplante Taktzeit
$n$	Anzahl gefertigter Teile
$n_{Ausschuss/Nacharbeit}$	Anzahl der nachzuarbeitenden Teile und Ausschussteile

In [KS08, S. 47] wird diese Gleichung ebenfalls zur Berechnung angeboten, wobei allerdings abweichende Formelzeichen verwendet wurden. Auf den Faktor 100 % wurde verzichtet. Beide Varianten von Gleichung (7.1) fallen allerdings bereits bei einer einfachen Plausibilitätsprüfung durch, da ihre Einheit korrekt [Stück·%] bzw. [Stück] ist, was aber jeweils keine sinnvolle Einheit für einen Wirkungsgrad darstellt.

Als alternativer Kennwert zur technischen Verfügbarkeit im Rahmen der Abnahme ist die Gesamtanlageneffektivität nicht geeignet, da diese voll auf der technischen Verfügbarkeit aufbaut und so keines deren Probleme löst. Desweiteren ist der GEFF keine absolute Größe, sondern gibt nur Auskunft darüber, in wie weit die betrachtete Anlage ihr theoretisches Ideal erreicht. Ein Vergleich der GEFF-Werte zweier verschiedener Anlagen

kann daher keine Auskunft darüber geben, welche Anlage besser in der Lage ist eine geforderte Funktion dauerhaft zu erfüllen, vgl. [MK08, S. 249], zumal auch keinerlei Kosten berücksichtigt werden. Für einen ständigen Verbesserungsprozess einer bestehenden Anlage kann die Gesamtanlageneffektivität aber ein sinnvoller Kennwert sein.

### 7.2.2 Anlagennutzungszeit

Unzufrieden mit der geringen Aussagekraft der technischen Verfügbarkeit erarbeiteten die Betreiber, SIEMENS IIA & DT, und der Instandhaltungsdienstleister, DEMATIC, für das Siemens Lieferzentrum in Nürnberg, Abbildung 7.4, einen neuen Kennwert: die Anlagennutzungszeit, im folgenden symbolisiert mit  $T_{ANZ}$ . Dieser Kennwert dient seit Mitte 2006 zur Beurteilung der Funktionsbereitschaft der Anlage und wird von den Beteiligten für seine hohe Aussagekraft geschätzt [Mai10c, S. 75], [SIE06].

Kann durch eine Störung ein Arbeitsplatz (z. B. in der Kommissionierung) nicht mit Material versorgt werden, oder wird er blockiert, da bearbeitetes Material nicht wegtransportiert wird, so ist der Betriebsablauf an diesem Arbeitsplatz gestört.

Im Gegensatz zur technischen Verfügbarkeit werden bei der Anlagennutzungszeit die Ausfallzeiten der Anlagenelemente entsprechend ihren Auswirkungen auf den Betriebsablauf, d. h. auf die Arbeitsplätze gewertet. Die Betreibersicht, vgl. Kapitel 4.2, S. 41, steht damit im Vordergrund der Anlagennutzungszeit. Die Wertung geschieht auf zweierlei Arten:



**Abbildung 7.4** Siemens  
Logistik Zentrum, Nürnberg  
[SIE06]

#### 1. Irrelevante Störzeiten werden ignoriert:

Durch Reservekapazitäten und Puffer können in jeder Anlage Ausfälle bis zu einem gewissen Grad aufgefangen werden, sodass sie keine negativen Auswirkungen auf die Abläufe an den Arbeitsplätzen haben. Alle Anlagenelemente werden bereichsweise geordnet, beispielsweise in die Bereiche „Wareneingang“ oder „Versand“. Anschließend wird in einem ausführlichen Testverfahren für jeden Bereich und jedes dort angesiedelte Anlagenelement die irrelevante Störzeit ermittelt und in der anschließenden Probephase verifiziert. Dabei ist es möglich, dass ein Anlagenelement zu mehreren Bereichen zugeordnet wird und dann für jeden Bereich eine eigene irrelevante Störzeit hat. Diese Zeitwerte liegen im Lieferzentrum Nürnberg zwischen 2 und 30 Minuten, im Durchschnitt sind es 10 Minuten.

Für die Berechnung der Anlagennutzungszeit werden alle Störungszeiten ignoriert, die kürzer sind als die zugehörige irrelevante Störzeit. Von längeren Störzeiten wird die irrelevante Störzeit abgezogen. Auf diese Weise werden alle Reservekapazitäten und Puffer ohne komplizierte Berechnungen berücksichtigt.



## 2. Gewichtung durch die betroffenen Arbeitsplätze:

Sind von der resultierenden relevanten Störzeit mehrere Arbeitsplätze betroffen, so wird sie auch mehrfach gewertet. Sind im Bereich X beispielsweise drei Arbeitsplätze betroffen, so wird die relevante Störzeit dreifach gewertet. Analog wird in den anderen Bereichen vorgegangen.

Zum Schluss werden alle gewichteten d. h. gegebenenfalls mehrfach gewerteten relevanten Störzeiten aller Bereiche zur relevanten Ausfallzeit aufsummiert.

In geschlossener Darstellung berechnet sich die relevante Ausfallzeit  $T_{A,rel}$  nach Gleichung (7.2) aus den Ausfallzeiten aller Elemente  $i$ , deren irrelevante Störzeiten  $T_{ir,ij}$  betrachtet für die jeweiligen Bereiche  $j$  und der Anzahl der betroffenen Arbeitsplätze  $n_j$  pro Bereich, aufsummiert über alle Elemente  $i$  und alle Bereiche  $j$ :

$$T_{A,rel} = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^m (T_{A,i} - T_{ir,ij}) \cdot n_j \quad (7.2)$$

Bezogen auf insgesamt  $m$  Anlagenelemente in  $l$  Bereichen.

Die Bezugsgröße zur Beurteilung der Anlagennutzungszeit ist die relative Betriebszeit  $T_{B,rel}$ , berechnet nach Gleichung (7.3) aus Betriebszeit  $T_B$  multipliziert mit der Anzahl aller Arbeitsplätze an der Anlage.

$$T_{B,rel} = T_B \cdot \sum_{j=1}^l n_j \quad (7.3)$$

Die Anlagennutzungszeit  $T_{ANZ}$  berechnet sich darausfolgend - angelehnt an die technische Verfügbarkeit, vgl. Gleichung (2.1) - nach Gleichung (7.4) und ist eine dimensionslose Prozentangabe:

$$T_{ANZ} = \frac{T_{B,rel} - T_{A,rel}}{T_{B,rel}} \quad (7.4)$$

Anschaulich wird das Vorgehen am fiktiven Beispiel aus Tabelle 7.1: Zwei Elemente haben einen Ausfall mit Auswirkungen auf zwei verschiedene Anlagenbereiche. Bezugszeitraum ist ein Arbeitstag mit zwei Schichten (16 h).

**Tabelle 7.1** Beispiel: Berechnung der Anlagennutzungszeit

Ausfallzeitzeit des Elements	Element 1		Element 2	
	18 min		12 min	
	Bereich X	Bereich Y	Bereich X	Bereich Y
irrelevante Störzeit	10 min	15 min	15 min	18 min
relevante Störzeit	8 min	3 min	0 min	6 min
Anzahl betroffener Arbeitsplätze	4	2	4	2
Gewichtete relevante Störzeit pro Element und Bereich	32 min	6 min	0 min	12 min
relative Ausfallzeit	50 min			
Betriebszeit	16 h			
relative Betriebszeit	96 h = 5760 min			
Anlagennutzungszeit	99,13%			

Die Anlagennutzungszeit dient im Lieferzentrum als Grundlage des Instandhaltungsvertrags. Dabei werden nach Ablauf eines dreimonatigen Testzeitraums die Abweichungen von der vereinbarten Soll-Anlagennutzungszeit mit einem Bonus bzw. Malus belegt. Der Sollwert wird jährlich überprüft und gegebenenfalls angepasst.

Es ist nicht bekannt, ob die „Anlagennutzungszeit“ auch in anderen Anlagen neben dem Lieferzentrum Nürnberg Verwendung findet.

Es hat sich gezeigt, dass der Kennwert ein sinnvolles Maß zur langfristigen Bewertung der Instandhaltung darstellt. Für die Bewertung einer Neuanlage im Rahmen der Abnahme ist der Kennwert in der beschriebenen Form nicht geeignet, da zur Ermittlung der irrelevanten Störzeiten die Einschwingphase abgeschlossen sein muss und eine anschließende Testphase zur Verifizierung nötig ist. Dies würde den Zeitabstand zwischen Betriebsbeginn und abnahmerelevanter Ermittlung des Kennwerts auf ein nicht praktikierbares Maß ausdehnen und die in Abbildung 3.5, S. 38 beschriebenen Nachteile potenzieren.

### 7.2.3 Leistungsverfügbarkeit

Die eben beschriebene Anlagennutzungszeit verschiebt den Fokus deutlich weg von den Anlagenstörungszeiten, hin zu deren Auswirkungen an den Arbeitsplätzen der Anlage. Der Kennwert „Leistungsverfügbarkeit“ geht noch einen Schritt weiter und konzentriert sich ganz auf die Prozesse an den Arbeitsplätzen.

Die technische Verfügbarkeit bewertet die Ausfälle an jedem Anlagenelement, wie beispielsweise an allen Regalbediengeräten oder Streckenabschnitten separat. Dagegen werden bei der Leistungsverfügbarkeit nur die Störungsauswirkungen an den Arbeitsplätzen, wie beispielsweise dem Wareneingang betrachtet, vgl. Abbildung 6.10, S. 84. Auswirkungen sind dabei entweder unproduktive Wartezeiten oder nicht termingerecht bereitgestellte Einheiten, je nach vereinbarter Anforderung an die jeweilige Anlage.

### Ursprung und Namensgebung

Der Kennwert wird definiert und beschrieben in der gleichnamigen VDI-Richtlinie 4486, die im Januar 2011 in Entwurfsfassung veröffentlicht wurde<sup>52</sup>. Entwickelt wurde der Kennwert vom Fachausschuss „Zuverlässigkeit in der Intralogistik“ der VDI-Gesellschaft „Produktion und Logistik“ (VDI-GPL), der im Mai 2007 unter Leitung von Herrn Prof. Michael ten Hompel (TU Dortmund) gegründet wurde. Im Ausschuss vertreten sind Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen von Intralogistik- und Zuverlässigkeitsinstituten und Experten von renommierten Anlagenlieferanten und Planungsbüros. Darüber hinaus konnten bisher regelmäßig Anlagenbetreiber für inhaltliche Stellungnahmen gewonnen werden.

Ziel des Fachausschusses ist es, die existierenden Richtlinien (vgl. Kapitel 2, S. 11) aufzugreifen und weiterzuentwickeln [Wol07]. Damit treibt er die Entwicklung des Verfügbarkeitsbegriffs weiter voran, vgl. Abbildung 3.2, S. 28.

Es herrschte früh ein Konsens darüber, dass ein neuer Verfügbarkeitskennwert die Gesamtanlage repräsentieren sollte und sich stärker als bisher an den Bedürfnissen der Anlagenbetreiber orientieren sollte. Problematischer dagegen war es, einen geeigneten Namen für den neuen Kennwert zu finden. „Verfügbarkeit“ sollte Namensbestandteil

---

<sup>52</sup>Die Verfasserin war an der Entwicklung der Richtlinie beteiligt.

bleiben, um die Weiterentwicklung des bestehenden technischen Verfügbarkeitsbegriffs zu verdeutlichen. Da der Fokus auf die Funktion der Anlage bzw. auf den Prozess auf der Anlage verschoben wurde, kamen neben der gewählten „Leistungsverfügbarkeit“ auch Funktion- bzw. Prozessverfügbarkeit in Frage. Da sowohl die Funktion als auch Leistung ebenfalls im Rahmen der Abnahme geprüft werden, könnte der zusammengesetzte Name zu Irritationen führen. Trotzdem entschied sich der Fachausschuss schlussendlich für die Leistungsverfügbarkeit, da bereits Moubray die Bedürfnisse der Anlagenbetreiber als „erforderliche Leistungsnorm (standard of performance) [Mou97, S. 45]“ und Wittenstein die Leistungsverfügbarkeit bereits einführt und passend definierte, vgl. Tabelle 7.2.

**Tabelle 7.2** Definition der Leistungsverfügbarkeit, nach [Wit07, S. 34]

Leistung	Akt des Leistens	Prozess der Leistungserbringung (Arbeitseinsatz) innerhalb einer bestimmten (vorgegebenen) Zeitspanne
	Leistungsressourcen	Zur Durchführung des Prozesses erforderliche personelle und technische Ressourcen
	Prozessesergebnis	Anhand bestimmter Kriterien als ordnungsgemäß eingestuft und mit einem bestimmten Wert versehen
Leistungsverfügbarkeit	Anforderungsgemäße Durchführung des Prozesses und termingerechte Fertigstellung der geforderten Leistung. Voraussetzung: Zum Zeitpunkt des Abrufs sind die notwendigen Ressourcen verfügbar, unabhängig von auftretenden Unsicherheiten, d. h. Schwankungen des Bedarfs oder von Störungen.	

### Berechnung

Die Definition der Leistungsverfügbarkeit in der VDI-Richtlinie 4486 lautet: „Die Leistungsverfügbarkeit gibt den anforderungs- und termingerechten Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen an.“ [VDI11, S. 2] Dabei unterstreicht das doppelte „vereinbart“ die Wichtigkeit ausführlichen Gespräche der Vertragsparteien über die konkrete Aufgabe der zu installierenden Anlage.

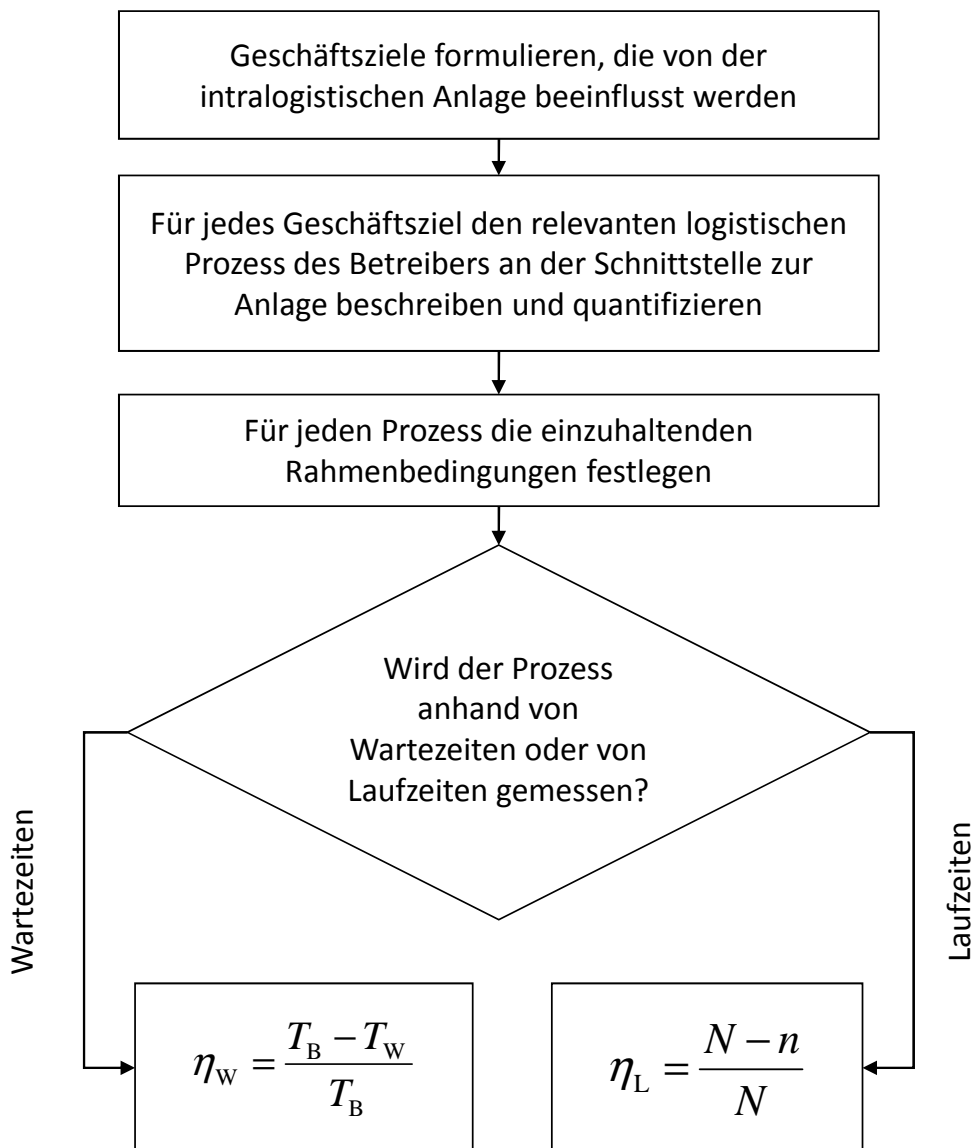


Abbildung 7.5 Bestimmung der Verfügbarkeitsanforderung, [VDI11, S. 5]

Bevor konkrete Anforderungen an die Leistungsverfügbarkeit gestellt werden, müssen zunächst vier wesentliche Schritte getan werden, vgl. Abbildung 7.5:

**1. Formulierung des Geschäftsziels:** Die neue Anlage hat die Aufgabe, dem Betreiber das Erreichen seiner Geschäftsziele zu ermöglichen bzw. zu erleichtern. Dazu ist es notwendig, dass diese Ziele konkret definiert werden.

**2. Formulierung der logistischen Prozesse:** Die Geschäftsziele werden erreicht, indem verschiedene logistische Prozesse erfolgreich auf der Anlage durchgeführt werden. Diese Prozesse müssen ebenfalls konkret beschrieben und quantifiziert werden.

**3. Formulierung der Randbedingungen:** Um die Prozessergebnisse sinnvoll messen und bewerten zu können, müssen verlässliche Randbedingungen definiert werden, auf deren Basis die notwendigen Ressourcen geplant werden können.

**4. Unterscheidung der Folgen, die bei einer Prozessstörung auftreten:** Treten in Folge einer Störung am betrachteten Arbeitsplatz ungewünschte Wartezeiten auf, so

berechnet sich die Leistungsverfügbarkeit  $\eta_W$  an einem Arbeitsplatz aus der Betriebszeit  $T_B$  und der Wartezeit  $T_W$  nach Gleichung (7.5):

$$\eta_W = \frac{T_B - T_W}{T_B} \quad (7.5)$$

Wird ein Prozess gewählt, bei dem sich die fehlende Verfügbarkeit in verspäteten Ladeeinheiten messen lässt, so beschreibt die Anzahl der verspäteten Ladeeinheiten  $n$  sowie die Anzahl  $N$  bei planmäßiger Leistung im Beobachtungsintervall die Leistungsverfügbarkeit  $\eta_L$ :

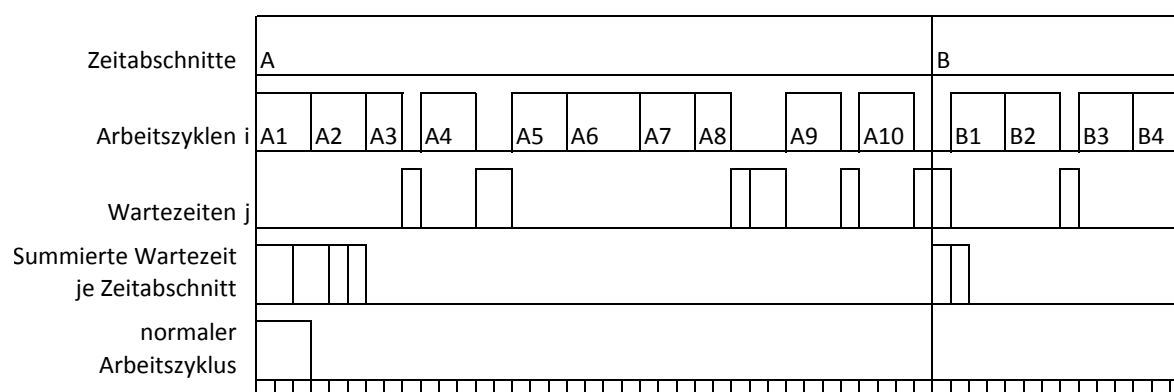
$$\eta_L = \frac{N - n}{N} \quad (7.6)$$

Störungen, die durch Puffer und Redundanzen kompensiert werden, haben dagegen keinen Einfluss auf die Leistungsverfügbarkeit.

### Durchführung des Nachweises

Die Empfehlungen zum Nachweis der Leistungsverfügbarkeit ähneln den gewohnten Abläufen des Verfügbarkeitsnachweises: Zeitpunkt und Dauer des Nachweises sollen individuell vereinbart werden, mit Hinweis<sup>53</sup> auf das Einschwingverhalten (vgl. Kapitel 5.3.2) wird zu mehreren Leistungsverfügbarkeitstest mit steigenden Anforderungen geraten, wenn der Nachweis innerhalb der ersten drei Monate nach Betriebsstart stattfinden soll. Es wird empfohlen, die Datenaufnahme automatisiert durch das Leitsystem durchzuführen und auswerten zu lassen, eine beispielhafte Programmieranweisung ist der Richtlinie beigelegt [VDI11, S. 10].

Der Testzeitraum wird in mehrere Zeitabschnitte eingeteilt. Die Messdaten aus Zeitabschnitten, in denen die vereinbarten Randbedingungen nicht eingehalten wurden, werden nicht für die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit herangezogen. Abbildung 7.6 veranschaulicht das Vorgehen. Dient der Leistungsverfügbarkeitsnachweis vornehmlich formalen Zwecken, kann auf die Einteilung des Testzeitraums in mehrere Zeitabschnitte verzichtet werden.



**Abbildung 7.6** Beispiel-Protokoll der Wartezeiten, nach [VDI11, S. 13]

<sup>53</sup>Der Hinweis erfolgt über das Stichwort „Badewannenkurve“, da sich dieses als anschauliches, aber unzureichendes Erklärungsmodell eingebürgert hat, vgl. dazu Kapitel 6.3.2.

Eine graphische Zeiteinheit in Abbildung 7.6 sei 100 Sekunden, der Zeitabschnitt A dauert somit 3600 Sekunden bzw. 1 Stunde. Der normale Arbeitszyklus beträgt 3 Zeiteinheiten (=300 Sekunden) Im Zeitabschnitt A laufen 10 Arbeitszyklen ab, es treten 6 Wartezeiten auf.

- Wartezeit 1 folgt auf Arbeitszyklus A3, dieser ist kürzer als der normale Arbeitszyklus. Daher wird dieser nicht gewertet.
  - Wartezeit 2 (2 Zeiteinheiten) wird normal gewertet.
  - Wartezeit 3-4 folgt auf Arbeitszyklus A8, dieser ist kürzer als der normale Arbeitszyklus. Für die Summierung der Wartezeiten wird nur Wartezeit 4 (2 Zeiteinheiten), ab Ablauf des normalen Arbeitszyklus gewertet.
  - Wartezeit 5 (1 Zeiteinheit) wird normal gewertet.
  - Wartezeit 6 beginnt in Zeitabschnitt A und endet erst in Zeitabschnitt B.
  - Die Zeit von Beginn der Wartezeit 6 bis zum Abschnittsende wird als Wartezeit 6 (1 Zeiteinheit) in Zeitabschnitt A gewertet, die Zeit von Abschnittsbeginn bis zum Wartezeitende (1 Zeiteinheit) als Wartezeit 1 im Zeitabschnitt B.
- Daraus resultiert für Zeitabschnitt A die summierte Wartezeit aus Wartezeit 2, 4, 5 und 6 mit insgesamt 6 Zeiteinheiten.

Neben der Möglichkeit, einen konkreten Testzeitraum festzulegen, sind andere Varianten denkbar. In Kapitel 8.2.4 wird zusätzlich der Nachweis mit Erreichen einer Bedingung beschrieben.

### 7.3 Bewertung

Die Analyse der technischen Verfügbarkeit und der dazugehörigen Nachweisprozeduren in Teil 1.4.4 hat eine Reihe von Anforderungen ergeben, an denen sich ein neuer Kennwert inklusive der Nachweisprozedur messen lassen muss. Nachdem sowohl die Gesamtanlageneffektivität als auch die Anlagennutzungszeit wesentliche Kriterien nicht erfüllen konnte, wird im Folgenden die Leistungsverfügbarkeit auf die Erfüllung der Anforderungen (durch ein „?“ gekennzeichnet) hin bewertet. Das ✓-Symbol zeigt, dass die Leistungsverfügbarkeit diese Anforderung erfüllen kann, während das →-Symbol auf zusätzliche Einflussgrößen hinweist.

- Kapitel 3 - Regelwerksanalyse,
  - ? Werden komplexe Anlagenlayouts mit Vermaschungen, Puffern und (Teil-) Redundanzen adäquat berücksichtigt?
  - ✓ Durch die Bewertung an den Schnittstellen können auch komplexe Anlagenlayouts hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Betriebsablauf beurteilt werden.
  - ? Wird der praktische Ablauf des Verfügbarkeitstest mit der juristischen Erklärung der Abnahme sinnvoll und eindeutig mit einander abgestimmt?
  - Das ist weniger vom Kennwert, als von der Vertragsgestaltung abhängig. Bei der vorgeschlagenen Entkopplung von Abnahme der gelieferten Anlage und Inbetriebnahmebegleitung können juristische Nebenschauplätze vermieden werden.
- Kapitel 4 - Praxiserfahrungen
  - ? Gibt das Testergebnis Auskunft darüber, ob die Anlage in der Lage ist, ihre Aufgabe zu erfüllen?

- ✓ Je höher die Leistungsverfügbarkeit, desto besser wird die geforderte Aufgabe erfüllt.
- ? Werden Lieferanten gegen unberechtigte Anforderungen geschützt, die aus Ausfällen resultieren, die außerhalb ihres Einflussbereiches liegen?
- ✓ Bei sorgfältig definierten Randbedingungen werden solche Fälle ausgeklammert.
- ? Verringert sich der Aufwand gegenüber den heute üblichen Testprozeduren?
- ✓ Tendenziell ja. Wird der Nachweisablauf wie heute manuell protokolliert, verändert sich der Aufwand nicht wesentlich. Wird von der Möglichkeit gebrauch gemacht, weitgehend automatisiert zu protokollieren, verringert sich der Aufwand. Wird die in Kapitel 8.2.4 beschriebene Möglichkeit des Nachweises per Bedingungen gewählt<sup>54</sup>, reduziert sich der Aufwand erheblich.
- Kapitel 5 - Verfügbarkeitsentwicklung
  - ? Berücksichtigen die Prozeduren ein mögliches Einschwingverhalten der Anlage?
  - ✓ Der Test der Leistungsverfügbarkeit wird für frühestens drei Monate nach Produktionsbeginn empfohlen.
  - ? Berücksichtigen die Prozeduren das Langzeitverhalten der Anlage?
  - ✓ Durch die Entkopplung der Inbetriebnahme von der Abnahme der Inbetriebnahmereife, vgl. Abbildung 7.1, S. 87, verlagert sich der Fokus auf ein stabiles Anlagenverhalten, der Verfügbarkeitsknick nach der Abnahme verringert sich wahrscheinlich deutlich.
  - ? Berücksichtigen die Prozeduren den Einfluss des Personals?
  - ✓ Führen Bedienfehler zu Wartezeiten, werden diese durch die Leistungsverfügbarkeit berücksichtigt. Bei der Analyse der Ursachen zur Prüfung der Einhaltung der vereinbarten Randbedingungen werden systematische Fehler erkannt und Gegenmaßnahmen können ergriffen werden.
- Kapitel 6 - Zuverlässigkeitstheorie
  - ? Werden die verwendeten Kenngrößen eindeutig und im Einklang zur Zuverlässigkeitstheorie definiert?
  - Durch die angepassten Systemgrenzen bei der Berechnung der Leistungsverfügbarkeit wurden die bestehenden Widersprüche zur Zuverlässigkeitstheorie weitgehend ausgeräumt. Einzig der in der Theorie unzutreffende Hinweis auf die Badewannenkurve findet sich auch in der Richtlinie zur Leistungsverfügbarkeit.
  - ? Wird die Anlage als Ganzes betrachtet und anhand der Materialflussein- und -ausgänge beurteilt?
  - ✓ Uneingeschränkt ja.

## 7.4 Zusammenfassung Kapitel 7

Sowohl die Gesamtanlagenkapazität als auch die Anlagennutzungszeit lösen sich von den auftretenden Störungen der Anlagenelemente und betrachten die Fähigkeit der Anlage,

<sup>54</sup>Der Nachweis per Bedingung ist nicht Bestandteil der VDI 4486, sondern eine eigenes Weiterentwicklungskonzept, vgl. Kapitel 8.2.4, S. 106.

die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Beide Kennwerte sind allerdings dafür entwickelt, bestehende Anlagen zu optimieren und sind daher nicht dafür geeignet, neue Anlagen im Rahmen der Abnahme zu bewerten. Der Kennwert der Leistungsverfügbarkeit wurde speziell für diese Anwendung entwickelt.

Die Analyse der VDI-Richtlinie, in welcher der Kennwert definiert und beschrieben ist, zeigt, dass der Kennwert großes Potential hat, die aufgestellten Kriterien aus Teil 1.4.4 zu erfüllen. Damit ist die Leistungsverfügbarkeit in der Lage, die Probleme, die bei Anwendung des bestehenden Regelwerks auftreten, zu umgehen bzw. zu lösen.

In folgendem Kapitel 8 werden konkrete Vorgehensweisen entwickelt, um neue Anlagen in Hinblick auf deren Beurteilung durch die Leistungsverfügbarkeit zu planen. Auch der Ablauf des Nachweises wird weiter spezifiziert und konkretisiert. Die entwickelten Methoden werden anhand eines Beispiellagers demonstriert.



---

## 8 Anwendung der Leistungsverfügbarkeit

Die Untersuchungen zur Anwendung der Leistungsverfügbarkeit wurden im Rahmen der Fachkolloquien der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) in den Jahren 2009 und 2010 (vgl. [Mai09, Mai10a]) ausführlich vorgestellt und werden im Folgenden aktualisiert zusammengefasst.

### 8.1 Prognose in der Planungsphase

Im Unterschied zur technischen Verfügbarkeit (vgl. Kap. 2, S. 11ff) haben die Verfügbarkeitswerte der Elemente einer intralogistischen Anlage und deren Verknüpfung keinen Einfluss auf die Messung der Leistungsverfügbarkeit. Gleichwohl spielt die Wahl eines bedarfsgerechten Layouts mit sinnvollem Einsatz von Redundanzen, Reservekapazitäten und Puffern eine wichtige Rolle bei der erreichbaren Leistungsverfügbarkeit. Um verschiedene technische Varianten im Hinblick auf die zu erwartende Leistungsverfügbarkeit vergleichen zu können, wurde die in Kapitel 8.1.1 dargestellte Prognosemethode entwickelt. Mit Hilfe der Prognose wird abgeschätzt wie schwerwiegend sich Störungen an den verschiedenen Elementen der Anlagen an den, für die Messungen entscheidenden Schnittstellen auswirken. Die der Prognose zugrundeliegenden Gleichungen sind nicht dafür geeignet, bei einer existierenden Anlage die Leistungsverfügbarkeit aus den Störungsdaten hochzurechnen. Hier gelten einzig die Messungen an den Schnittstellen.

#### 8.1.1 Die Prognosemethode

Das Konzept der Leistungsverfügbarkeit wurde für komplexe intralogistische Anlagen mit klar definierten Voraussetzungen entwickelt (vgl. Kap. 7.2.3, S. 92ff).

Für die Prognose der Wartezeit bzw. der unpunktlichen Einheiten werden vier Parameter berücksichtigt: Der Redundanzfaktor  $R_i$ , der Kapazitätsfaktor  $K_{ix}$ , die Pufferzeit  $P_{ix}$  und die Laufzeitreserve  $L_{ix}$ .

##### **Redundanzfaktor $R_i$**

Der Redundanzfaktor  $R_i$  berücksichtigt den Materialflussanteil, der an das betrachtete Element  $i$  gebunden ist und der auch im Störfall nicht über redundante Strecken umgeleitet werden kann. Im Normalfall gilt  $0 \leq R_i \leq 1$ , in Spezialfällen, bei denen Fördereinheiten mehrfach über ein Element gefördert werden, kann  $R_i$  auch Werte  $> 1$  annehmen.

Wird also beispielsweise ein Materialfluss über zwei parallele, gleichartige Strecken geleitet, die jeweils 75% des gesamten Materialflusses aufnehmen können, ist im Störfall einer der Parallelstrecken nur 25% des Materialflusses blockiert. Der Redundanzfaktor der beiden Strecken ist demnach jeweils 0,25. Der Redundanzfaktor vermindert einerseits den

**Tabelle 8.1** Vergleich Gewichtungsfaktor - Redundanzfaktor

	Gewichtungsfaktor $k_i$	Redundanzfaktor $R_i$
Art der Verfügbarkeit	technische Verfügbarkeit [VDI04a, FEM89]	Leistungsverfügbarkeit [VDI11]
Anwendung	Berechnung der Gesamtverfügbarkeit aus gemessenen Störungsdaten	Prognose der zu erwartenden Leistungsverfügbarkeitsminderung während der Planung
Materialflussanteil	Sollanteil des Elements	Anteil der nicht über parallele Elemente gefördert werden kann
bezogen auf	Gesamtanlagenmengenstrom	Ver-/Entsorgestrom der betrachteten Schnittstelle
weitere Einflussfaktoren	-	Reservekapazitäten Laufzeitreserven Puffer,
Aussageumfang	gesamte Anlage	betrachtete Schnittstelle

Anstieg von Wartezeiteinheit bzw. Anzahl unpünktlicher Einheiten pro Störungszeiteinheit und vergrößert andererseits die Pufferwirkung (vgl. Seite 101). Wirkt sich allerdings eine Störung gleichzeitig auf  $m$  gleichartige und gemeinsam betrachtete Schnittstellen aus, so nimmt die Störungsauswirkung an den Schnittstellen in Summe auch  $m$ -fach zu.

Da sowohl der eben eingeführte Redundanzfaktor  $R_i$  als auch der Gewichtungsfaktor  $k_i$  der technischen Verfügbarkeit (vgl. Kapitel 2.2.3, S. 18) den Materialflussanteil berücksichtigen<sup>55</sup>, und daher eine gewisse Verwechslungsgefahr besteht, werden in Tabelle 8.1 die beiden Faktoren direkt miteinander verglichen und die Unterschiede herausgestellt.

### Kapazitätsfaktor $K_{ix}$

Um Spitzenlasten abfangen zu können, sind intralogistische Anlagen üblicherweise mit Reservekapazitäten ausgestattet. Die Anlagenelemente sind damit in der Lage, kurzzeitig eine höhere Leistung (Spielzeiten, Durchsatz) zu bringen, als im Durchschnitt verlangt. Diese Reservekapazitäten können einerseits nach behobener Störung die entstandene Warteschlange mit erhöhter Leistung abarbeiten und damit die Auswirkung der Störungszeit auf die unpünktlichen Einheiten vermindern, andererseits bei parallelen Anlagenelementen im Störfall Materialflussanteile übernehmen, wenn dies von der Anlagensteuerung so vorgesehen ist. Der Kapazitätsfaktor beschreibt dabei das Verhältnis von maximal möglichem Durchsatz zu gefordertem Soll-Durchsatz, er nimmt damit immer Werte  $\geq 1$  an. Entscheidend für die schnellere Abarbeitung der Warteschlange ist allerdings nicht der Kapazitätsfaktor des betrachteten Elements, sondern der kleinste Kapazitätsfaktor zwischen dem betrachteten Element  $i$  und der betrachteten Schnittstelle  $x$ , da der gesteigerte Durchsatz durch diese Engstelle begrenzt wird.

<sup>55</sup>Ist der Materialfluss gleichmäßig über  $m$  parallele Elemente ohne zusätzliche Reserven verteilt, gilt  $R_i = k_i = \frac{1}{m}$ .

Zur Verdeutlichung des Sachverhalts zeigt Tabelle 8.2 die Reservekapazitäten von drei serielle verknüpften Elementen vor einer Schnittstelle  $x$  und die jeweils wirksamen Reservekapazitäten. Obwohl das Element  $E_1$  für sich betrachtet mit einem Kapazitätsfaktor von 2 ausgestattet ist, wird dieser im System mit den beiden anderen Elementen zum wirksamen Kapazitätsfaktor von 1,5 begrenzt, der aus der geringeren Kapazität von Element  $E_2$  resultiert. Element  $E_3$  dagegen wird durch kein nachfolgendes Element mehr begrenzt, hier wird der volle technische Kapazitätsfaktor wirksam.

**Tabelle 8.2** Wirksame Reservekapazitäten

Element	$E_1$	$E_2$	$E_3$
Reservekapazitätsfaktor $K_i$	2	1,5	2,5
auf $x$ wirksamer Reservekapazitätsfaktor $K_{ix}$	1,5	1,5	2,5

Hat ein Element  $i$  keine Reservekapazität, so ist sein Kapazitätsfaktor  $K_i = 1$ . Eine auftretende Warteschlange durch eine Störung kann nicht automatisch abgebaut werden. Wird sie nicht mit einer separaten Maßnahme (z. B. Entfernung der Fördereinheiten aus der Anlage und manueller Weitertransport, oder Wiedereinspeisung in einer Schwachlastphase) abgebaut, haben alle nachfolgenden Elemente eine Verspätung, die der Störungsdauer entspricht. Bei Aufgabenstellungen, bei denen es auf termingerechte Bereitstellung der Warenankommt, sind daher Kapazitätswerte  $> 1$  empfohlen.

Der Kapazitätsfaktor hat Ähnlichkeiten zum Faktor  $p_{Tech,i}$ , der in [VDI92b] eingeführt und in Kapitel 2.2.4, S.20 vorgestellt wurde. Dieser bezieht sich allerdings auf den Gesamtstrom und berücksichtigt nur die teilweise Übernahme von Fördereinheiten von gestörten Parallelementen, nicht aber die Abarbeitung von Warteschlangen.

### **Pufferzeit** $P_{ix}$

Puffer können die Auswirkungen von Störungen mindern, da während der Störung vom gepufferten Arbeitsvorrat oder in den Entsorgungspuffer gearbeitet werden kann. Ist die Störung kürzer als die Pufferzeit, so tritt an der Schnittstelle keine Wartezeit auf, ist die Störung länger als die Pufferzeit, wird nur die Differenz aus Störungszeit und Pufferzeit zur Wartezeit. Die Pufferzeit berechnet sich aus der Anzahl der Pufferplätze  $p_{ix}$  zwischen gestörtem Element und betrachteter Schnittstelle und dem Arbeitstakt  $t_x$  an der Schnittstelle. Bei Redundanzen verstärkt sich die Pufferwirkung um den Materialflussanteil, der den Puffer weiter ver- bzw. entsorgt.

$$P_{ix} = t_x \cdot p_{ix} \cdot (2 - R_i) \quad (8.1)$$

### **Laufzeitreserve** $L_{ix}$

Wird die Leistungsverfügbarkeit über das Kriterium „Anzahl nicht termingerechter Einheiten“ gemessen, ist jede Einheit mit einem stetig sinkenden Zeitvorrat bis zum Ende des Betrachtungszeitraums ausgestattet. Gerät eine Einheit in einen Stau in Folge einer Störung, so minimiert sich der Zeitvorrat durch die Verzögerung im Stau. Ist die Verzögerung größer als der Zeitvorrat, wird die Einheit nicht termingerecht an der Zielschnittstelle eintreffen. Die Laufzeitreserve  $L_{ix}$  beschreibt die Zeitdauer, die ein Ausfall maximal annehmen darf, sodass gerade noch alle Fördereinheiten termingerecht ihre Schnittstelle

erreichen. Sie ist abhängig von der Restzeit  $T_R$  vom Startzeitpunkt der Störung bis zum Ende der Betrachtungsdauer  $T_B$  und dem Reservekapazitätsfaktor  $K_{ix}$ . Abbildung 8.1 zeigt, dass die Verzögerungen durch eine Ausfalldauer  $T_A < L_{ix}$  keine untermingerechten Einheiten zur Folge haben, bei Ausfalldauern von  $T_A > L_{ix}$  ist die Restzeit einiger Einheiten kleiner als die auftretende Verzögerung, diese Einheiten werden nicht termingerecht am Ziel ankommen.<sup>56</sup> Die Laufzeitreserve berechnet sich nach Gleichung (8.2):

$$L_{ix} = \frac{T_R \cdot (K_{ix} - 1)}{K_{ix}} \quad (8.2)$$

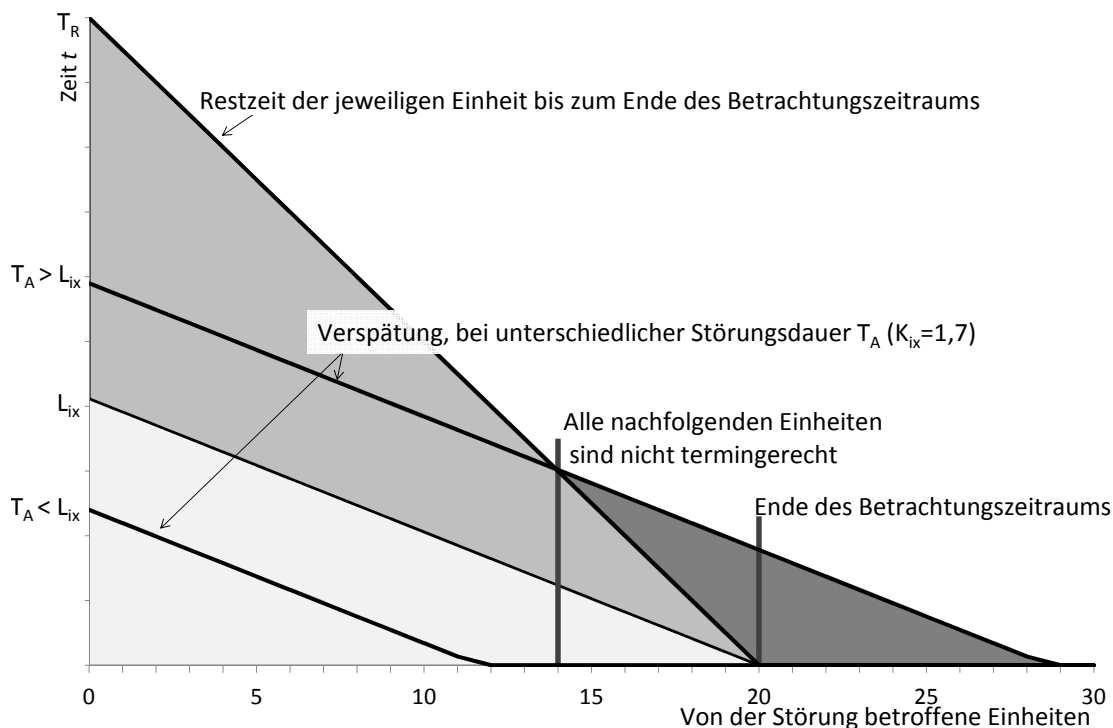


Abbildung 8.1 Veranschaulichung der Laufzeitreserve

Da bei der Prognose der Störungszeitpunkt nicht bekannt ist, wird für die Restzeit  $T_R$  die Hälfte der Betrachtungsdauer ( $T_R = 0,5 \cdot T_B$ ) empfohlen, da die Hälfte aller Störungen bei Gleichverteilung<sup>57</sup> vor diesem Zeitpunkt und die andere Hälfte nach diesem Zeitpunkt zu erwarten sind und sich so automatisch ein Mittelwert ergibt.

### Prognosegleichungen

Zusammengefasst ergeben sich aus den Einflussgrößen  $R_i$ ,  $K_{ix}$ ,  $P_{ix}$  und  $L_{ix}$  die Gleichung zur Wartezeitprognose (8.3) und die Gleichung zur Prognose der untermingerechten

<sup>56</sup>In [Mai10a, S. 235] wurde die Gleichung nicht korrekt dargestellt. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit korrigiert.

<sup>57</sup>In der Praxis ändert sich die Belastung der Anlage über den Zeitablauf, so gibt es beispielsweise in Distributionsanlagen häufig morgens eine Einlagerspitze, und nachmittags/abends eine Auslagerspitze. Durch geschickte Wahl der betrachteten Zeiträume lassen sich diese Schwankungen in der Prognose berücksichtigen.

Einheiten (8.4)<sup>58</sup>:

$$T_{W,ix} = \begin{cases} 0 & \text{für } T_{A_i} < P_{ix} \\ \frac{R_i}{K_i} (T_{A_i} - P_{ix}) & \text{für } T_{A_i} \geq P_{ix} \end{cases} \quad (8.3)$$

$$n_{ix} = \begin{cases} 0 & \text{für } T_{A_i} < P_{ix} + L_{ix} \\ \frac{R_i}{K_i \cdot t} (T_{A_i} - P_{ix} - L_{ix}) & \text{für } T_{A_i} \geq P_{ix} + L_{ix} \end{cases} \quad (8.4)$$

Da die Anzahl der unpünktlichen Einheiten nur eine natürliche Zahl sein kann, wird jeweils aufgerundet.

Die Graphen der beiden Funktionsgleichungen lassen sich demnach charakterisieren durch einen Totzeitanteil und einen linearen Anstieg der Wartezeit bzw. der Anzahl der unpünktlichen Einheiten mit wachsender Störungszeit, vgl. Abbildungen 8.2 und 8.3.



Abbildung 8.2 Entwicklung der Wartezeit

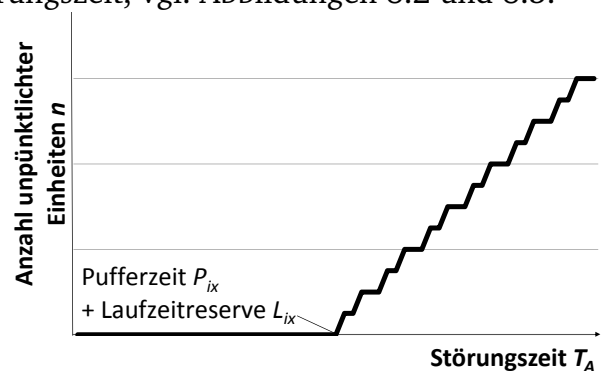


Abbildung 8.3 Entwicklung der unpünktlichen Einheiten

### 8.1.2 Auswertung

Je nach Fragestellung stehen mehrere Auswertemöglichkeiten zur Verfügung: Zur Identifikation der kritischen Elemente kann eine ABC-Analyse in Bezug auf den Anstieg der Wartezeit bzw. der Anzahl der unpünktlichen Einheiten mit steigender Störungszeit, der Totzeit oder der kritischen Ausfallzeiten durchgeführt werden. Die Wirkung von zusätzlichen Redundanzen, Reservekapazitäten und Puffern kann abgeschätzt und mit den zusätzlichen Kosten in Bezug gesetzt werden. Stehen mehrere Auslegungsvarianten zur Diskussion, kann der Vergleich der prognostizierten Leistungsverfügbarkeitswerte ein Kriterium (neben Investitionshöhe, Betriebskosten, Platz- und Energiebedarf u. a.) zur Auswahl sein. Hilfreich können diese Werte auch bei der Auswahl geeigneter Zukaufelemente sein.

Die jeweils kritische Ausfallzeit der Anlagenelemente kann berechnet werden, wenn die maximal tolerierten Wartezeiten  $T_{W,max}$ , bzw. unpünktlichen Einheiten aus den vertraglichen Vereinbarungen in die Gleichungen (8.3) und (8.4) eingesetzt werden. So ergibt sich bei Schnittstellen mit Wartezeitmessung:

$$T_{A_i,krit} = \frac{T_{W,max} \cdot K_{ix}}{R_i} + P_{ix} \quad (8.5)$$

<sup>58</sup>Gleichung (8.4) wurde in [Mai10a, S. 236], dort Gleichung (6), mit einem Tippfehler gedruckt, der hier berichtigt wurde.

bzw. Messung der unpunktlichen Einheiten:

$$T_{Ai,krit} = \frac{n_{max} \cdot K_{ix} \cdot t}{R_i} + P_{ix} + L_{ix} \quad (8.6)$$

### 8.2 Messung für den Nachweis der Leistungsverfügbarkeit

Ist die Anlage installiert erfolgt im Anschluss die Inbetriebnahmephase mit der Aufnahme der Produktion, vgl. Abbildung 7.1, S. 87. Diese Phase endet mit dem Test der Leistungsverfügbarkeit zum Abgleich mit den Vertragskennwerten. Die wesentlichen Voraussetzungen für einen positiven Abschluss müssen aber bereits zu Beginn der Planung geschaffen worden sein.

#### 8.2.1 Voraussetzungen und Randbedingungen

Bereits im Rahmen der Vertragsgestaltung sind folgende Fragen zu klären, um den Test der Leistungsverfügbarkeit zu gegebener Zeit durchführen zu können:

1. Welche Randbedingungen gelten?
2. Welche Messdaten werden benötigt?
3. Wie werden die Messdaten gewonnen?
4. Wann und über welchen Zeitraum werden diese gewonnen?
5. Wie ist das Vorgehen nach nicht gelungenen Leistungsverfügbarkeitsnachweisen?

Die Leistungsverfügbarkeit ist stark auf die Bedürfnisse des Anlagenbetreibers zugeschnitten, da es für die Lieferanten vorrangiges Ziel ist, ihre Kunden zufrieden zustellen. Dies birgt allerdings die Gefahr, dass die Lieferanten ungerechtfertigten Forderungen der Betreiber gegenüberstehen. So können z. B. Wartezeiten entstehen, auf die der Lieferant keinen Einfluss hat und die er somit nicht verantworten kann. Ursachen für solche Wartezeiten können beispielsweise Bedienungsfehler sein, eine fehlerhafte Auftragssteuerung durch eine externe Software, mangelnde Personalressourcen oder eine ungeeignete Instandhaltungsstrategie. Aus diesem Grund wird ein Vorgehen empfohlen, bei dem frühzeitig entsprechende Randbedingungen definiert und quantifiziert werden, auf deren Grundlage dann die Planung der Anlage erfolgt. Die Einhaltung der Randbedingung ist Voraussetzung für die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit.

Es gibt quantitative und qualitative Randbedingungen. Die Einhaltung der quantitativen Randbedingungen lässt sich leicht mit Hilfe von konkreten Zahlen überprüfen: An Schnittstellen mit der Messung von unpunktlichen Einheiten beispielsweise, ist es Voraussetzung für die Wertung der Daten, dass zum Einen der Arbeitsplatz ausreichend lange mit qualifiziertem Personal besetzt war und zum Anderen, dass die zu verarbeitende Menge an Einheiten die definierte Maximalzahl nicht übersteigt ( $N_{max}$ ). Dafür wird die Betriebszeit  $T_{B,x}$  mit der benötigten Zeit verglichen, die sich aus der Anzahl  $N$  der Sollmenge und dem Bearbeitungstakt an der Schnittstelle  $t_x$  berechnet, vgl. Gleichungen (8.7) und (8.8).

$$T_{B,x} > N \cdot t \quad (8.7)$$

$$N \leq N_{max} \quad (8.8)$$

Sind diese Bedingungen für den jeweiligen Betrachtungszeitraum erfüllt, werden die unpunktlichen Einheiten für die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit berücksichtigt.

Qualitative Randbedingungen lassen sich allerdings nicht so leicht definieren. Ein häufig auftretendes Problem bei herkömmlichen Abnahmen ist beispielsweise flatternde Plastikfolie, die die Spaltkontrolle blockiert und so einen Stillstand des Regalbediengerätes auslöst (vgl. Kapitel 4.3.3, S. 50). Tritt im Anschluss daran eine Wartezeit auf, so wird diese abhängig von den Vereinbarungen bewertet: Wurden gemäß den Empfehlungen des Lieferanten entsprechende Investitionen getätigt, um diese Gefahr zu minimieren, und sie tritt trotzdem einmal auf, so zählt die Wartezeit ganz normal. Hat der Betreiber sich allerdings gegen zusätzliche Investitionen entschieden, so wird als Bedingung aufgestellt, dass Wartezeiten in einem bestimmten Zeitraum nach dem Auftreten der entsprechenden Fehlernummern nicht gewertet werden. Dazu muss ein Abgleich mit den Störungsdaten der Instandhaltung erfolgen.

### 8.2.2 Benötigte Daten

**Tabelle 8.3** Mögliche Randbedingungen und die benötigten Daten zu ihrer Überprüfung

Randbedingung	Benötigte Daten
Einhaltung der Maximalen Liefermenge pro Zeit	Liefermenge, maximale Liefermenge
Rechtzeitige Anlieferung	Lieferzeitpunkt, Liefermenge
Spezielle Anforderungen an die Transporteinheiten	Temperatur, Maße, Gewicht, Schwerpunktlage bei inhomogener Gewichtsverteilung
Gefüllter Auftragsvorrat	Anzahl offener Aufträge im System

Zur Berechnung der Leistungsverfügbarkeit sind für alle Schnittstellen mit unpünktlichen Einheiten die Sollanzahl  $N_x$  der entsprechenden Einheiten und die Anzahl  $n_x$  der nicht termingerecht versorgten Einheiten zu ermitteln. An den Schnittstellen mit Wartezeit werden die Betriebszeit  $T_{Bx}$  und die Wartezeit  $T_{Wx}$  benötigt. zur Beobachtung der Randbedingungen sind unterschiedliche Daten nötig, je nach Art der Randbedingung. Eine Auswahl von Randbedingungen und der damit zusammenhängenden benötigten Daten zu deren Überwachung werden in Tabelle 8.3 dargestellt.

### 8.2.3 Datenaufnahme

Für die Datenaufnahme sind verschiedene Varianten denkbar:

**Manuelle Datenaufnahme:** Bei einer manuellen Datenaufnahme ist keinerlei zusätzliche Ausrüstung nötig, allerdings ist der Personalaufwand hoch, die Messqualität schwankt und ist manipulationsanfällig. Insgesamt besteht hier keine wesentliche Verbesserung im Vergleich zur Datenaufnahme bei herkömmlichen Abnahmetests, die üblicherweise manuell mit Hilfe von Störungsprotokollen erfolgt. Für die Summe  $N$  der Sollstücke wird die Planungsgrundlage (z. B. Lieferscheine) ausgewertet. Die Anzahl  $n$  der unpünktliche Einheiten werden zum festgelegten Zeitpunkt gezählt. Die Betriebs- und Wartezeiten werden durch Protokollierung der Anfangs- und Endzeiten erfasst und berechnet.

**Videoaufnahme:** Eine Möglichkeit zur Einsparung von Personal während des Tests ist die Videoaufnahme des Arbeitsplatzes. Die Daten werden im Prinzip analog zur manuellen Erfassung ermittelt, der wesentliche Unterschied ist, dass nicht das reale Geschehen

beobachtet wird, sondern zeitversetzt die Videoaufzeichnung. Dabei entsteht allerdings ein schlecht abzuschätzender Auswerteaufwand. Außerdem muss die Videoüberwachung hinsichtlich des Arbeitsrechtes abgesichert werden. Für die Auswertung von unpünktlichen Einheiten bringt die Videoüberwachung keinen Vorteil gegenüber der manuellen Datenaufnahme.

**Automatisierte Datenaufnahme:** Die automatisierte Datenaufnahme bietet sich an, wenn der Materialfluss im Betrieb mit Hilfe einer entsprechenden Software überwacht wird. Der große Vorteil einer automatisierten Aufnahme ist die einfache und langfristige Auswertung mit sehr geringem Personalbedarf. Es gibt zwei Möglichkeiten: Mit oder ohne Beteiligung der Mitarbeiter.

Gibt der Mitarbeiter über entsprechende Schalter an, wann die Betriebszeit oder Wartezeit beginnt und endet, ist eine einfache Programmierung möglich, allerdings ist, wie bei der manuellen Datenaufnahme, die Messqualität schwankend und manipulationsanfällig.

Um die Messung vor subjektiven Einflüssen zu schützen, können mit Hilfe einer programmierten Auswertung für die Aufnahme der Wartezeit die vorhandenen Sensorsignale genutzt werden: An Quellen beginnt die Wartezeitmessung, wenn bei Ende eines Bearbeitungsvorgangs (z. B. Einlagerung) der nachgelagerte Pufferplatz belegt ist, da dadurch die Entsorgung der Quelle blockiert wird. Die Wartezeit endet, wenn der Pufferplatz frei wird. An Senken beginnt die Wartezeitmessung, wenn bei Ende eines Bearbeitungsvorgangs (z. B. Auslagerung) der vorgelagerte Bereitstellungsplatz nicht belegt ist, da dadurch die Versorgung der Senke unterbrochen wird. Die Wartezeit endet, wenn der Bereitstellungsplatz belegt wird. Ist eine Schnittstelle gleichzeitig Quelle und Senke, wie es bei Arbeitsplätzen der Fall ist, werden gleichzeitig anfallende Wartezeiten der Quell- und Senkenfunktion nur einmalig angerechnet. Die Anzahl der unpünktlichen Einheiten entspricht der Sollanzahl an einer betrachteten Schnittstelle abzüglich der bis zum festgelegten Zeitpunkt angekommenen Einheiten.

Der Aufwand für die Programmierung fällt nur einmalig an, sodass er sich vergleichsweise schnell amortisiert. Ein Programmablauf zur Orientierung ist im Anhang der VDI-Richtlinie 4486 [VDI11, S. 10] vorhanden. Auf Grund der Vorteile der automatisierten Datenaufnahme gegenüber der manuellen Datenaufnahme, bzw. der Datenaufnahme mit Hilfe von Videotechnik, wird die automatisierte Datenaufnahme empfohlen. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass für die Ursachenforschung bei Anlagenstörungen zumindest in der Anlaufphase, bis ein ausreichender Erfahrungsschatz vorhanden ist, noch nicht auf völlig auf manuelle Protokolle verzichtet werden kann.

### 8.2.4 Testzeitpunkt, Testdauer und Verfahren bei Misserfolg

Bei der automatisierten Datenaufnahme können die Daten ab der Inbetriebnahme aufgenommen und ausgewertet werden. Dies bietet zudem den Vorteil, auftretende Startschwierigkeiten schnell zu finden und zu beheben. Zur Auswertung der Daten als Vertragsbestandteil im Rahmen der Abnahme gibt es einerseits die Möglichkeit, vorab einen Zeitraum (z. B. 5 Betriebstage, 3 Monate nach Inbetriebnahme) festzulegen, dessen Auswertung dann maßgeblich für die Abnahmeentscheidung ist.

Eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Alternative besteht darin, eine **Bedingung** festzulegen, wie beispielsweise: „Die Leistungsverfügbarkeit erfüllt fünf Betriebstage lang durchgängig die Anforderungen“. Tritt dieser Fall ein, ist die Anlage automatisch



abgenommen. Es sollte in diesem Fall vor Beginn eine Frist (z. B. 3 Monate) festgelegt werden, innerhalb der die Bedingung erfüllt werden muss. Da die Anlage innerhalb dieser Zeit unter besonderer Beobachtung steht, ist es wahrscheinlich, dass die wesentlichen üblicherweise auftretenden Startprobleme gefunden und abgestellt werden können. Ist die Anlage trotzdem nicht in der Lage die Anforderungen zu erfüllen, liegen möglicherweise grundsätzliche Mängel vor (z. B. veränderte Randbedingungen von Betreiberseite oder Konstruktionsfehler von Lieferantenseite), die dann in einem gesonderten Verfahren behandelt werden müssen.

Entscheiden sich die Vertragspartner für die manuelle und visuelle Datenaufnahme, wird wie bisher ein Testzeitraum vorab vereinbart. In diesem Fall bleibt allerdings die Gefahr, dass aufgrund der kurzen Testzeit die tatsächliche Leistungsverfügbarkeit nicht korrekt ermittelt werden kann, da statistische Zufälle (überdurchschnittlich wenige oder viele Ausfälle) die Aussage verfälschen. Ein erfolgloser Test sollte dann zu fair aufgeteilten Lasten wiederholt werden.

Grundsätzlich wird zum Test über Bedingung geraten, da hier bei relativ geringen Kosten über eine längere Dauer beobachtet wird und so ein vergleichsweise sicheres Ergebnis erzielt werden kann.

### 8.3 Anwendung am Beispiellager

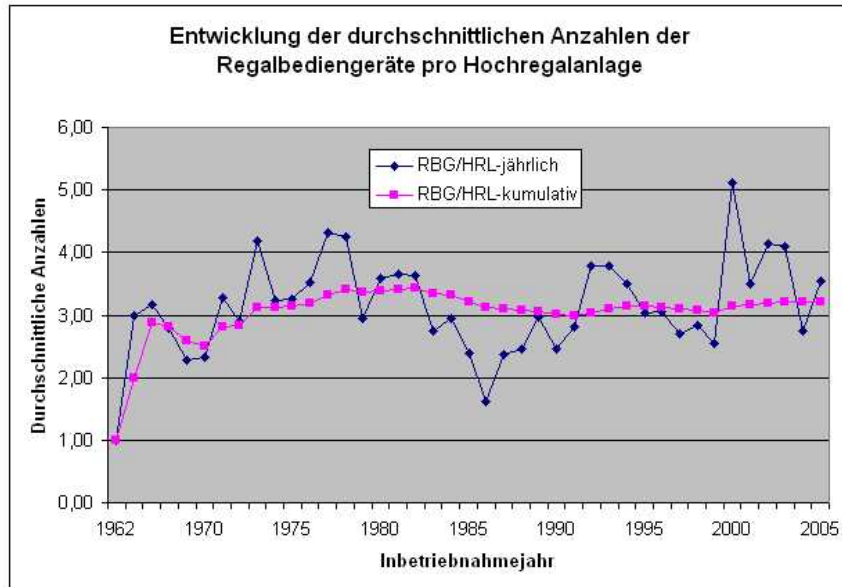
Die Richtlinie zur Leistungsverfügbarkeit wurde vor allem in Hinblick auf große, weitverzweigte Intralogistikanlagen erstellt. Das Fachgebiet Fabrikbetrieb der Fakultät Maschinenbau an der Technischen Universität Ilmenau verfolgt seit 1962 die Entwicklung der Lagerlandschaft in Deutschland. Es werden detaillierte Daten über alle in Deutschland installierten Hochregallager gesammelt und ausgewertet [TU 05]. Diese Auswertungen haben gezeigt, dass die durchschnittliche Gassenzahl pro Lager seit Jahren vergleichsweise stabil zwischen drei und vier Gassen mit je einem Regalbediengerät liegt, vgl. Abbildung 8.4, und damit ein eher kleiner Lagertyp vorherrscht.

Bei den herkömmlichen Abnahmetest der technischen Verfügbarkeit wächst der Aufwand mit der Zahl der Anlagenelemente, da die Ausfallzeiten für jedes Element separat berücksichtigt werden. Bei der Leistungsverfügbarkeit dagegen ist nicht die die Anzahl der Elemente entscheidend, sondern vorrangig die Anzahl und Beschaffenheit der Schnittstellen. An einem Beispiel wird nun aufgezeigt, wie die vorgestellten Planungs- und Testprozeduren auch bei einem vergleichsweise kleinen Lager ohne Einschränkungen durchgeführt werden können. Dabei wird insbesondere auf die in Kapitel 7.1, S. 86 vorgestellte vertragliche Trennung der Projektphasen eingegangen.

#### 8.3.1 Organisation

Für die Begleitung der Installation der neuen Anlage über alle drei Phasen (Planung, Lieferung/Montage, Inbetriebnahme) beauftragt der Betreiber ein erfahrenes Ingenieurbüro, die Projektbegleitung zu übernehmen. Die Aufgaben der Projektbegleitung sind dabei im Wesentlichen:

- Unterstützung des Betreibers bei der Auswahl geeigneter Partner (Planer, Lieferanten,



**Abbildung 8.4** Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl von Regalbediengeräten pro Hochregallager [TU 05]

Inbetriebnahmedienstleister)<sup>59</sup>.

- Herstellung eines Klimas der vertrauensvollen Zusammenarbeit aller Beteiligten, u. a. durch Sicherstellung des termingerechten Flusses aller benötigten Informationen.
- Aufklärung des Betreibers, der tendenziell wenig Erfahrung bei Anlagenneuein-  
stallation hat, über die zu erwartenden Folgen der getroffenen Entscheidungen<sup>60</sup> und  
frühzeitige Information über die nötigen zusätzlichen Personalkapazitäten für die  
Dauer des gesamten Installationsprojekts.
- Unterstützung des Betreibers bei einer angemessenen Informationspolitik gegenüber  
dem Betreiberpersonal, um Ängsten und Befürchtungen frühzeitig zu begegnen, vgl.  
Kapitel 4.2.4, S. 45.

Die Vergütung der Projektbegleitung wird für alle drei Phasen separat festgelegt und erfolgt nach erfolgreichem Abschluss der jeweiligen Phase. Die vertragliche Ausgestaltung steht in der Praxis den Beteiligten selbstverständlich frei. An dieser Stelle sollen nur die wesentlichen Punkte des neuen Ablaufkonzepts verdeutlicht werden.

### 8.3.2 Planungsphase

Nach entsprechender Ausschreibung beauftragt der Betreiber mit Unterstützung der Projektbegleitung einen geeigneten Planungsdienstleister mit der Planungsphase. Die Aufgabe ist, den Ist-Zustand des Betreibers zu analysieren und die Anforderungen mit den herrschenden Rahmenbedingungen des Betreibers heraus zu arbeiten und zu defi-

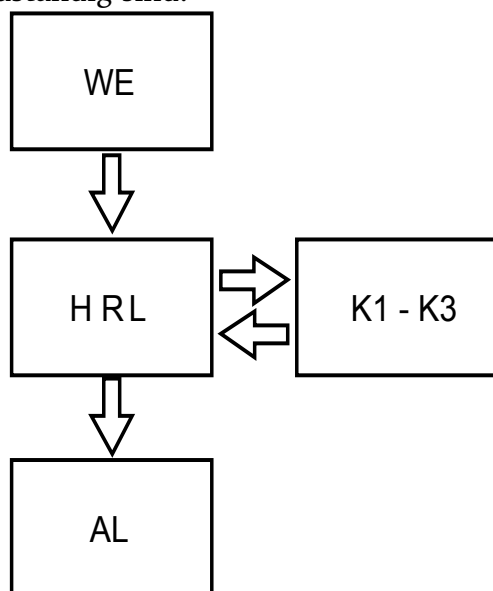
<sup>59</sup>Dabei ist es möglich, dass das mit der Projektbegleitung beauftragte Ingenieurbüro die Aufgaben einer oder mehrerer Phasen übernimmt. Dann ist allerdings besonders darauf zu achten, dass die jeweiligen Aufgaben und Verantwortlichkeiten sauber definiert und von einander abgegrenzt werden.

<sup>60</sup>Z. B. über die Auswirkungen von vereinbarten Randbedingungen, um dem Betreiber auf evtl. zu erwartende Diskrepanzen zwischen erlebter und gemessener Kennwerte hinzuweisen, vgl. Tabelle 4.6, S. 51.

nieren. Dabei ist insbesondere die Definition der Leistungsverfügbarkeitsanforderungen an den Schnittstellen von herausragender Bedeutung. Ziel der Phase ist die Erstellung des Pflichtenhefts und die Vorauswahl geeigneter Layouts - gestützt auf die Ergebnisse der Prognose. Aufgrund der entscheidenden Bedeutung der Planung für die erfolgreiche Durchführung der nachfolgenden Phasen können, evtl. mit Teilzahlungen belegte, Gewährleistungspflichten des Planers bis zum Abschluss der Gesamtinstallation vereinbart werden. Die Durchführung der Planungsphase wird in den folgenden Abschnitten 8.3.2 bis 8.3.2 dargestellt.

### Basisdaten, Materialfluss und Anforderungen

Es soll ein Palettenlager zur Versorgung der Montageabteilung installiert werden. Die Planung soll eine Erweiterungsstufe vorsehen. Das Geschäftsziel des Auftraggebers ist die auftragsgerechte Montage und der ebenso auftragsgerechte Versand der Produkte (160 - 200 Produkte pro Tag, nach Erweiterung 240 - 300 Produkte pro Tag). Für die Hochregalanlage (HRL) folgt daraus das primäre Ziel, zwei, bzw. nach der Erweiterung drei Kommissionierarbeitsplätze (K1-K3) auftragsgerecht zu versorgen und die Auftragspaletten termingerecht für die Montage am Auslagerpunkt (AL) bereit zu stellen. Ein nachrangiges Ziel ist die Aufnahme der am Wareneingang (WE) angelieferten Warenpaletten. Die Anlage arbeitet in zwei Schichten mit insgesamt 16 Stunden. Die Warenpaletten der verschiedenen Artikel werden gleichmäßig über alle Gassen hinweg eingelagert, sodass im Störfall einer Gasse weiterhin der Zugriff auf die benötigten Artikel gegeben ist. Die Auslagerungen folgen der FiFo-Strategie. Nach längeren Havarien sollte eine Wiederanlaufstrategie greifen, die einen weiteren Leistungsabfall nach Wiederinbetriebnahme verhindert (vgl. [Wil10]). Für die Instandhaltung sind während der Betriebszeit durchgängig zwei Mitarbeiter vor Ort, die allerdings auch für die Produktionsanlagen zuständig sind.



Der Wareneingang wird unregelmäßig von ankommenden Lastkraftwagen beliefert. Der Mitarbeiter am Wareneingang ist auch mit anderen Aufgaben betraut, er teilt sich die Arbeit selbstständig ein. Allerdings müssen zum Schichtende, also nach 8 und nach 16 Stunden, alle bis dahin angelieferten Paletten auf die Fördertechnik aufgeben sein. Die Leistungsverfügbarkeit misst sich demnach an den nicht aufgegebenen Paletten gemäß Gleichung (7.6) bezogen auf die bis zum jeweiligen Schichtende insgesamt angelieferten Stück.

Abbildung 8.5 Materialfluss, schematisch

Für die Kommissioniermitarbeiter entsteht Wartezeit, wenn die geforderte Warenpalette nicht bereitsteht, oder die fertige Kundenpalette nicht weggefördert werden kann. Die

Leistungsverfügbarkeit berechnet sich nach Gleichung (7.5). Die Auslagerungen erfolgen relativ gleichmäßig über den Tag. Der Mitarbeiter entnimmt die Paletten vom Auslagerstich und transportiert sie manuell direkt zum jeweiligen Montagearbeitsplatz. Es entsteht Wartezeit, wenn nach der letzten Auslieferung keine Auslagerpalette bereitsteht.

Der geplante Materialfluss wird schematisch in Abbildung 8.5 dargestellt und in Tabelle 8.4 quantifiziert.

**Tabelle 8.4** Materialflussmatrix: Transportierte Paletten in der Basisauslegung, in Klammern die Materialflusszahlen nach der Erweiterung

	WE	HRL	K1	K2	(K3)	AL	Summe
WE	-	12 (18)					12 (18)
HRL		-	30	30	(30)	12 (18)	72 (108)
K1		30	-				30
K2		30		-			30
(K3)		(30)			-		(30)
AL						-	0
Summe	0	72 (108)	30	30	(30)	12 (18)	144 (216)

Die Leistungsverfügbarkeit (IV) des Lagers wird an den Arbeitsplätzen Wareneingang, Kommissionierarbeitsplätze und Auslagerpunkt gemessen, die Anforderungen sind in Tabelle 8.5 zusammengefasst.

**Tabelle 8.5** Anforderungen an den Schnittstellen

Arbeitsplatz	Gleichung	Messzeit	Toleranz	Soll-IV
WE	7.6	zum Schichtende	max. 3 Stück	97%
K1, K2, (K3)	7.5	pro Stunde	max. 2 min	96,7%
AL	7.5	pro Stunde	max. 1 min	98,3%

Die letzte Lieferung der Schicht muss spätestens 90 Minuten vor Schichtende angekommen sein, sonst werden verspätet eingelagerten Paletten nicht für die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit gewertet. Gibt es keine offenen Aufträge, werden Wartezeiten bis 10 Minuten nach Eingabe des nächsten Auftrages nicht gewertet. Da nur wenige Paletten mit Plastikfolien gesichert werden, wird hierauf keine besondere Rücksicht genommen. Bleibt trotzdem ein Regalbediengerät wegen flatternder Folie stehen, ist dies durch die Kapazitätsreserven des Lagers und der ständigen Bereitschaft der Instandhaltungsmitarbeiter akzeptabel; diese Störungsart hat demnach keinen Einfluss auf die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit.

### Die Auslegung der Anlage

Bei allen Varianten wird der Einlagerstich zwischen Wareneingang und Hochregallager und der Auslagerstich zwischen Hochregallager und dem Warenausgang, sowie die Zu- und Abförderung zu/von den Regelbediengeräten bzw. Arbeitsplätzen mit Stetigförderertechnik realisiert<sup>61</sup>. Für die Vorzone stehen zur Auswahl:

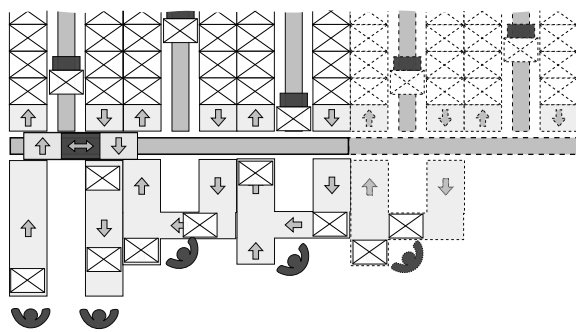
<sup>61</sup>Da diese Elemente für alle Varianten gleich sind, wird im Folgenden nicht weiter darauf eingegangen. Für die Berechnungen wurden sie allerdings berücksichtigt, vgl. Anhang B.1.1, S. 144.

1. Ein Verfahrwagen (VW), dessen Schiene bei Erweiterung verlängert wird, vgl. Abbildung 8.6
2. ein fahrerloses Transportsystem (FTS), für das bei Erweiterung zusätzliche Fahrzeuge verwendet werden, vgl. Abbildung 8.7
3. ein Stetigfördertechniksystem (StetigFT), das bei Erweiterung auf die neue Geometrie verlängert wird, vgl. Abbildung 8.8<sup>62</sup>

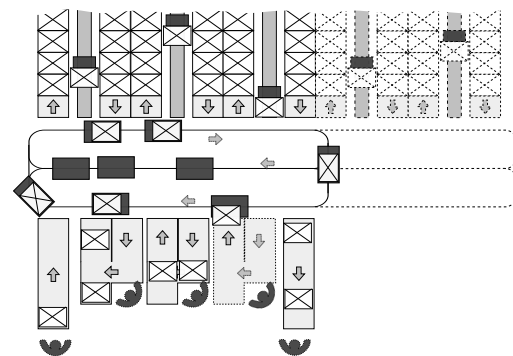
Zur Berechnung der kritischen Ausfallzeit werden die Anforderungen aus Tabelle 8.5 in die Gleichungen (8.5) bzw. (8.6) eingesetzt. Die Prognoseparameter für die Regalbediengeräte und die jeweilige Verteiltechnik sind in Tabelle 8.6 aktualisiert zusammengestellt<sup>63</sup>.

**Tabelle 8.6** Berechnungsparameter

Element	Wareneingang				Kommissionierung			Auslagerung			
	$R_i$	$K_{ix}$	$P_{ix}$ [min]	$L_{ix}$ [min]	$R_i$	$K_{ix}$	$P_{ix}$ [min]	$R_i$	$K_{ix}$	$P_{ix}$ [min]	
Verfahrwagen	RBG	0,2	2,1	21,6	125,7	0,2	2,1	14,4	0,2	2,1	54,0
	erweitert	0,1	1,1	15,2	21,8	0,1	1,1	15,2	0,1	1,1	38,0
	VW	1	4,4	10,0	185,5	1	4,4	6,0	1	4,4	25,0
	erweitert	1	1,1	6,7	21,8	1	1,1	6,0	1	1,1	16,7
FTS	RBG	0,2	2,1	25,2	125,7	0,2	2,1	18,0	0,2	2,1	63,0
	erweitert	0,1	1,8	17,7	107,8	0,1	1,8	22,8	0,1	1,8	44,3
	FTS	0,3	2,6	17,5	147,4	0,3	2,6	10,5	0,3	2,6	43,8
	erweitert	0,1	1,8	12,4	107,8	0,1	1,8	11,1	0,1	1,8	30,9
Stetig-FT	RBG	0,2	2,1	28,8	125,7	0,2	2,1	21,6	0,2	2,1	72,0
	erweitert	0,1	1,6	30,3	96,0	0,1	1,7	38,0	0,1	1,7	50,6
	FT	1	2,5	10,0	144,9	1	2,5	6,0	1	2,5	25,0
	erweitert	1	1,7	6,7	96,0	1	1,7	6,0	1	1,7	16,7



**Abbildung 8.6** Das Lager mit Verfahrwagen



**Abbildung 8.7** Mit Fahrerlosem Transportsystem

<sup>62</sup>Zur Verdeutlichung des Einflusses der Auslegung auf die Leistungsverfügbarkeit werden nur die Kapazitätsanforderungen für den Materialfluss berücksichtigt. Weitere Rahmenbedingungen wie beispielsweise die Aufladezeiten der Batterien der Fahrerlosen Transportfahrzeuge oder die Anforderungen an die Steuerung werden hier außer Acht gelassen.

<sup>63</sup>Ein mögliches Vorgehen zum Ermitteln der Parameter ist im Anhang B.1.1 dargestellt.

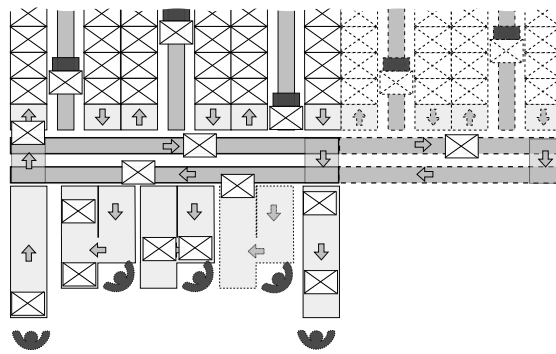


Abbildung 8.8 Mit Stetigfördertechnik

**Prognoseergebnis**

Die kritischen Ausfallzeiten werden für die Regalbediengeräte (RBG) in Abbildung 8.9 und die Verteiltechnik in Abbildung 8.10 für die drei Schnittstellen Wareneingang, Kommissionierarbeitsplätze und Warenausgang dargestellt. Für alle drei Varianten wird nach Basisauslegung und Auslegung inkl. Erweiterung unterschieden.

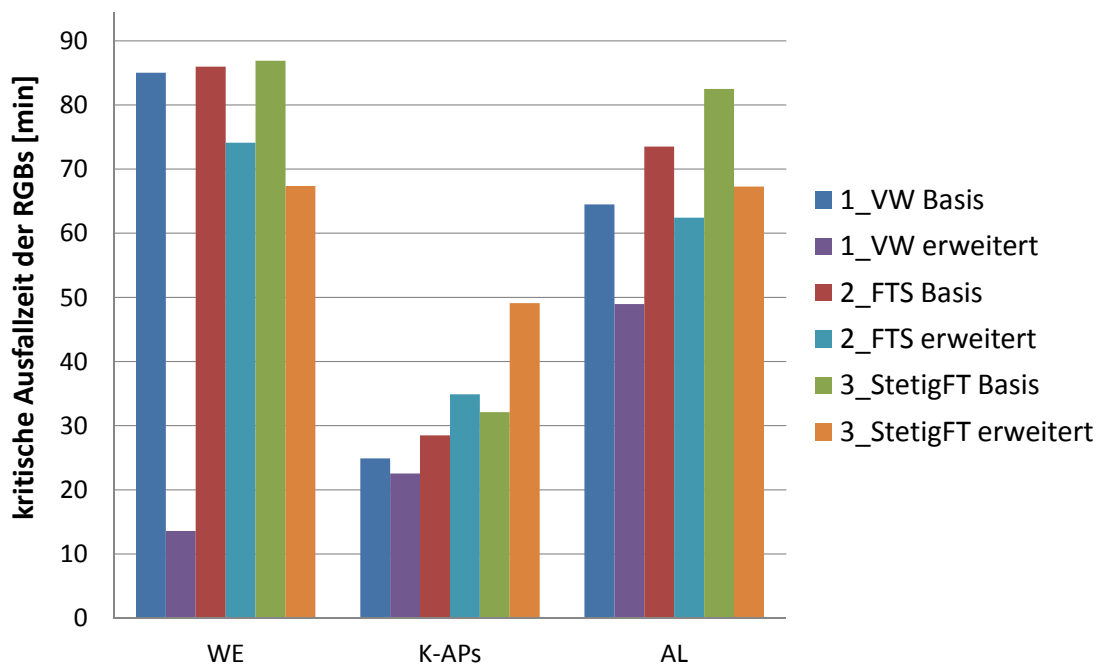
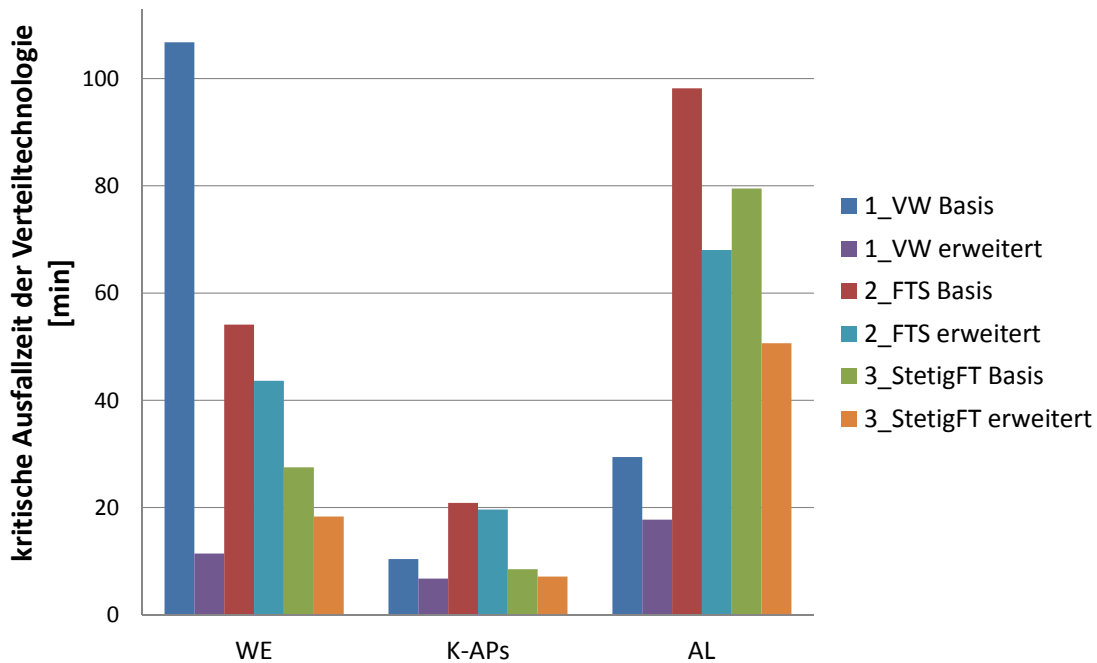


Abbildung 8.9 Kritische Ausfallzeiten der Regalbediengeräte in [min] an Wareneingang (WE), Kommissionierarbeitsplätzen (K-APs) und Auslagerung (AL)

Es wird deutlich, dass die Kommissionierarbeitsplätze am anfälligsten für Störungsauswirkungen sind. Durch die Erweiterung verändern sich die Werte am stärksten beim Verfahrenswagen hin zu deutlich kürzeren kritischen Ausfallzeiten, da dieser einen Großteil seiner Reservekapazität einbüßt. Bei Ausfällen der Regalbediengeräte hat die Stetigfördertechnik bedingt durch ihre zusätzliche Pufferfunktion die größte Möglichkeit, Störungen zu überbrücken. Bei einem Ausfall der Verteiltechnik ist das Lager mit dem fahrerlosen Transportsystem aufgrund der hohen Redundanz am tolerantesten gegenüber Ausfällen.



**Abbildung 8.10** Kritische Ausfallzeiten der Verteiltechnik in [min] an Wareneingang (WE), Kommissionierarbeitsplätzen (K-APs) und Auslagerung (AL)

### 8.3.3 Liefer- und Montagephase

Mit dem Pflichtenheft und den über die Prognose gewonnenen Erkenntnissen zu den Layoutvorschlägen erfolgt die Ausschreibung der Anlage. Unterstützt von der Projektbegleitung beauftragt der Betreiber einen geeigneten Systemlieferanten mit der Produktion, der Lieferung und der Montage der Anlage. Nach erfolgreichen Funktions- und Leistungstests der Systemkomponenten sowie Integrationstests der Gesamtanlage wird die technische Anlage abgenommen<sup>64</sup> und die Inbetriebnahmefähigkeit erklärt. Gleichzeitig beginnt die Gewährleistung und findet der Gefahrenübergang statt.

### 8.3.4 Inbetriebnahmephase

Parallel zur Liefer- und Montagephase wird ein erfahrener Dienstleister beauftragt, die Inbetriebnahmephase zu planen und zu koordinieren.

#### Anlagenhochlauf

Zur Planung des Anlagenhochlaufs benötigt der Inbetriebnahmebegleiter Informationen über die vorhandenen Personalkapazitäten, dessen Qualifikationsniveaus und den Ansprüchen der neuen Anlage an das Bedien- und Wartungspersonal. Darauf aufbauend wird ein angemessenes Schulungskonzept erstellt und durchgeführt. In vielen Fällen ist es sinnvoll, die neue Anlage nicht sofort mit der kompletten Auftragslast zu betreiben, sondern schrittweise von der vorher betriebenen Lösung auf die neue Anlage umzusteigen. Für

<sup>64</sup>Im Unterschied zum herkömmlichen Vorgehen wird nur die technische Anlage abgenommen, nicht das Gesamtprojekt.

den zeitlich begrenzten gleichzeitigen Betrieb von alter Lösung und neuer Anlage müssen zusätzliche Material- und Personalkapazitäten organisiert werden.

Nach Abschluss der Hochlaufphase, vollständiger Ablösung der Vorgängerlösung und dem Erreichen eines stabilen Niveaus der Leistungsverfügbarkeit folgt deren Messung und Nachweis.

### Messung der Leistungsverfügbarkeit

Um die Leistungsverfügbarkeit ermitteln zu können werden am Wareneingang die Anzahl  $N$  der pro Schicht angelieferten Paletten, die Anzahl  $n$  der nicht eingelagerten Paletten, der Zeitpunkt der letzten Anlieferung und dessen Liefermenge in Paletten benötigt.

Für die Kommissionierarbeitsplätze und die Auslagerung werden die Start- und Endzeitpunkte der Wartezeiten und der Pausenzeiten benötigt, sowie die Anzahl der offenen Aufträge im System.

Zur Überprüfung der Leistungsverfügbarkeit werden die Daten automatisiert aufgenommen. Im Wareneingang werden dazu die Lieferdaten der elektronischen Lieferscheine ausgewertet. Beim Einlagern werden die Paletten über einen Scanner erfasst. Die Anzahl der eingelagerten Paletten ist demnach bekannt. Aus der gelieferten Menge und der Menge der eingelagerten Paletten kann so zu den gewünschten Zeitpunkten die Menge der unpünktlichen Paletten ermittelt werden. Wartezeiten beginnen entweder, wenn der Bereitstellungsplatz an den Arbeitsplätzen bzw. der Auslagerung länger als 10 Sekunden leer ist oder der Pufferplatz nach den Arbeitsplätzen länger als 2 Minuten belegt bleibt. Die Anzahl der offenen Aufträge ergeben sich aus dem Materialflusssystem.

Der Nachweis des erforderlichen Leistungsverfügbarkeits erfolgt über die Definition einer Bedingung, vgl. Abschnitt 8.2.4, S. 106: Die Inbetriebnahmephase gilt als erfolgreich beendet, sobald die Leistungsverfügbarkeitsanforderungen an allen Schnittstellen an 5 aufeinanderfolgenden Betriebstagen erfüllt sind. Gleichzeitig endet damit das Gesamtprojekt der Anlageninstallation.

### 8.3.5 Vergleich (technische) Verfügbarkeit - Leistungsverfügbarkeit

Für die Auslegungsvariante mit Verfahrwagen (vgl. Abb. 8.6) wird die technische Verfügbarkeit mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren ermittelt und mit den zu erwartenden Werten der Leistungsverfügbarkeit verglichen. Die festgelegten Gewichtungsfaktoren und die Verfügbarkeitswerte der Gesamtanlage sind in Tabelle 8.7 zusammengefasst, bei einer jeweils zehnminütigen Störung bezogen auf eine Stunde Beobachtungszeit.

**Tabelle 8.7** Gewichtungsfaktoren des Lagers mit Verfahrwagen

Element	Gewichtungsfaktoren		Anlagenverfügbarkeit	
	Basis	erweitert	Basis	erweitert
Ein- und Auslagerstich	1	1	83,3%	83,3%
Verfahrwagen	1	1	83,3%	83,3%
RBGs	0,33	0,2	94,5%	96,7%
Fördertechnik zu / ab RBG	0,33	0,2	94,5%	96,7%
Fördertechnik zu / ab AP	0,5	0,33	91,7%	94,5%



Der Ausfall des Ein- bzw. Auslagerstiches hat demnach dieselbe starke Auswirkung auf die Anlagenverfügbarkeit, wie der Ausfall des Verfahrwagens, unabhängig ob in der Basisvariante oder erweitert. Bei den anderen Elementen nimmt der Einfluss eines Ausfalls auf die Anlagenverfügbarkeit mit der Erweiterung ab. Im Vergleich dazu zeigt Tabelle 8.8 die zu erwartenden Auswirkungen derselben Störungen auf die Schnittstellen.

**Tabelle 8.8** Störungsauswirkungen auf die Schnittstellen

Element	Einlagerung unpünktliche Paletten		Kommissionierung Wartezeit		Auslagerung Wartezeit	
	Basis	erweitert	Basis	erweitert	Basis	erweitert
Einlagerstich	5	8	-	-	-	-
Auslagerstich	-	-	-	-	10	10
Verfahrwagen	-	8	-	11	-	-
RBG	-	-	-	-	-	-
FT zu/ ab RBG	-	-	-	-	-	-
FT zu/ ab AP	-	-	10	10	-	-

Es wird deutlich, dass die Informationen über die Störungsauswirkungen nach dem Konzept der Leistungsverfügbarkeit detaillierter sind, als der Wert der Anlagenverfügbarkeit. Die Störungen am Ein- bzw. Auslagerstich, haben nur Auswirkungen an den jeweiligen Schnittstellen. Eine Störung am Verfahrwagen zeigt deutliche Auswirkungen am Wareneingang und den Kommissionierarbeitsplätzen. Die Tatsache, dass die Auswirkung mit 11 Minuten Wartezeit länger ist als die zehnmündige Störung, erklärt sich hier daraus, dass die Summe der drei Arbeitsplätze berechnet wird. Aber auch bei einer einzelnen Schnittstelle ist es grundsätzlich möglich, dass die Störungsauswirkung aufgrund der entstandenen Warteschlange gravierender ist als die Störung selbst. Die Störung an der Zu- bzw. Abförderung eines Arbeitsplatzes schlägt sich direkt in der Wartezeit nieder, alle anderen Schnittstellen haben keine Auswirkungen zu erwarten.

## 8.4 Zusammenfassung Kapitel 8

Die Prognosemethode wurde konzipiert, um den Einfluss von Ausfällen der Komponenten auf die Leistungsverfügbarkeit einer geplanten Anlage abzuschätzen und Vergleiche zwischen verschiedenen Varianten zu ziehen. Außerdem kann der Bedarf von zusätzlichen Komponenten zur Verbesserung der zu erwartenden Leistungsverfügbarkeit deutlich gemacht werden. Es wird allerdings erneut darauf hingewiesen, dass es nicht zulässig ist, die Leistungsverfügbarkeit einer bestehenden Anlage aus den Störungsdaten mit den vorgestellten Abschätzungsgleichungen hochzurechnen. Hierfür gilt alleine das Messergebnis an den Schnittstellen.

Folgt man den Empfehlungen der Richtlinie muss zunächst der anfallende Aufwand für die Definition der Bedürfnisse des Betreibers, der Randbedingungen und des Berechnungsalgorithmus investiert werden. Anschließend kann man jedoch davon ausgehen, dass der Aufwand für die Abnahme deutlich geringer ist, als für die Abnahme der herkömmlichen störungszeitbasierten Verfügbarkeit.

Das Konzept der Leistungsverfügbarkeit ist geeignet, auch bei kleinen Lageranlagen die

Bedürfnisse des Betreibers abzubilden und auf die Erfüllung der vereinbarten Werte zu testen.

Das Konzept der Aufteilung in drei klar definierte Projektphasen, begleitet von einer umfassenden Projektbegleitung, kann maßgeblich zum Erfolg einer Neuinstallation beitragen: Die Zusammenarbeit aller Beteiligten wird durch funktionierenden Informationsfluss verbessert, die typischen Herausforderungen einer Anlageninstallation werden frühzeitig verdeutlicht und transparent gemacht werden und insbesondere auf die Anforderungen der Inbetriebnahmephase wird ein angemessener Schwerpunkt gelegt.

---

## 9 Bewertung des Kennwerts

Zur Bewertung des Kennwerts „Leistungsverfügbarkeit“ und des dahinterstehenden Konzepts zur Beurteilung von neuinstallierten Intralogistikanlagen sind im Wesentlichen drei Methoden denkbar: Die Erprobung in der Praxis, die Beurteilung durch Experten und die Untersuchung mit Hilfe von Simulationsstudien. Die Erprobung in der Praxis ist schon allein durch die zeitliche Dimension von Planung und Installation einer Anlage im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar. Da der Kennwert von ausgewiesenen Experten aus Wissenschaft und Praxis entwickelt wurden, ist von einer Beurteilung durch weitere Experten kein nennenswerter Erkenntnisgewinn zu erwarten. Es bleibt die Möglichkeit der Simulationsuntersuchung, von der im folgenden Kapitel Gebrauch gemacht wird.

Vorgestellt und ausgewertet werden die Simulation von Christoph Meurer und Steffen Nebel, deren Ergebnis bereits im Rahmen eines Tagungsbeitrags veröffentlicht wurden [Meu08, MSNB09] sowie die ausführliche Untersuchungen von Marie Nagel, die im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt wurde [Nag10] und deren Daten hier ausgewertet werden.

### 9.1 Vorstudien über die grundsätzliche Berechtigung des Kennwerts Leistungsverfügbarkeit

#### 9.1.1 Simulation durch Christoph Meurer

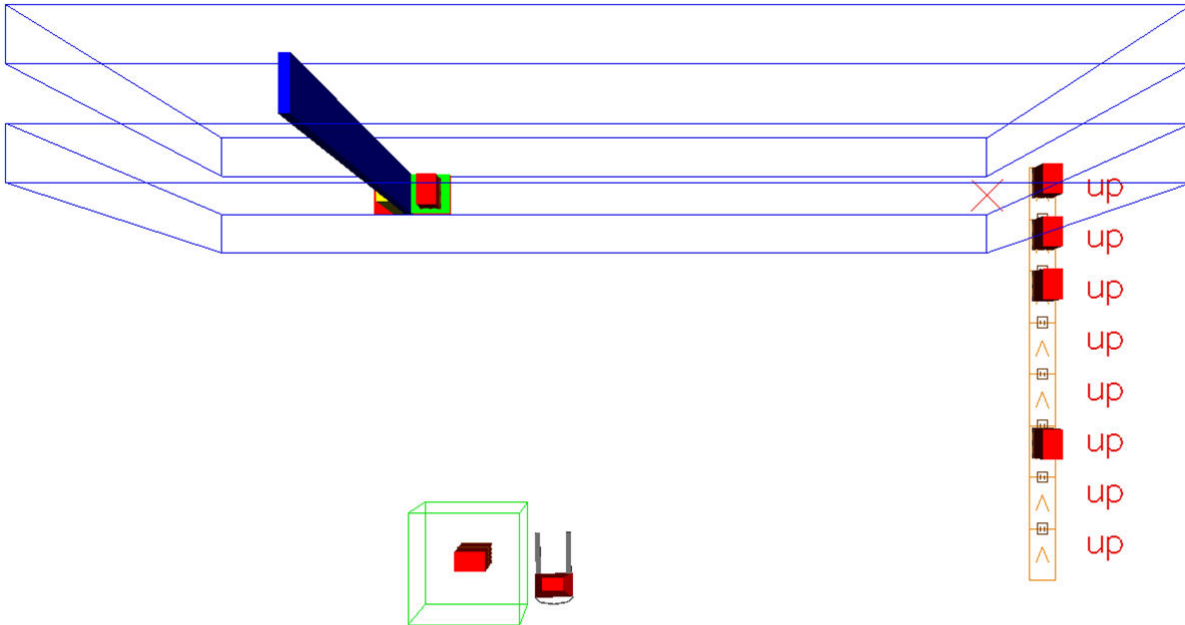
Der Kennwert Leistungsverfügbarkeit wurde bereits in einem sehr frühen Stand seiner Ausarbeitung von Herrn Dr. Meurer<sup>65</sup> auf dem Kongress der FEM (vgl. Kapitel 2.1.3, S. 14) im September 2008 in Cannes vorgestellt [Meu08], um eine gute Zusammenarbeit der Verbände zu gewährleisten. Im Rahmen dieser Präsentation wurden anhand eines schematischen Simulationsexperiments die wichtigsten Charaktereigenschaften des Kennwerts demonstriert.

Dafür wurde ein Einlagervorgang simuliert, bei dem ein Staplerfahrer die Aufgabe hat, die angelieferten Paletten auf die Fördertechnik zu setzen. Die Fördertechnik, eine staubare Palettenrollenbahn mit einer Pufferkapazität von acht Paletten, transportiert die Paletten zu einem Übergabepunkt, wo sie von einem Regalbediengerät übernommen und in das Lager eingelagert werden, Abbildung ?? zeigt die Situation aus der Vogelperspektive. Untersucht wurden die Auswirkungen von Störungen an der Fördertechnik auf den Staplerfahrer, da sich für den Einlagervorgang die Leistungsverfügbarkeit aus der Wartezeit am Einlagerpunkt berechnet. Die Simulation hatte den Zweck, die Unterschiede zwischen technischer Verfügbarkeit und Leistungsverfügbarkeit zu demonstrieren und

---

<sup>65</sup>Herr Dr. Meurer war der Leiter der Arbeitsgruppe „Leistungsverfügbarkeit“ des VDI-Fachausschusses „Zuverlässigkeit in der Intralogistik“ in dem die VDI-Richtlinie „Leistungsverfügbarkeit“ erarbeitet wurde.

die grundsätzliche Eignung der Leistungsverfügbarkeit zur Beurteilung intralogistischer Anlagen zu zeigen.



**Abbildung 9.1** 3D-Animation der untersuchten Einlagerung, oben: Regelbediengerät zwischen zwei angedeuteten Lagerregalen, rechts: Fördertechnik mit einer Pufferkapazität von 8 Paletten, derzeit alle funktionsfähig („up“), mit vier Paletten belegt, unten: Quelle der Paletten, rechts daneben der Stapler, nach [Meu08, S. 10] [MSNB09, S. 310]

Bei den Simulationsläufen wurden unterschieden, ob der erste Antrieb direkt nach der Palettenaufgabe oder der letzte Antrieb direkt vor dem Regalbediengerät gestört war. Für beide Fälle wurden je 14 Simulationsläufe durchgeführt. Verändert wurde dabei jeweils die Störungsdauer, die innerhalb der Simulationsläufe nicht variierte. Sie steigt von 200 Sekunden im ersten Versuch in 100 Sekundenschritten bis auf 1.500 Sekunden an. Die Ausfallabstände wurden als exponentiell verteilt angenommen und derart eingestellt, dass die betrachteten Antriebe eine technische Verfügbarkeit von 98 % aufweisen sollten. Weil statistische Schwankungen zugelassen wurden und mit steigender Störungsdauer durch die feste Verfügbarkeitseinstellung die Störungsanzahl abnimmt, weicht die tatsächliche technische Verfügbarkeit der einzelnen Simulationsläufe von dem Planwert ab, der tatsächliche Verfügbarkeitswert wird pro Simulationslauf angezeigt. Die Dauern von Palettenaufgabe durch den Stapler und Einlagern durch das Regelbediengerät unterlag ebenfalls statistischen Schwankungen.

Tabelle 9.1 erklärt die Legende von Abbildung 9.2. Es werden die Simulationsergebnisse für die Leistungsverfügbarkeit (LV\_...) und die technische Verfügbarkeit (AV\_...) für alle Simulationsläufe dargestellt.

Während sich die Störung des Antriebs direkt nach der Palettenaufgabe (SEC1) sofort in einem Abfall der Leistungsverfügbarkeit niederschlägt, mildern die Pufferplätze zwischen Palettenaufgabe und gestörtem Element im anderen Fall (SEC8) die Auswirkungen

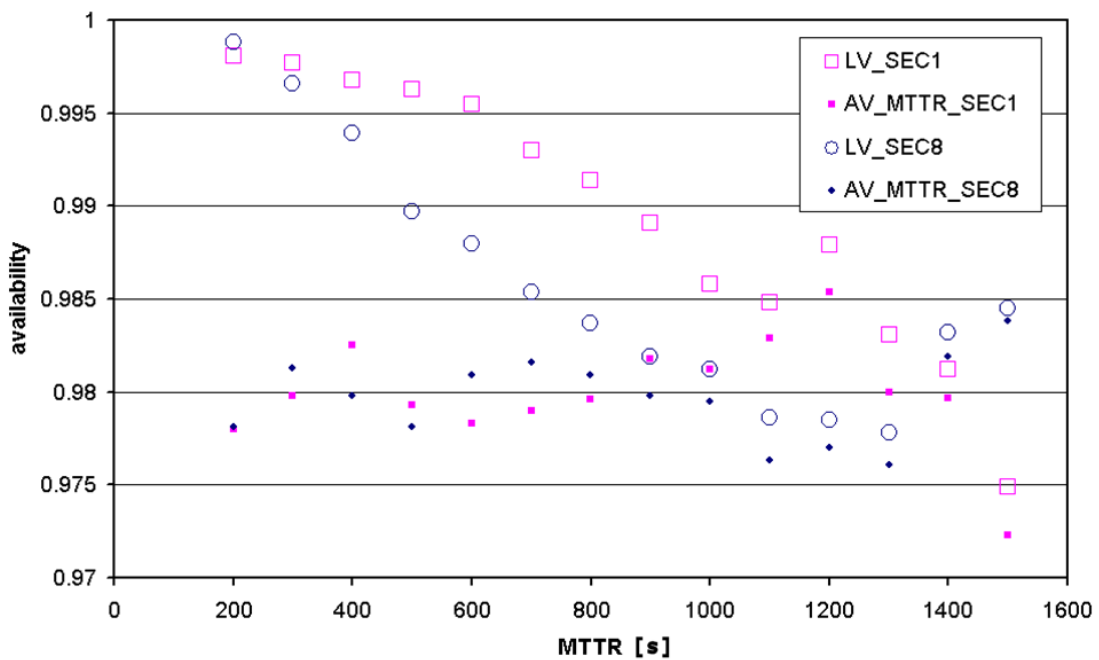


Abbildung 9.2 Simulationsergebnis der untersuchten Einlagerung, [Meu08, S. 12]

Tabelle 9.1 Legende für Abbildung 9.2

Beschriftung	gestörtes Element	Messwert
LV_SEC1	Antrieb am Regalbediengerät	Leistungsverfügbarkeit
AV_MTTR_SEC1	Antrieb am Regalbediengerät	technische Verfügbarkeit
LV_SEC8	Antrieb an Palettenaufgabe	Leistungsverfügbarkeit
AV_MTTR_SEC8	Antrieb an Palettenaufgabe	technische Verfügbarkeit

auf den Staplerfahrer deutlich. Außerdem werden die Leistungsreserven des Regalbediengeräts erkennbar: Die Punkte lässt sich durch eine abknickende Linie annähern, die bei  $MTTR = 600$  Sekunden abknickt: Vor dem Knick, bzw. bei Störungsdauern bis zu 600 Sekunden können die aufgestauten Paletten nach Behebung der Störung beschleunigt eingelagert werden, was die Wartezeit des Staplerfahrers nur langsam anwachsen lässt. Dauert die Störung länger als 600 Sekunden, ist die Leistungsreserve erschöpft und die Wartezeit nimmt mit fortschreitender Störungsdauer schneller zu, die Leistungsverfügbarkeit demnach schneller ab.

Aus diesem Ergebnis lässt sich ableiten, dass der Kennwert Leistungsverfügbarkeit prinzipiell in der Lage ist, das Erreichen der Geschäftsziele (Einlagern der Paletten bei guter Auslastung des Staplerfahrers) darzustellen und den jeweiligen Einfluss von installierten Puffern und Leistungsreserven, sowie die Instandhaltbarkeit (gemessen an der mittleren Reparaturdauer) angemessen zu berücksichtigen.

### 9.1.2 Simulation durch Steffen Nebel

Für einen Betrag der Tagung für Technische Zuverlässigkeit [MSNB09] wurde, unabhängig von der Ersten, ein weiteres Simulationsexperiment durchgeführt<sup>66</sup>. Es wurde wiederum der Einlagervorgang in ein Hochregallager modelliert und simuliert, wobei für die Parameter diesmal das Beispiel der VDI-Richtlinie Leistungsverfügbarkeit [VDI11, S. 6] aufgegriffen wurde. Verwendet wurden stochastische Netzverfahren, genauer gesagt eine höhere Klasse von Petrinetzen. Sie bilden eine einheitliche graphische und flexible Beschreibungsmöglichkeit für die Zustandsdiskrete Modellierung von Systemen. Betrachtet werden dabei Zustände und Zustandsübergänge. Sie eignen sich besonders für die Abbildung gleich- und nebenläufiger Prozesse und der Darstellung von kausalen Abhängigkeiten.

Ihre Analyse geschieht mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation, welche zudem eine Gegenüberstellung der technischen Verfügbarkeit mit der Leistungsverfügbarkeit erlaubt. Am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart werden sowohl für die Modellerstellung als auch für die Modellanalyse jeweils eigene Programme entwickelt, die vielfältige Möglichkeiten der Analyse und Optimierung Zustandsdiskreter Systeme bieten.

**Tabelle 9.2** Verteilungen

Vorgang	Verteilung
Anlieferung der Paletten	Erlangverteilung
Fahrzeiten Stapler	Normalverteilung
Einlagerung der Paletten	Normalverteilung
Lebensdauer Stapler	Weibullverteilung
Instandhaltungsdauern	Normalverteilung

Tabelle 9.2 listet die angenommenen Verteilungen der betrachteten stochastischen Vorgänge auf. Abbildung 9.3 zeigt einen Teil des erstellten Petrinetzmodells. Die Abfolge der einzelnen Prozessschritte (Anlieferung, Aufnahme mit dem Stapler, Aufsetzen auf den Aufgabepunkt und Einlagerung in das Hochregallager) sind darin als vertikale Kette von Modellierungselementen dargestellt, die von oben nach unten durchlaufen werden. Der Modellteil rechts davon summiert die auftretenden Wartezeiten, die inhärente Verfügbarkeit des Staplers bzw. der Einlagerung geht über die Modellierungselemente „Stapler verfügbar“ und „Einlagerung verfügbar“ mit in die Systemprozesse ein. Die Monte Carlo-Simulation über einen Zeitraum von 8 Stunden mit 10.000 Wiederholungen liefert mit den beispielhaft gewählten Parametern eine technische Verfügbarkeit des Staplers von 99,6 % bzw. 98,9 % für die Einlagerung. Die Leistungsverfügbarkeit erreicht dabei nur einen Wert von 96,6 %, d. h. die als gültig bewerteten aufsummierten Wartezeiten entsprechen 3,4 % des betrachteten Zeitraums. Da nur ein Simulationslauf und keine Parametervariation durchgeführt wurde, bestätigt diese Simulation im Wesentlichen nur die Aussage, dass technische Verfügbarkeit und Leistungsverfügbarkeit zwei verschiedene Kennwerte mit unterschiedlichem Informationsgehalt darstellen, vgl. [MSNB09, S. 312].

<sup>66</sup>Steffen Nebel, der für die Simulation verantwortlich war, war ebenfalls Mitglied des VDI-Ausschusses „Zuverlässigkeit in der Intralogistik“, der den Kennwert Leistungsverfügbarkeit entwickelte.

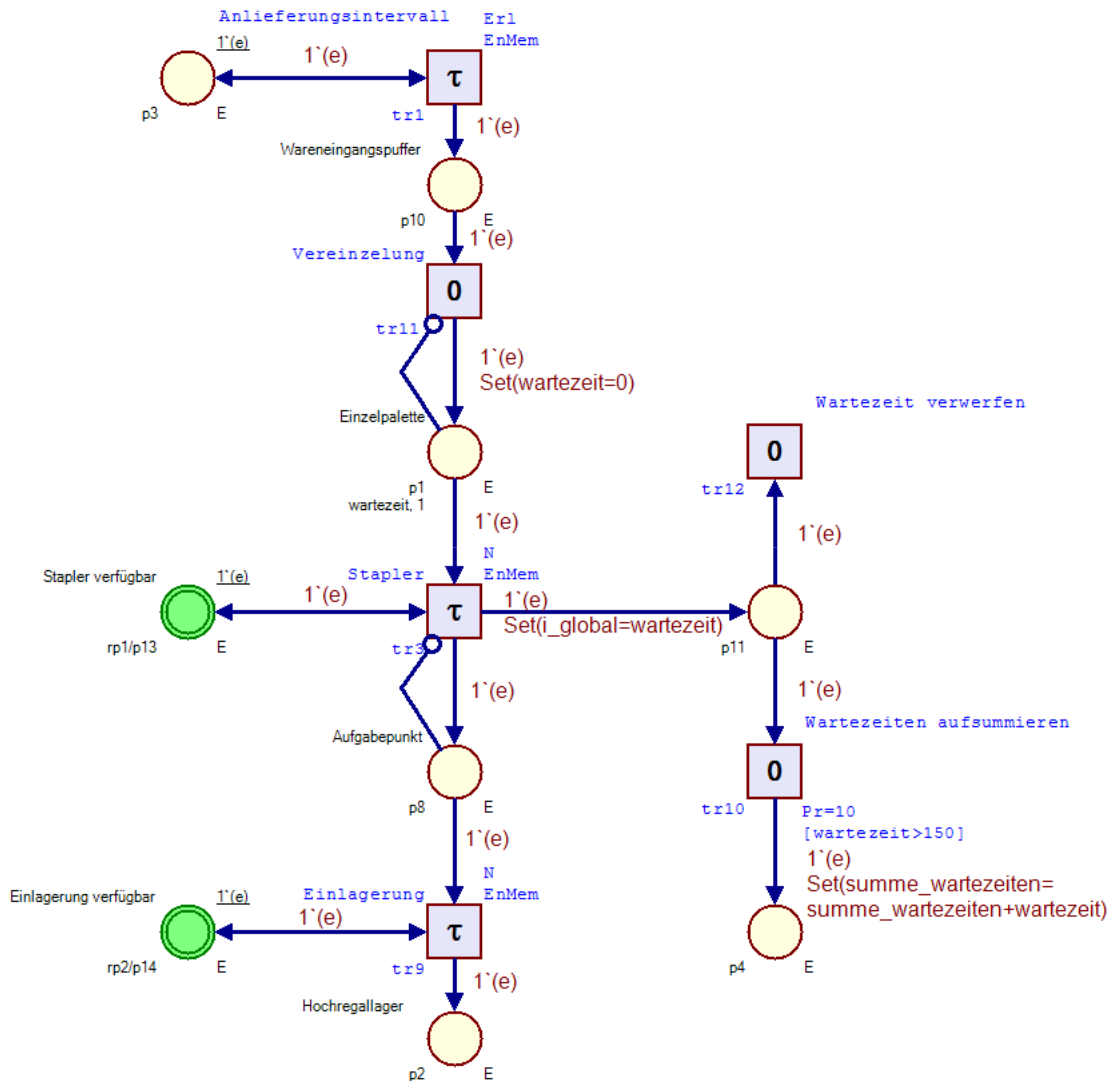


Abbildung 9.3 Ausschnitt eines farbigen Petrinetzmodells für die Analyse der Leistungsverfügbarkeit [MSNB09, S. 311]

## 9.2 Simulationsuntersuchungen einer Produktionsanlage durch Marie Nagel

Nach den beiden Simulationen eines Wareneingangsmodells wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit<sup>67</sup> [Nag10] eine vollständige Produktionsanlage modelliert. Sie war als Modellfabrik im Besitz der Fakultät für Maschinenbau der TU Ilmenau und diente der Demonstration der verketteten Produktion von individualisierten Produkten. Sie wurde Anfang 2010 demontiert, die Übertragung in ein validiertes Simulationsmodell ist aber noch vorhanden. Für die Untersuchung der Leistungsverfügbarkeit wurde dieses Simulationsmodell angepasst.

<sup>67</sup>Aufgabenstellung und Betreuung der Bachelorarbeit erfolgte durch die Autorin

### 9.2.1 Modellszenario

Die Halbzeuge werden am Wareneingangsarbeitsplatz auf Werkstückträger platziert und von dort auf einen geschlossenen Förderkreis transportiert. An diesem Förderkreis liegen verschiedene automatische Bearbeitungsstationen, der Handarbeitsplatz und schließlich der Versandarbeitsplatz.

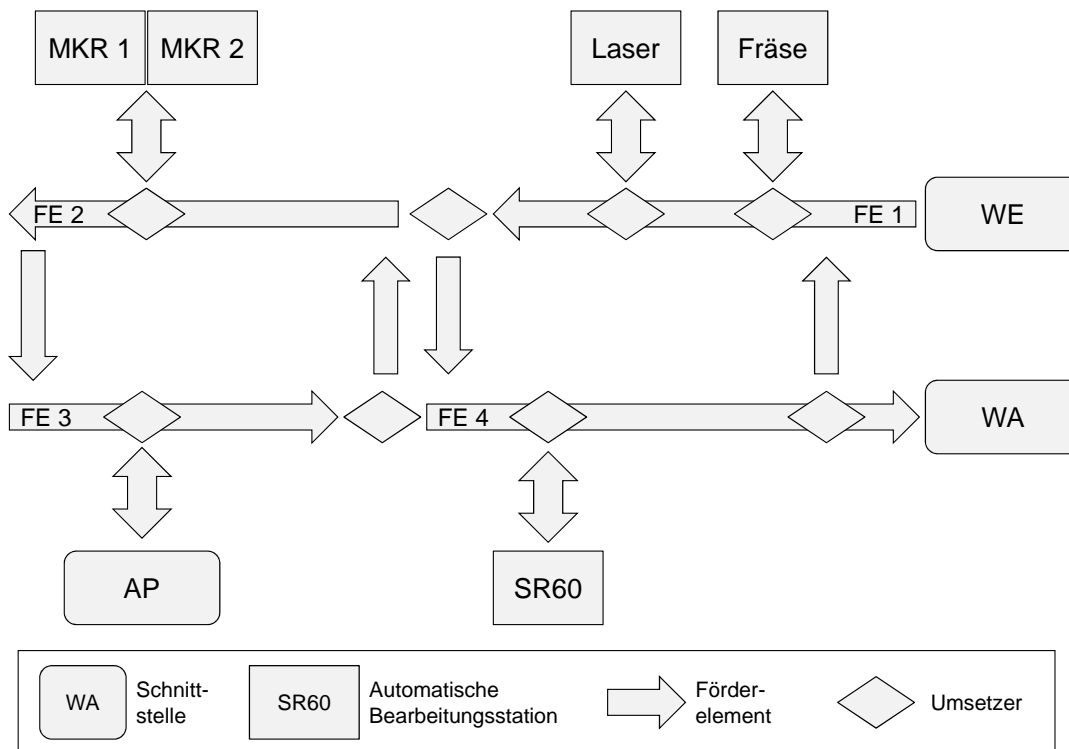


Abbildung 9.4 vereinfachtes Simulationsmodell, nach [Nag10, S. 20]

Je nach Produktart, vgl. Tabelle 9.3, müssen einige der automatischen Stationen angefahren werden. Die Informationen über die nötigen Bearbeitungsschritte sind auf einem Transponder am Werkstückträger gespeichert, die über Schreiblesestationen den Förderweg des Werkstückes gesteuert werden. Ist die nächste Station der Bearbeitungsreihenfolge eines Werkstückes blockiert, fährt dieses auf dem Förderkreis Warteschleifen, bis die Station frei ist. Sind alle erforderlichen Bearbeitungsschritte abgearbeitet, wird das fertige Produkt zum Versandarbeitsplatz gefördert und ausgeschleust. Die Bezeichnungen der Bearbeitungen sind für die Simulation irrelevant, daher werden die ursprünglichen Bezeichnungen der realen Modellfabrik verwendet.

Das Geschäftsziel des Anlagebetreibers ist die anzahl- und termingerechte Belieferung der Kunden nach dem Just-In-Time-Prinzip, außerdem sollen die Bearbeitungsstationen gleichmäßig und gut ausgelastet sein. Daraus resultiert die Anforderung an die Produktionslinie: hoher Durchsatz bei möglichst kleinen Durchlaufzeiten, kein Leerlauf (Wartezeiten) an den Schnittstellen und die termingerechte Produktion der Bestellmenge in vorgeschriebener Zeit. Die Leistungsverfügbarkeit wird an den Schnittstellen „Wareneingang“, „Handarbeitsplatz“ und „Warenausgang“ ermittelt.

Die Anlage arbeitet im 2-Schicht-Betrieb (16 h pro Tag), wobei ein Instandhaltungsmitarbeiter ständig vor Ort ist. Außerhalb der Produktionszeiten finden keine Instand-



**Tabelle 9.3** Bearbeitungsstationen der Produkte, nach [Nag10, S. 40+42]

Station	Abkürzung	Produkt 1	Produkt 2	Taktzeit
Wareneingang	WE	✓	✓	151 s
Fräse	Fräse	✓	-	100 s
Laser	Laser	-	✓	100 s
Koordinatenroboter	MKR	✓	✓	200 s
Handarbeitsplatz	AP	✓	✓	150 s
Schwenkarmroboter	SR 60	✓	-	250 s
Warenausgang	WA	✓	✓	120 s

haltungsmaßnahmen statt. Unfertige Produkte bleiben nach Schichtende auf der Linie, sie werden am nächsten Tag weiter verarbeitet. Pausenzeiten und Stillstände, die durch Mitarbeiter verschuldet sind, fließen nicht mit in die Messung der Leistungsverfügbarkeit ein.

**Am Wareneingang (WE)** wird aus einem vorgelagertem Lager über eine stetige Versorgung der Rohling gebracht und vom Mitarbeiter auf den Werkstückträger auf das Fördererelement gesetzt. Außerdem werden die erforderlichen Steuerinformationen auf den Transpondern der Werkstückträger gespeichert. Können die präparierten Rohlinge nicht auf das Fördererelement gesetzt werden, weil es blockiert ist, entsteht Wartezeit.

Wenn die Werkstücke die automatischen Stationen „Fräse“ bzw. „Laser“ und „MKR“ passiert haben, folgt eine manuelle Weiterverarbeitung am **Handarbeitsplatz (AP)**. Ist dieser blockiert fahren die Werkstücke Warteschleifen auf dem Förderkreislauf. Am Handarbeitsplatz entstehen Wartezeiten, wenn durch eine Störung einer vorgelagerten Station oder eines Fördererelements keine Werkstücke im entsprechenden Bearbeitungsstand zugeleitet werden können, oder wenn die Pufferkapazität des Förderkreislaufs erschöpft ist und fertig bearbeitete Werkstücke nicht mehr auf den Kreislauf entsorgt werden können.

**Am Warenausgang (WA)** werden die Werkstücke ausgeschleust, sobald alle erforderlichen Bearbeitungsstationen durchlaufen wurden. Der Mitarbeiter entnimmt die Werkstücke und platziert sie auf bereitgestellte Paletten. Jeweils nach 4 h werden die Paletten an den Kunden gesandt. Der Kunde erwartet eine bestimmte Produktmenge in definierter Verteilung. Diese unterscheidet sich in den beiden Simulationsuntersuchungen aufgrund des Experimentaufbaus. Werden zu wenige Teile geliefert fällt eine Konventionalstrafe an. Die Leistungsverfügbarkeit wird demnach nach der Anzahl der unpünktlichen Stücke berechnet.

### 9.2.2 Technische Verfügbarkeit der Modellfabrik

Um die Aussage der beiden Kennwerte miteinander vergleichen zu können, wird die technische Verfügbarkeit der Modellfabrik zusätzlich zur Leistungsverfügbarkeit ermittelt. Dafür wird in [Nag10] die technische Verfügbarkeit sowohl mit Hilfe des Booleschen Modells als auch mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren ermittelt. Aufgrund des Umlaufpuffers der Förderanlage hat es sich als sehr zeitaufwändig erwiesen, ein adäquates Verfügbarkeitsmodell mit Hilfe des Booleschen Modells zu bilden, vgl. [Nag10, S. 63]. Für das Berechnungsmodell mit Gewichtungsfaktoren wurden die Werte aus Tabelle 9.4 gewählt: Ungefähr 10 % der Werkstücke fahren eine Warteschleife, was sich auf die För-

der Elemente des Kreisels und der Kurzschlussumsetzer auswirkt. Der Gewichtungsfaktor der Bearbeitungsstationen Fräse, Laser und SR 60 ist abhängig von der gewählten Produktverteilung. Da die Ansteuerung der beiden MKR-Stationen nicht gleichmäßig erfolgt, sondern vorzugsweise MKR 1 bedient, unterscheiden sich die Gewichtungsfaktoren gemäß ihrer üblichen Materialflussbelegung.

**Tabelle 9.4** Gewichtungsfaktoren der Modellfabrik

Systemelement $i$	$k_i$
Zu- Abförderelemente (WE, WA)	1,0
Förderelemente des Kreisels	1,1
Kurzschlussumsetzer	0,1
Fräse, SR 60	0,5   0,7
Laser	0,5   0,3
MKR 1	0,75
MKR 2	0,25

Abbildung 9.5 zeigt die Verfügbarkeitswerte der Simulationsläufe aus dem folgenden Abschnitt 9.2.3. Im Basislauf war störungsfrei, in den Variationen 1 - 5 traten nach den Parametern aus Tabelle 9.5 häufiger und längere Störungen auf. Die Dauern der auftretenden Störungen der Systemelemente traten in jedem Experiment für alle Elemente nach der gleichen Verteilung auf, wobei nur zwischen Unstetig ( $\hat{=}$  automatische Bearbeitungsstationen)- und Stetigförderern ( $\hat{=}$  Förderelemente) unterschieden wurde, dabei wiesen die Stetigförderer stets eine größere technische Verfügbarkeit als die Unstetigförderer auf. Den Ausfalldauern wurde eine Logarithmisch-Normalverteilung, den Ausfallabständen eine Weibullverteilung zugrunde gelegt [Nag10, S. 36ff].

Die Benennung der Simulationsläufe trägt zur leichteren Einordnung zusätzlich zur Nummerierung die durchschnittliche Elementverfügbarkeit. Diese ist außerdem als Hintergrundsäule aufgetragen, dazu zum Vergleich die Ergebnisse für die technische Anlagenverfügbarkeit nach Boole und mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren.

Die beiden errechneten Werte weichen sehr stark voneinander ab. Da nicht ermittelt werden konnte, welcher der beiden Werte für die Gesamtverfügbarkeit realistischer die Situation der Anlage darstellt [Nag10, S. 36], wird für die Einordnung der Ergebnisse von Untersuchung I der Durchschnitt aller Elementverfügbarkeiten ermittelt und für den Vergleich mit der Leistungsverfügbarkeit verwendet.

### 9.2.3 Untersuchung I: Aussagekraft des Kennwerts „Leistungsverfügbarkeit“

#### Aufbau der Simulationsversuche

Zur Untersuchung der Aussagekraft wurden verschiedene Simulationsexperimente (Parameter: Tabelle 9.5) über eine Laufzeit von über 100 h durchgeführt. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden zunächst die Ergebnisse bei störungsfreiem Betrieb ermittelt. Dafür wurde jeder Lauf je drei Mal für 160 h ( $\hat{=}$  40 Versandzyklen) und drei Mal für 1600 h ( $\hat{=}$  400 Versandzyklen) bei unterschiedlichen Zufallszahlenströmen durchgeführt. Es zeigte sich, dass sich das Anlagenverhalten während der 40 Zyklen nicht von dem während

**Tabelle 9.5** Parametervariation, nach [Nag10, S. 58]

(St.: stetig - Förderelemente, Unst.: unstetig - automatische Bearbeitungsstationen)

Simulations- lauf	Ele- mente	Weibullverteilung			Log-Normal-Ver.			Elementver- fügbarkeit
		$\alpha$	$\beta$	$MTBF$	$\mu$	$\sigma$	$MTTR$	
„Basislauf 100,00 %“	St.	0,00	0	$\infty$	0 s	0 s	0 s	100,00 %
	Unst.	0,00	0	$\infty$	0 s	0 s	0 s	100,00 %
„Variation 1 99,69 %“	St.	1,13	100.000	95.670 s	50 s	78 s	50 s	99,94 %
	Unst.	1,13	11.000	10.523 s	100 s	50 s	100 s	99,06 %
„Variation 2 98,95 %“	St.	1,13	30.000	28.701 s	90 s	78 s	90 s	99,69 %
	Unst.	1,13	8.200	7.845 s	270 s	50 s	270 s	96,81 %
„Variation 3 97,70 %“	St.	1,13	10.000	9.567 s	110 s	78 s	110 s	98,86 %
	Unst.	1,13	7.000	6.697 s	450 s	50 s	450 s	93,70 %
„Variation 4 96,59 %“	St.	1,13	8.200	7.845 s	160 s	78 s	160 s	98,00 %
	Unst.	1,13	6.000	5.740 s	500 s	50 s	500 s	91,98 %
„Variation 5 95,27 %“	St.	1,13	8.200	7.845 s	270 s	78 s	270 s	96,67 %
	Unst.	1,13	6.000	5.740 s	500 s	50 s	500 s	91,98 %

der 400 Zyklen unterscheidet, da kein Alterungsverhalten implementiert wurde. Daher werden die die Messwerte zusammenfasst und anhand der Zyklusdurchschnittswerte dargestellt.

**Tabelle 9.6** Ergebnisse des Basisexperiments - störungsfreier Betrieb

Durchschnittswerte pro Versandzyklus (4 h)	Messwert	Leistungs- verfügbarkeit
Wartezeit am Wareneingang	0,00 min	100,00 %
Wartezeit am Handarbeitsplatz	1,53 min	99,36 %
Fertige Produkte am Warenausgang	95,37 Stück	100,00 %

Bei allen Experimenten war eine Taktzeit von 151 Sekunden am Wareneingang, eine Bearbeitungszeit von 150 Sekunden am Handarbeitsplatz und von 120 Sekunden am Warenausgang eingestellt, wobei diese Zeiten wie auch die Verweildauern in den Bearbeitungsstationen stochastisch schwankten. Im Basisdurchlauf ohne Störungen konnten mit diesen Einstellungen 95 Stück pro Zyklus produziert werden. Diese Anzahl wird als Kalibrierung der Leistungsverfügbarkeit gewählt.

Zur Auswertung der Leistungsverfügbarkeit wurden die aufgetretenen Wartezeiten an Wareneingang und Handarbeitsplatz sowie die unpünktlichen Einheiten am Warenausgang protokolliert. Zum Vergleich der Kennwerte wurde die technische Verfügbarkeit der Systemelemente, sowie Dauer und Zeitpunkte der Störungen aufgenommen.

### Auswertung und Ergebnis

Die Simulationsversuche an der Modellfabrik bestätigte erneut, dass sich der Kennwert der Leistungsverfügbarkeit in seiner Aussage deutlich von der technischen Verfügbarkeit unterscheidet.

Wie in Abbildung 9.6 dargestellt, sinkt die Leistungsverfügbarkeit an allen drei Schnittstellen, insbesondere am Warenausgang deutlich langsamer als die durchschnittliche

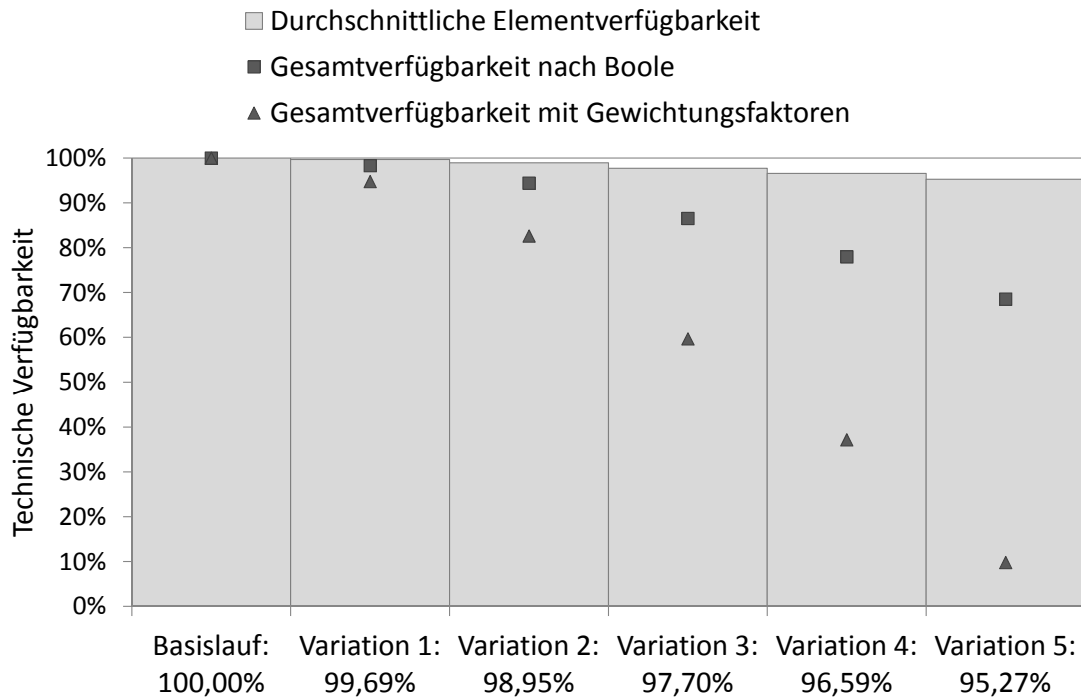


Abbildung 9.5 Gesamtverfügbarkeit im Vergleich

Elementverfügbarkeit. Die Anlage kann demnach auch bei steigender Störanfälligkeit noch relativ lange die an sie gestellten Anforderungen erfüllen.

Die Wiederholung aller sechs Simulationsläufe bei Halbierung der vorhandenen Pufferkapazitäten erklärt diese hohe Fehlertoleranz: Das Verhalten der Anlage gleicht im Basisversuch und den Varianten 1 - 4 den Ergebnissen bei voller Pufferkapazität. Erst bei der Variante 5 (ca. 95% Elementverfügbarkeit) zeigt die Pufferhalbierung Wirkung: Die Leistungsverfügbarkeit sinkt an den drei Schnittstellen um ca. 25 Prozentpunkte durch die verringerte Pufferkapazität, vgl. [Nag10, S. 65].

Damit wird das Ergebnis der ersten beiden Simulationsexperimente aus Abschnitt 9.1 bestätigt: Die Leistungsverfügbarkeit kann eine gute Aussage über den Erfüllungsgrad der an die Anlage gestellten Anforderungen treffen. Neben der technischen Verfügbarkeit der Anlagenelemente wird auch ihr Zusammenspiel (z. B. die Wirkung von Puffern) berücksichtigt.

## 9.2.4 Untersuchung II: Genauigkeit der Prognosemethode

### Aufbau der Simulationsversuche

Desweiteren wurde eine Simulationsuntersuchung zur Bewertung der Prognosemethode aus Kapitel 8.1, S. 99, durchgeführt. Dafür wurde für jedes Anlagenelement der Zusammenhang zwischen Ausfalldauer und den Auswirkungen an den Schnittstellen (Wartenzeiten an Wareneingang und Arbeitsplatz, verspätete Produkte am Warenausgang) ermittelt. Es wurden 16 Einzelmessungen durchgeführt, bei denen die Ausfalldauer von 0 min, in Schritten von 3 bzw. 4 Minuten bis zu 50 Minuten anstieg (0, 3, 6, 10, 13, ... 50 Minuten). Simulationsdauer war jeweils 4 h. Um den Einfluss der Randbedingungen einordnen zu können, wurde das Experiment drei Mal durchgeführt:

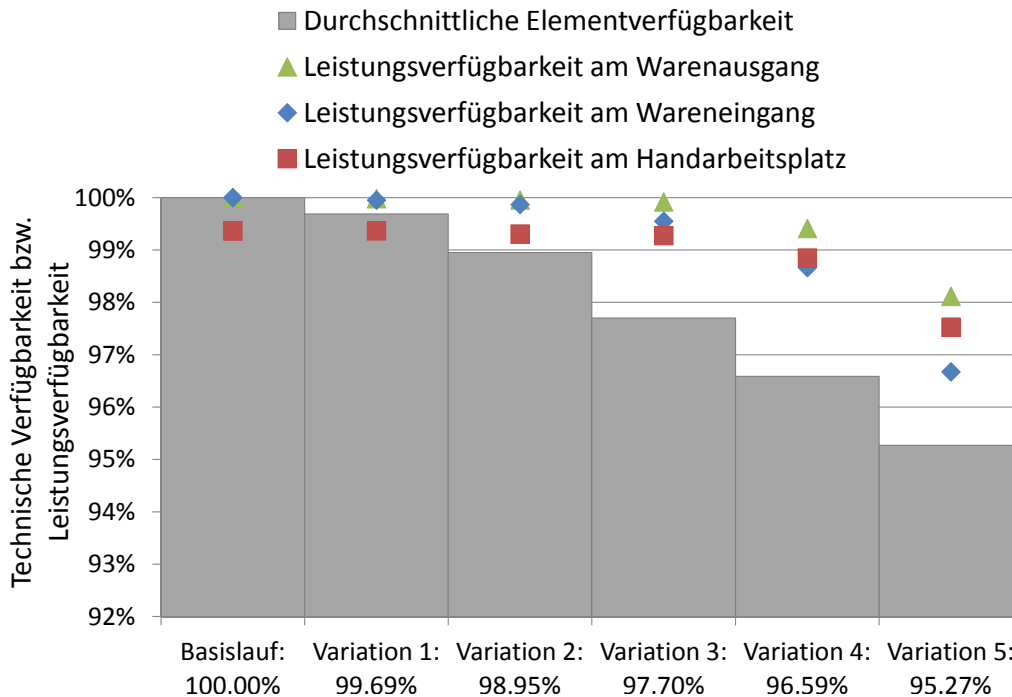


Abbildung 9.6 Leistungsverfügbarkeit bei sinkender technischer Verfügbarkeit

In **Fall 1 - „50:50 früh“** wurden für alle Elemente Simulationsläufe durchgeführt. Die Ausfälle der Elemente begannen immer nach 30 min Simulationszeit. Die Produkte 1 und 2 (vgl. Tabelle 9.3) wurden in gleicher Häufigkeit gefertigt.

In **Fall 2 - „30:70 früh“** wurden nur für die Elemente „Laser“, „Fräse“ und „SR 60“ Simulationsläufe durchgeführt, da diese vom geänderten Produktverhältnis (30 % Produkt 1, 70 % Produkt 2) betroffen sind. Die Ausfälle begannen wiederum nach 30 min Simulationszeit. Geändert wurde außerdem die Sollanzahl am Warenausgang: Aufgrund der hohen Bearbeitungszeit an der Station SR 60 konnten bei diesem Produktverhältnis nur 82 Stück in 4 h als Sollanzahl festgelegt werden.

In **Fall 3 - „50:50 spät“** wurde zum gleichverteilten Produktverhältnis aus Fall 1 zurückgekehrt, dementsprechend wurden nun auch wieder 86 Produkte am Warenausgang erwartet. Die Ausfälle begannen hier aber deutlich später, nach 2 h 45 min Simulationszeit. Es wurden Simulationsläufe für die Förderelemente 3 und 4, sowie die Bearbeitungsstationen „Fräse“, „MKR“ und „SR 60“ durchgeführt.

### Prognoseparameter

Tabelle 9.7 stellt die verwendeten Prognoseparameter dar, deren Herleitung aus den Anforderungen an die Anlage und den Leistungsdaten der Anlagenelemente befindet sich in Anhang B.1.2 ab S. 148.

### Auswertung und Ergebnis

Für alle Elemente (außer Förderelement 1) wurden für den Wareneingang für Ausfalldauern bis zu 50 min keine Auswirkungen prognostiziert. Die Simulation bestätigte diese Voraussage. Gleiches gilt für die Bearbeitungsstation „SR 60“ bezogen auf den Arbeitsplatz.

**Tabelle 9.7** Prognoseparameter der Modellfabrik

Fall	i	Wareneingang			Handarbeitsplatz			Auslagerung			
		$R_i$	$K_{ix}$	$P_{ix}$ [min]	$R_i$	$K_{ix}$	$P_{ix}$ [min]	$R_i$	$K_{ix}$	$P_{ix}$ [min]	$L_{ix}$ [min]
I	FE 1	1,00	1,00	0	1,00	1,06	2	1,00	1,06	3	11,89
	FE 2	1,00	1,00	50	1,00	1,06	3	1,00	1,06	4	11,89
	FE 3	1,00	1,00	50	1,00	1,00	23	1,00	1,06	3	11,89
	FE 4	1,00	1,00	50	1,00	1,00	1	1,00	1,06	3	11,89
	Fräse	0,50	1,00	50	0,50	1,06	3	0,50	1,06	3	11,89
	Laser	0,50	1,00	50	0,50	1,06	3	0,50	1,06	3	11,89
	MKR	0,25	1,00	50	0,25	1,06	2	0,25	1,06	5	11,89
	SR 60	0,50	1,00	50	0,50	1,00	27	0,50	1,06	2	11,89
II	FE 1	1,00	1,00	0	1,00	1,06	2	1,00	1,00	3	0,00
	FE 2	1,00	1,00	50	1,00	1,06	3	1,00	1,00	4	0,00
	FE 3	1,00	1,00	50	1,00	1,00	23	1,00	1,00	3	0,00
	FE 4	1,00	1,00	50	1,00	1,00	1	1,00	1,00	3	0,00
	Fräse	0,70	1,00	50	0,70	1,06	3	0,70	1,00	3	0,00
	Laser	0,30	1,00	50	0,30	1,06	3	0,30	1,00	3	0,00
	MKR	0,25	1,00	50	0,25	1,06	2	0,25	1,00	5	0,00
	SR 60	0,70	1,00	50	0,70	1,00	27	0,70	1,00	2	0,00
III	FE 1	1,00	1,00	0	1,00	1,06	2	1,00	1,06	3	11,89
	FE 2	1,00	1,00	50	1,00	1,06	3	1,00	1,06	4	11,89
	FE 3	1,00	1,00	50	1,00	1,00	23	1,00	1,06	3	11,89
	FE 4	1,00	1,00	50	1,00	1,00	1	1,00	1,06	3	11,89
	Fräse	0,50	1,00	50	0,50	1,06	3	0,50	1,06	3	11,89
	Laser	0,50	1,00	50	0,50	1,06	3	0,50	1,06	3	11,89
	MKR	0,25	1,00	50	0,25	1,06	2	0,25	1,06	5	11,89
	SR 60	0,50	1,00	50	0,50	1,00	27	0,50	1,06	2	11,89

Aus dieser Übereinstimmung lässt sich allerdings nicht ableiten, inwieweit die Prognose auch bei längeren Ausfalldauern mit den Simulationsergebnissen übereinstimmen würde

Bei einem Großteil der Prognosen wurde die Anstieg der Wartezeit bzw. der unpünktlichen Produkte richtig vorhergesagt, der Totzeitanteil weichen dagegen erheblich vom Simulationsergebnis ab. Abbildung 9.7 zeigt eine exakte Prognose, Abbildung 9.8 zeigt ein Beispiel von abweichender Totzeit. Tabelle 9.8 gibt eine Übersicht über die Abweichung in der Totzeit für alle Elemente, deren Steigung gut prognostiziert wurde.

Die Qualität der Steigungsprognose lässt sich in den verbleibenden Fällen des Fördererelements 4 nicht beurteilen, da im Untersuchungszeitraum von 50 min erst sehr spät oder gar keine Auswirkungen am Arbeitsplatz, bzw. dem Warenausgang festgestellt wurden. Die Abweichung von prognostizierter und simulierter Totzeit beträgt ca. 40 bzw. ca. 30 min.

Die verbleibenden Prognosen (Fördererelemente 1 - 3, SR 60 und Fräse (30:70), alle bezogen auf den Warenausgang) unterscheiden sich deutlich von den Simulationsergebnissen.

Für die Bewertung der Prognosemethode ergibt sich aus diesen Ergebnissen ein ambivalentes Bild: Einerseits sprechen einige Punkte für den grundsätzlichen Aufbau der Methode, andererseits sind die Abweichungen vom Simulationsergebnis zu stark, um die Methode zum jetzigen Forschungsstand uneingeschränkt zu empfehlen. Positiv zu werten ist dabei einerseits die richtig prognostizierte Beziehung zwischen Ausfallzeit des be-

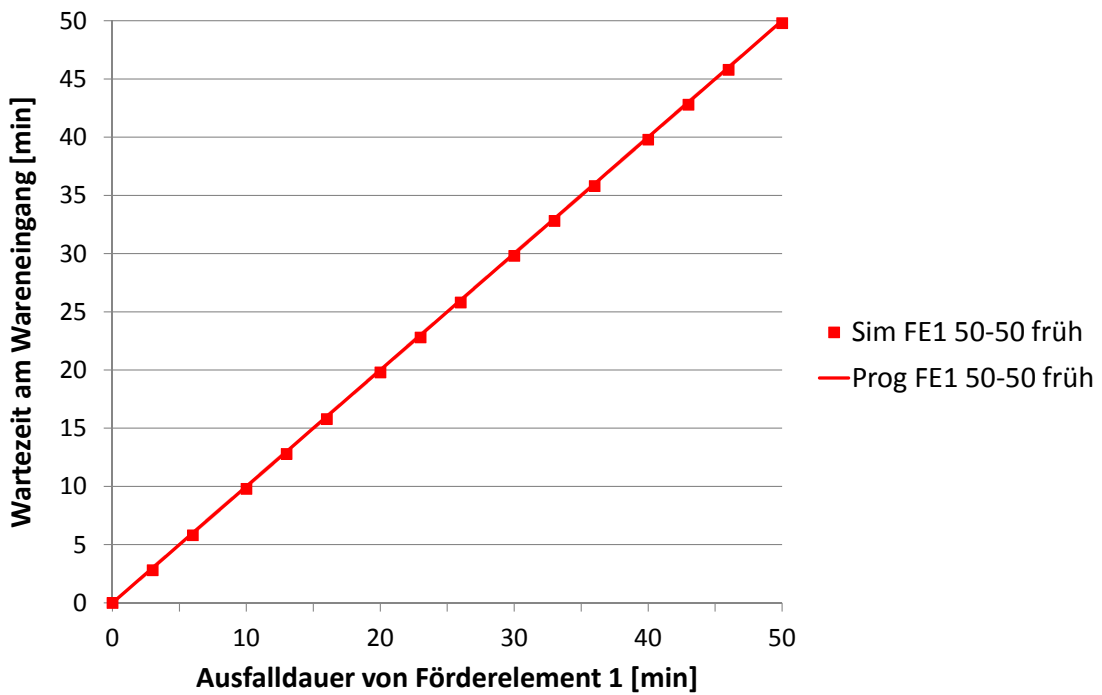


Abbildung 9.7 Prognose und Simulationsergebnis von Fördererelement 1 am Wareneingang

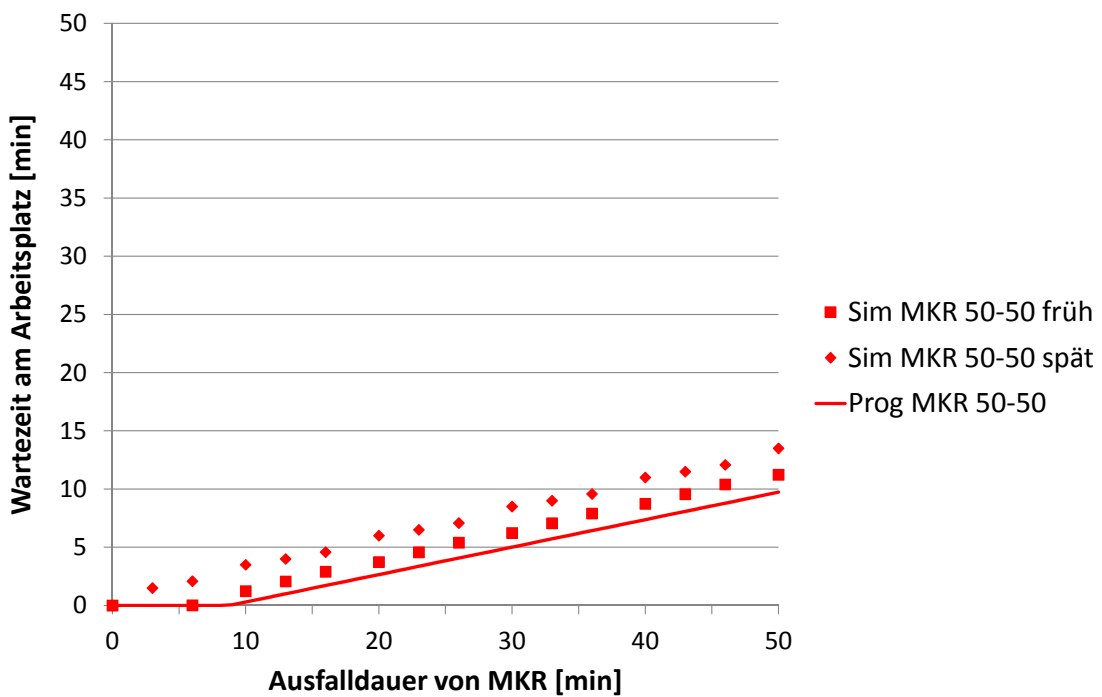


Abbildung 9.8 Prognose und Simulationsergebnis von MKR am Arbeitsplatz

**Tabelle 9.8** Abweichungen in der Totzeit

Element	Experiment	Abweichung	Abbildung
zu frühe Prognose			
WA-Laser	30:70 früh	+ 40 min	Abb. B.15, S. 156
AP-Laser	30:70 früh	+ 14 min	Abb. B.9, S. 153
WA-SR 60	50:50 früh	+ 13 min	Abb. B.17, S. 157
AP-Fräse	50:50 früh	+ 10 min	Abb. ??, S. ??
AP-Fräse	30:70 früh	+ 10 min	Abb. ??, S. ??
AP-FE 2	50:50 früh	+ 8 min	Abb. B.5, S. 151
AP-Laser	50:50 früh	+ 8 min	Abb. B.9, S. 153
WA-FE 4	50:50 spät	+ 6 min	Abb. B.13, S. 155
WA-SR 60	50:50 spät	+ 4 min	Abb. B.17, S. 157
gute Prognose			
WE-FE1	50:50 früh	± 0 min	Abb. 9.7, S. 129
WA-Laser	50:50 früh	± 0 min	Abb. B.15, S. 156
WA-Fräse	50:50 früh	± 0 min	Abb. ??, S. ??
WA-Fräse	50:50 spät	± 0 min	Abb. ??, S. ??
AP-Fräse	50:50 spät	± 0 min	Abb. ??, S. ??
zu späte Prognose			
AP-MKR	50:50 früh	- 4 min	Abb. 9.8, S. 129
AP-FE 1	50:50 früh	- 5 min	Abb. B.4, S. 151
AP-MKR	50:50 spät	- 12 min	Abb. 9.8, S. 129
WA-MKR	50:50 spät	- 24 min	Abb. B.16, S. 157
WA-MKR	50:50 früh	- 34 min	Abb. B.16, S. 157
AP-FE 3	50:50 früh	- 47 min	Abb. B.6, S. 152
AP-FE 3	50:50 spät	- 54 min	Abb. B.6, S. 152



trachteten Elements und der Auswirkungen an der betrachteten Schnittstelle: Nach einer bestimmten Ausfallzeitdauer, für die keine Auswirkungen auftreten, steigt die Wartezeit bzw. die unpünktlichen Einheiten mit jeder weiteren Ausfallzeiteinheit linear an.

Der Anstieg wurde nur in wenigen Fällen falsch prognostiziert. Da die wirksamen Kapazitätsfaktoren für die Steigungsprognose mit 1,00 bzw. 1,06 keinen wesentlichen Betrag liefern, kann die Übereinstimmung dem Redundanzfaktor zugeordnet werden. Der Einfluss des Faktors wird demnach in der Prognosemethode richtig berücksichtigt.

Die übrigen drei Einflussgrößen liefern keine stabilen Ergebnisse. Die Modellfabrik stellt allerdings kein typisches Beispiel für eine Intralogistikanlage dar, im Gegensatz zum Lagerbeispiel aus Kapitel 8.3, S. 107, konnten die Faktoren nur unter mit Hilfe von Annahmen, vgl. Anhang B.2, S. 151 festgelegt werden. Es ist nicht auszuschließen, dass die Abweichungen durch unzutreffende Annahmen zu erklären sind. Dies kann nur durch weitere Simulations- und ggf. Praxisstudien abschließend geklärt werden.

## 9.3 Zusammenfassung Kapitel 9

Drei unabhängig voneinander durchgeführte Simulationsuntersuchungen haben gezeigt, dass der Kennwert „Leistungsverfügbarkeit“ sehr gut in der Lage ist, zu beurteilen, in wie weit eine Anlage in der Lage ist, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Insbesondere wurde nachgewiesen, dass die kompensierende Wirkung von Puffern bei Elementausfällen adäquat berücksichtigt wird.

Zur Prognosemethode lassen sich insgesamt drei wesentliche Erkenntnisse aus dieser Simulationsuntersuchung gewinnen:

1. Wie prognostiziert, vgl. Abbildungen 8.2 und 8.3, S. 103, steigt die Wartezeit, bzw. die Anzahl der unpünktlichen Einheiten nach einer Totzeit linear mit steigender Ausfalldauer des betrachteten Elements.
2. Der vorausgesagte Einfluss des Redundanzfaktors auf den Anstieg der Wartezeit, bzw. der unpünktlichen Einheiten konnte durch die Simulation bestätigt werden.
3. Der Einfluss von Kapazitätsfaktor, Pufferzeit und Laufzeitreserve konnte am Beispiel der Modelfabrik nur mit stark schwankender Qualität vorhergesagt werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Simulationsmodell als Beispiel für eine Intralogistikanlage sehr untypisch dimensioniert und aufgebaut ist. Die Reservekapazitäten der Bearbeitungsstationen werden durch die Fördererlemente in ihrer Wirkung beschnitten, vgl. Abschnitt B.1.2, S. 149, und die tatsächlich wirksamen Pufferplätze konnten nicht eindeutig bestimmt werden vgl. Abschnitt B.1.2, S. 149. Daher sollte die Prognosemethode zunächst an anderen Anlagenmodellen getestet werden, um sie abschließend zu beurteilen bzw. ggf. weiterzuentwickeln.

---

# 10 Schlussbetrachtung

## 10.1 Zusammenfassung

Eine hohe Anlagenverfügbarkeit wird bei nahezu jeder neuen intralogistischen Anlage vertraglich vereinbart und soll dem Betreiber eine hohe Zuverlässigkeit garantieren. Zur Berechnung dieser Anlagenverfügbarkeit wird in den Verträgen üblicherweise auf das einschlägige Regelwerk von VDI und/oder FEM verwiesen. Durch Feinplanungphase, Installation und Inbetriebnahme vergehen meist viele Monate, bis der Nachweis der geforderten Verfügbarkeit auf der Tagesordnung steht, und häufig fällt erst dann auf, dass das Regelwerk unterschiedliche Interpretationen für die Berechnung der Anlagenverfügbarkeit zulässt. Missverständnisse und Streitigkeiten bis hin zu rechtlichen Auseinandersetzungen sind häufig die ärgerliche und kostspielige Folge.

Die beiden Ziele dieser Arbeit waren einerseits, den Verfügbarkeitsbegriff, die praktische Erhebung und die Berechnung kritisch und umfassend zu untersuchen und systemimmanente Schwachstellen herauszuarbeiten. Andererseits sollten für diese Schwachstellen Lösungen angeboten werden. Beides wurde erreicht.

### 10.1.1 Darstellung und Analyse des bestehenden Regelwerks

Der geltende Verfügbarkeitsbegriff geht aus den Zuverlässigkeitsüberlegungen aus Raumfahrt und Kerntechnik hervor. Er wurde von Gudehus [Gud76a, Gud76b, Gud79] in den 1970er Jahren für die Anwendung in der Intralogistik spezifiziert. Mit ihren Dissertationen greifen Neuhaus [Neu78] und Böckmann [Böc78] diese Verfügbarkeitsdefinitionen noch im gleichen Jahrzehnt auf. Während Neuhaus Zuverlässigkeitsbetrachtungen für jede Lebensphase einer Anlage aufstellt und eine alternative Nachweismethode entwickelt, konzentriert sich Böckmann, nach der Darstellung der damals aktuellen Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsuntersuchungen auf die Spezifika der verschiedenen Anlagenelemente und identifiziert die Ladeinheit als fehleranfälligstes Objekt. Erst gut zwanzig Jahre später war der Verfügbarkeitsbegriff wieder Thema einer Dissertation: Vom Bovert entwickelte eine Methode zur Verfügbarkeitsprognose während der Planungsphase [VB01].

Insbesondere Neuhaus und Vom Bovert setzen sich kritisch mit der Verfügbarkeitsberechnung auseinander, allerdings waren zur Zeit von Neuhaus die meisten der heute geltenden Richtlinien noch nicht erschienen, während Vom Bovert seine Kritik vornehmlich auf die Probleme der Anwendung des Booleschen Modells stützt und andere Schwachstellen nur streift oder nicht behandelt.

Die vorliegende Arbeit setzt sich dagegen in Kapitel 2 und 3 umfassend mit den wesentlichen Aspekten des Verfügbarkeitsbegriffs und -nachweises auseinander. Das geltende Regelwerk wird nicht nur ausführlich vorgestellt und auf seine Schwachstellen und Widersprüchlichkeiten hin untersucht, sondern auch mit der jeweiligen Motivation der Autoren

in Beziehung gesetzt: Jede Richtlinie ist gewissermaßen eine Ergänzung, Präzisierung oder Schwerpunktveränderung bezogen auf das davor bestehende Regelwerk.

Die in der Literatur, [Arm81, Sch90, FN06] u. a., häufig proklamierten unterschiedlichen und teilweise widerstrebenden Bedürfnisse von Lieferanten und Betreibern werden anhand von konkreten Praxisbeispielen in Kapitel 4 herausgearbeitet und quantifiziert dargestellt. Dabei wird insbesondere auch auf die emotionalen Faktoren der beteiligten Personen eingegangen, die für eine gelungene Inbetriebnahme nicht vernachlässigt werden dürfen.

Die zeitliche Entwicklung der Verfügbarkeit in den ersten Betriebsmonaten wurde bisher nur einmal [BNS76] wissenschaftlich untersucht. Die dort gewonnenen Erkenntnisse zur Einfahrdauer intralogistischer Systeme sowie im Regelwerk vorausgesetzte Annahmen, wie das konstant hohe Verfügbarkeitsniveau, werden in Kapitel 5 anhand der Verfügbarkeitsdaten dreier Anlagen überprüft. Insbesondere wird nachgewiesen, dass die Anlagenverfügbarkeit nach dem Erreichen eines stabilen, hohen Niveaus keinesfalls konstant auf diesem Niveau bleibt, wie in der Literatur üblicherweise dargestellt. Stattdessen bestätigt sich Scheids These, vgl. Abbildung 5.4, S. 56, dass die Verfügbarkeit mit dem Abzug des Lieferantenpersonals von der Anlage deutlich absinken kann und erst mit zunehmender Erfahrung des Betreiberpersonals wieder zunimmt.

Die Einordnung der Verfügbarkeitsberechnung in die Erkenntnisse der Zuverlässigkeitstheorie erfolgt in Kapitel 6. Nach einer sorgfältigen Abgrenzung der verschiedenen Bedeutungen von „Zuverlässigkeit“ wird die Berechnungsgrundlagen für die Zuverlässigkeit technischer Systeme und ihrer Kenngrößen, wie beispielsweise die Ausfallrate oder die Verfügbarkeit, dargestellt. Infolgedessen werden einige Ungereimtheiten, wie der Gebrauch des Kennwerts *MTBF*, ausgeräumt. Außerdem wird vom Bovert einerseits darin bestätigt, dass das Boolesche Modell ungeeignet für die Berechnung der Verfügbarkeit von intralogistischen Systemen ist, andererseits wird allerdings gezeigt, dass das von ihm empfohlene Markov-Modell ebenso ungeeignet ist. Stattdessen sollte eine Systemgrenzenverschiebung vorgenommen werden und die Verfügbarkeit der Anlage als Ganzes beurteilt werden.

Alle untersuchten Aspekte führen zu Kriterien, die zukünftige Verfügbarkeitskennwerte und -prozeduren einhalten sollten, um die beschriebenen Probleme zu vermeiden.

### 10.1.2 Entwicklung und Anwendung von Lösungen

Im zweiten Teil der Arbeit wird einerseits ein neues Konzept der Projektablaufs und damit die Vorschläge zur Vertragsgestaltung entwickelt, dass insbesondere die Inbetriebnahmephase aufwertet. Andererseits werden drei alternative Kennwerte vorgestellt, von denen sich der Kennwert „Leistungsverfügbarkeit“ [VDI11] als am geeignetsten herausstellt und außerdem die aufgestellten Kriterien aus dem ersten Teil nahezu vollständig erfüllt. Für die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit stehen nicht die einzelnen Anlagenelemente im Mittelpunkt, sondern der Erfüllungsgrad der Geschäftsprozesse, die über die Anlage laufen. Im Gegensatz zur technischen Verfügbarkeit wird dabei auch die Lernkurve und Einarbeitungsphase des Betreiberpersonals mit berücksichtigt. Dafür müssen sich Anlagenplaner, Lieferanten und Betreiber zu einem sehr frühen Planungsstand mit den Fragen auseinandersetzen, was die Anlage genau leisten muss und was sie bei begrenztem Budget evtl. nicht mehr leisten kann. Diese Antworten werden auf Maßzahlen herunter

gebrochen, die an den Schnittstellen der Anlage, meistens Arbeitsplätze, gemessen werden können.

Um in der Planungsphase neue Anlagen auf die geforderten und vereinbarten Leistungsverfügbarkeitswerte hin auslegen zu können, ist eine Prognosemethode zwingend erforderlich. Daher wird in Kapitel 8 zunächst eine solche Prognosemethode entwickelt, mit deren Hilfe abgeschätzt werden kann, wie die Auswirkungen verschiedener technischer Lösungsmöglichkeiten auf die erzielbare Leistungsverfügbarkeit sind. Dies kann beispielsweise die Variantenauswahl unterstützen, oder zusätzlich nötige Investitionen für Puffer oder ähnliches anschaulich erklären. Desweiteren werden für die konkrete Ausgestaltung des Nachweises der Leistungsverfügbarkeit verschiedene Varianten vorgestellt, wobei die automatisierte Datenaufnahme empfohlen wird. Anhand des gewählten Beispiels eines dreigassigen Lagers mit Kommissionierzone und Erweiterungsmöglichkeit wird sowohl die Prognosemethode als auch der Nachweis im Rahmen der Abnahme demonstriert und gleichzeitig gezeigt, dass das Konzept der Leistungsverfügbarkeit zwar für große, weitverzweigte Anlage entworfen wurde, für kleine Anlagen aber ebenfalls ohne Abstriche anwendbar ist. Gleichzeitig wird verdeutlicht, wie das Konzept der Aufteilung in der Projektphasen konkret angewandt werden kann.

In Kapitel 9 schließlich werden zwei einfache Simulationsexperimente vorgestellt und die Daten eines ausführlichen Simulationsmodells ausgewertet. Dabei kann gezeigt werden, dass die Leistungsverfügbarkeit ein geeigneter Kennwert ist, um zu beurteilen, ob und inwieweit eine Anlage in ihrer Gesamtheit fähig ist, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Desweiteren wird die Richtigkeit der Prognosemethode aus Kapitel 8 überprüft. Es zeigt sich, dass die Methode grundsätzlich den Zusammenhang zwischen Stillstandszeiten und Minderung der Leistungsverfügbarkeit richtig vorhersagt. Es sollten allerdings die noch vorhandenen Abweichungen zwischen Prognose und Simulationsergebnissen durch weitergehende Untersuchungen genauer überprüft werden.

## 10.2 Ausblick

Nach der Entwicklung und der theoretischen Ausgestaltung des Kennwerts Leistungsverfügbarkeit wird sich dieser in der Praxis bewähren müssen. Dies liegt vor allem in der Hand des VDI, der seinen Kennwert mit der dazugehörigen Richtlinie unter den Planern und Lieferanten bekannt und vertraut machen sollte, um die Voraussetzungen zu schaffen, dass die Leistungsverfügbarkeit den mangelhaften, aber vertrauten Kennwert der technischen Verfügbarkeit ablösen kann.

Die Prognosemethode sollte an weiteren Intralogistikanlagen, ob als Simulationsmodell oder an existierenden Systeme, ausführlich getestet und anhand der Ergebnisse verfeinert werden.

Im Ablauf der Inbetriebnahme neuer Anlagen kommt vor dem Nachweis der Verfügbarkeit, bzw. zukünftig der Leistungsverfügbarkeit, der Leistungstest. Bei der Entwicklung des neuen Kennwerts und dessen Richtlinie wurde ausdrücklich betont, dass der Leistungstest durch die Leistungsverfügbarkeit nicht tangiert wird. Nichts desto trotz lassen sich viele der gezeigten Schwachstellen der Verfügbarkeit auf die Leistung übertragen, beispielsweise die emotionalen Vorbehalte des Betreiberpersonals vor der neuen Anlage oder unterschiedliche Interpretationen des Leistungsbegriffs von Lieferanten und Betreibern, vgl. Abschnitt 1.1, S. 2. Es wird daher zu prüfen sein, ob und inwieweit die

Leistungsdefinition und deren Nachweis überarbeitet und möglicherweise in das Konzept der Leistungsverfügbarkeit integriert werden kann und sollte.

# A Das Ausfallverhalten einiger ausgewählter EHB-Elemente

## A.1 Arbeitsplätze

Drei Arbeitsplätze haben überdurchschnittlich viele Ausfallzeiten zu verzeichnen. Diese werden näher dargestellt:

Der Arbeitsplatz DS02 ist für 11,5 % der gesamten Ausfallzeit verantwortlich. Es tritt eine Häufung von Ausfallzeiten in der dritten und fünften Woche auf, danach schwankt der Wochendurchschnitt der täglichen Ausfallzeit zwischen 15 Minuten und 1,5 Stunden (vgl. Abbildung A.1). Am Arbeitsplatz BD (7,5 % der gesamten Ausfallzeit) treten in den ersten drei Wochen fast keine Ausfallzeiten auf, danach treten immer wieder einige Tage mit Ausfallspitzen auf, die von Zeitabschnitten mit nahezu keiner Ausfallzeit getrennt sind (vgl. Abbildung A.2). Der Arbeitsplatz OB4, der für 3,5 % der gesamten Ausfallzeit verantwortlich ist, hat ebenfalls eine Ausfallhäufung in der vierten und fünften Woche, anschließend treten nur noch vereinzelt Störungen auf, vgl. Abbildung A.3.

Die übrigen 17 sind jeweils für durchschnittlich 0,4 % der Gesamtausfallzeit verantwortlich. Der Arbeitsplatz DS11 entspricht diesem Durchschnitt und wird daher untersucht. Das Ausfallverhalten weist vereinzelte Spitzen ohne erkennbaren Trend auf, vgl. Abbildung A.4. Der Arbeitsplatz EP ist herausragend, da er in der gesamten Betrachtungsdauer überhaupt keine Ausfallzeit aufweist.

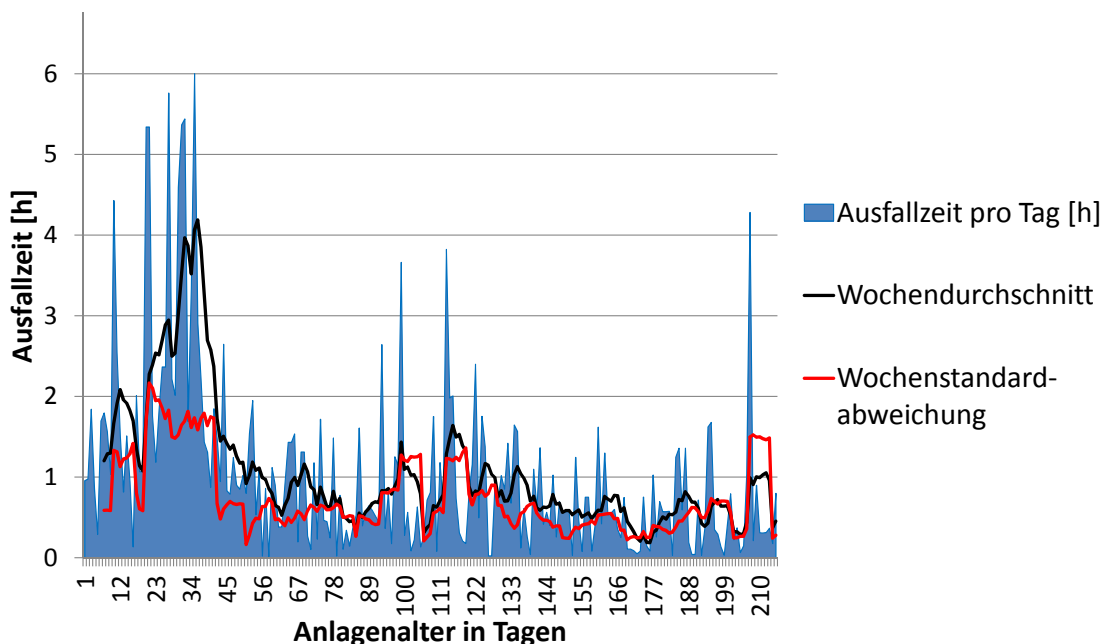


Abbildung A.1 Verhalten des Arbeitsplatzes DS02

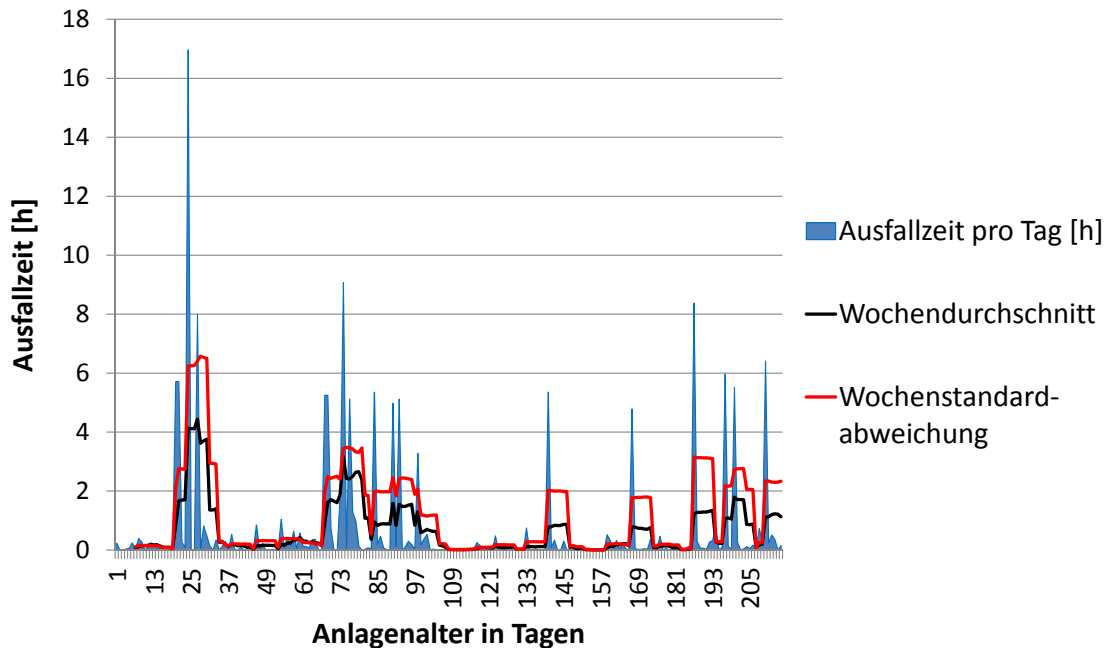


Abbildung A.2 Verhalten des Arbeitsplatzes BD

## A.2 Fahrzeuge

Bei den 150 Fahrzeugen sticht nur das Fahrzeug Nr. 138 durch überdurchschnittliche Ausfallzeiten heraus. Dessen Ausfallzeiten betragen 3,45 % der Gesamtausfallzeit. Diese treten geballt in der ersten Woche auf. Ab der vierten Woche gibt es keine Ausfallzeiten mehr, vgl. Abbildung A.5. Das Fahrzeug Nr. 140 repräsentiert mit 0,43 % der Gesamtausfallzeit den Durchschnitt der Fahrzeuge und liegt außerdem sehr nahe am Durchschnitt aller Elemente (= 0,45 %). Das Ausfallverhalten dieses Durchschnittsfahrzeugs ist gekennzeichnet durch eine hohe Spitze in der fünften Woche und regelmäßig verteilten Ausfallspitzen von ca. einer viertel bis halben Stunde Ausfallzeit, vgl. Abbildung A.6.

## A.3 Streckenabschnitte

Von den 69 Streckenabschnitten haben 45 keine Ausfallzeiten im Beobachtungszeitraum zu verzeichnen. Der Streckenabschnitt STAT-LOOP-12 hat das Maximum an Ausfallzeit mit 0,22 % der Gesamtausfallzeit. Diese ist in wenigen Einzelspitzen von maximal 1,5 Stunden verteilt, vgl. Abbildung A.7. Der Streckenabschnitt OB-LOOP-12 repräsentiert mit 0,02 % der Gesamtausfallzeit den Durchschnitt der Streckenabschnitte. Es treten nur vereinzelt kurze Ausfallzeiten auf, vgl. Abbildung A.8.

## A.4 Hubwerke und Gehängereinigung

Vier Anlagenelemente lassen sich keiner größeren Gruppe zuordnen und werden daher jeweils einzeln dargestellt. Das Hubwerk 1 ist für 2,54 % der Gesamtausfallzeit verantwortlich. Diese treten gehäuft in den ersten beiden Wochen auf, und sind anschließend

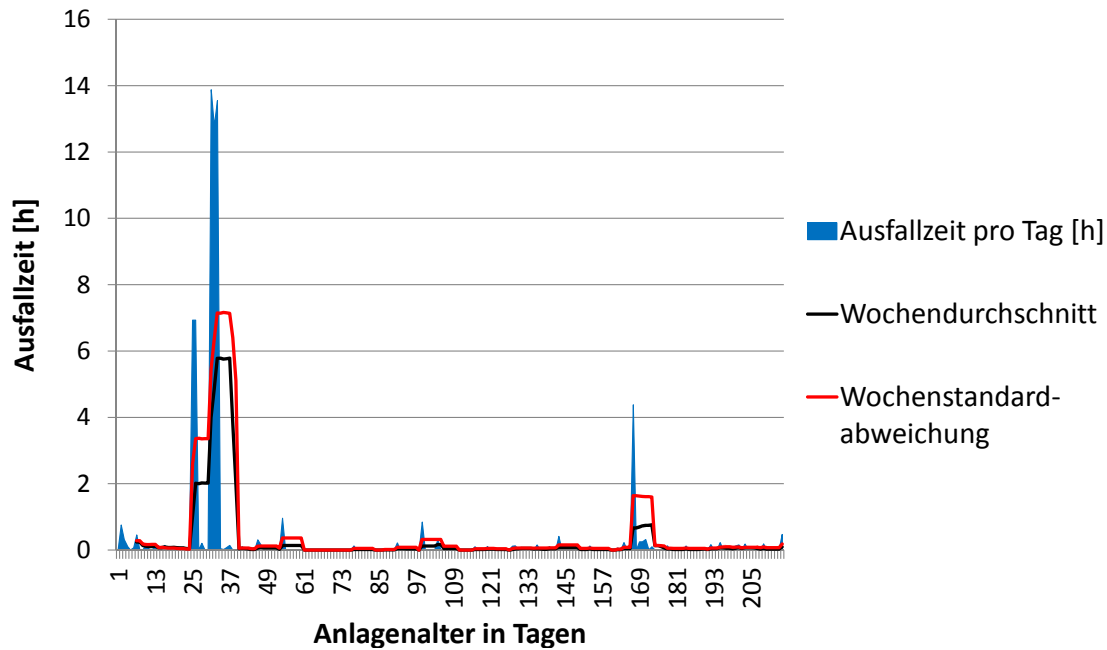


Abbildung A.3 Verhalten des Arbeitsplatzes OB4

relativ gleichmäßig verteilt. Damit ist dieses Anlagenelement durch ein ausgeprägtes Einschwingverhalten gekennzeichnet, vgl. Abbildung A.9. Das Hubwerk 2 (1,87 % der Gesamtausfallzeit) dagegen hat häufige und regelmäßig verteilte Ausfallspitzen, im Maximalfall von ca. 4,5 Stunden, vgl. Abbildung A.10. Das Hubwerk 3 hat mit 0,69 % der Gesamtausfallzeit vergleichsweise geringe Ausfallzeiten in mehrheitlich der ersten Hälfte der Betrachtungsdauer, vgl. Abbildung A.11.

Die automatische Gehängereinigungsstation fällt durch seinen sehr geringen Anteil an der Ausfallzeit (0,02 %) auf. Diese sind in zwei kurzen Einzelspitzen verteilt, vgl. Abbildung A.12.



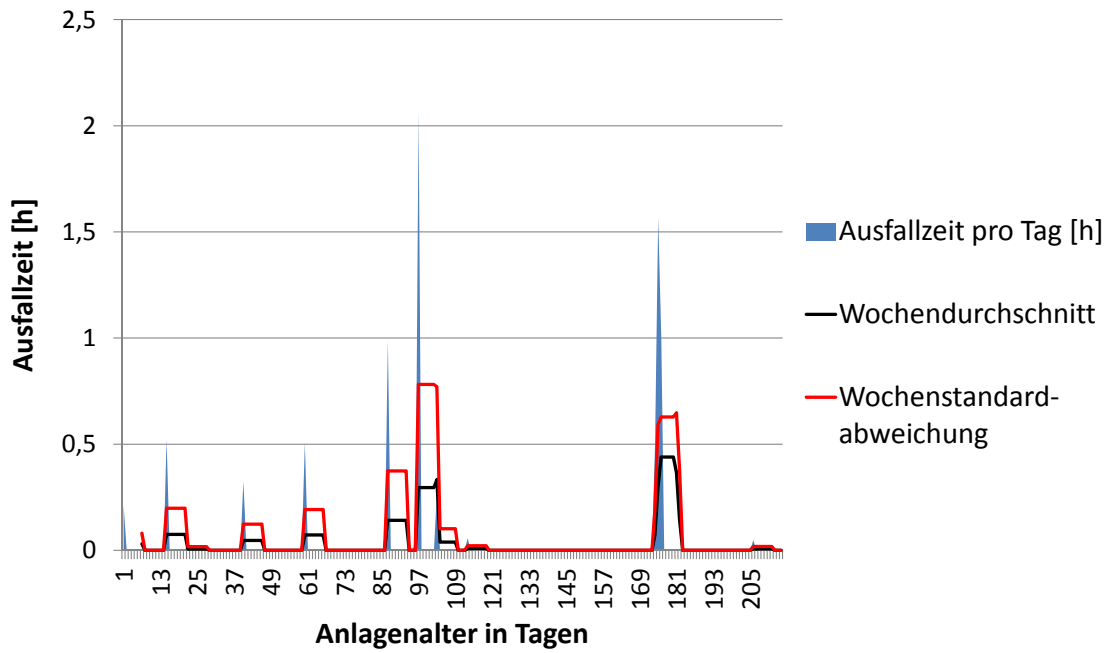


Abbildung A.4 Verhalten des Arbeitsplatzes DS11

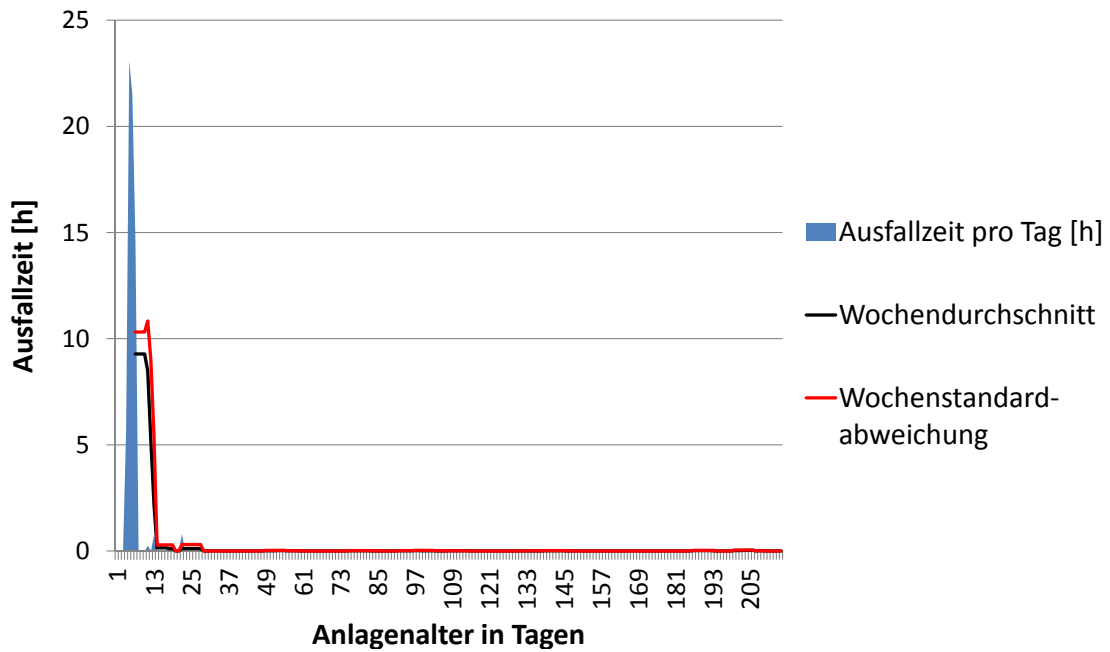


Abbildung A.5 Verhalten des Fahrzeugs 138

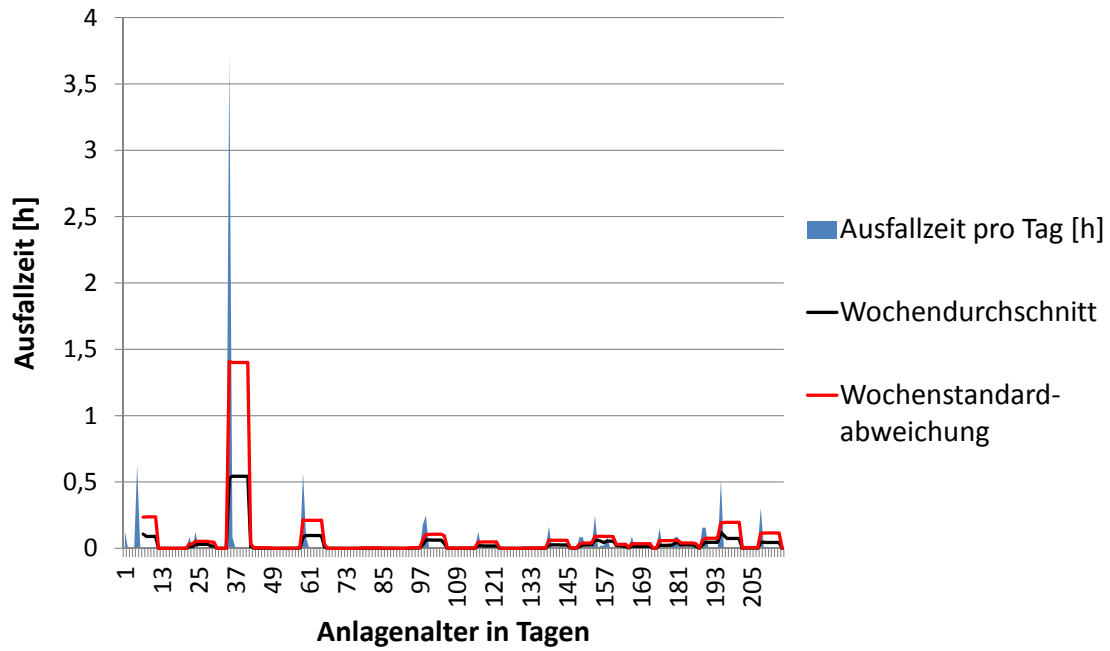


Abbildung A.6 Verhalten des Fahrzeugs 140

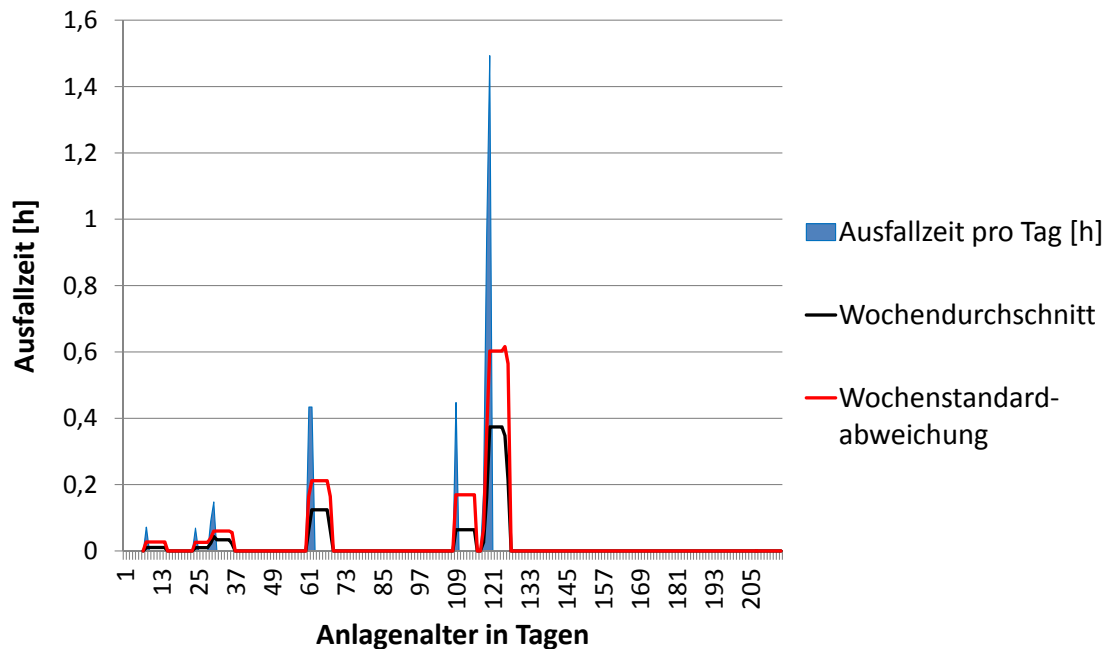


Abbildung A.7 Verhalten des Steckenabschnittes STAT-LOOP-12

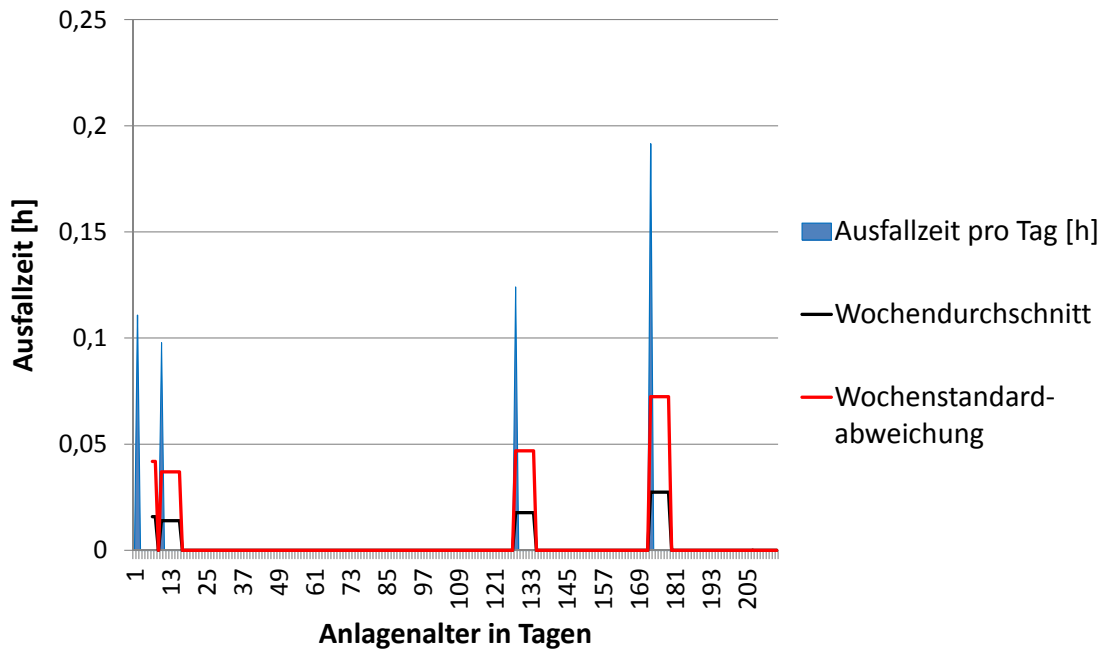


Abbildung A.8 Verhalten des Steckenschnittes OB-LOOP-12

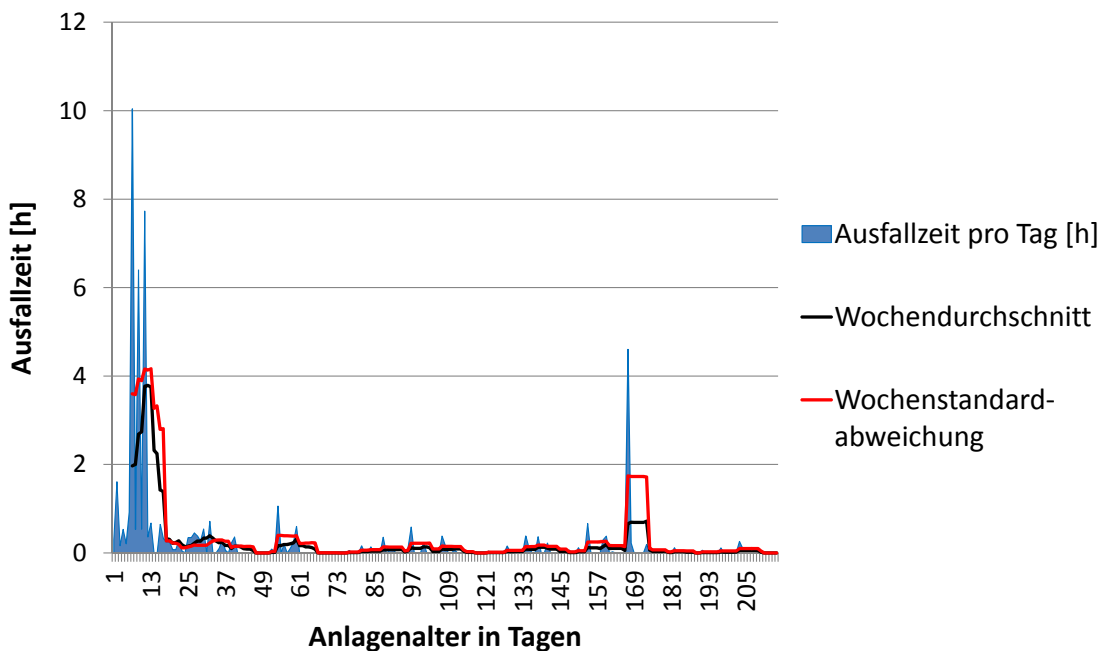


Abbildung A.9 Verhalten des Hubwerks 1

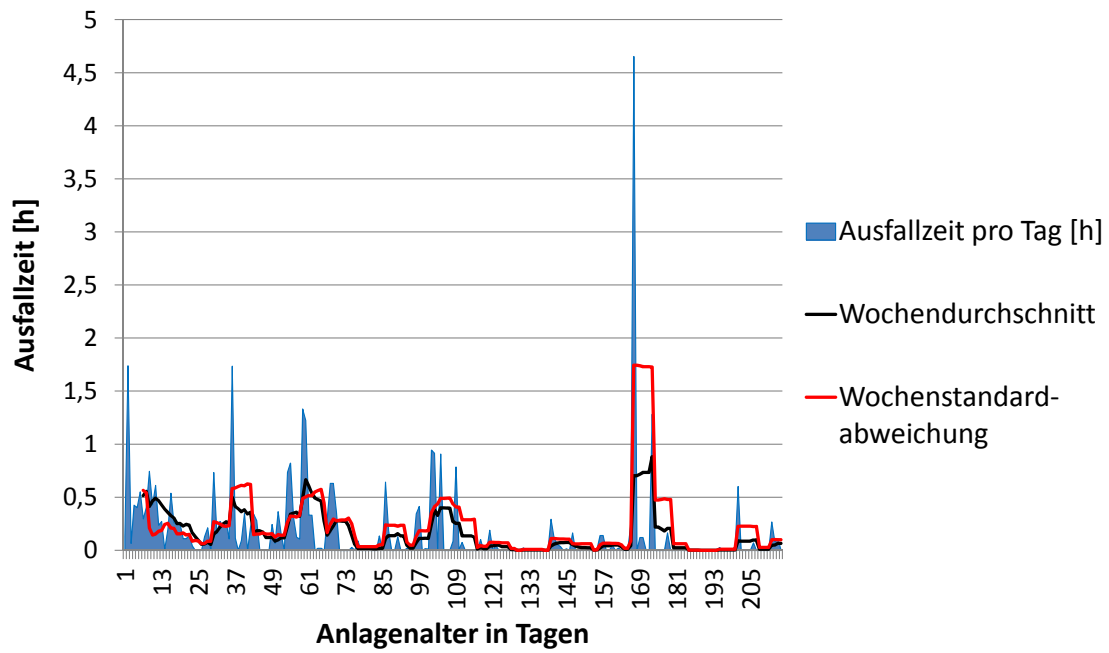


Abbildung A.10 Verhalten des Hubwerks 2

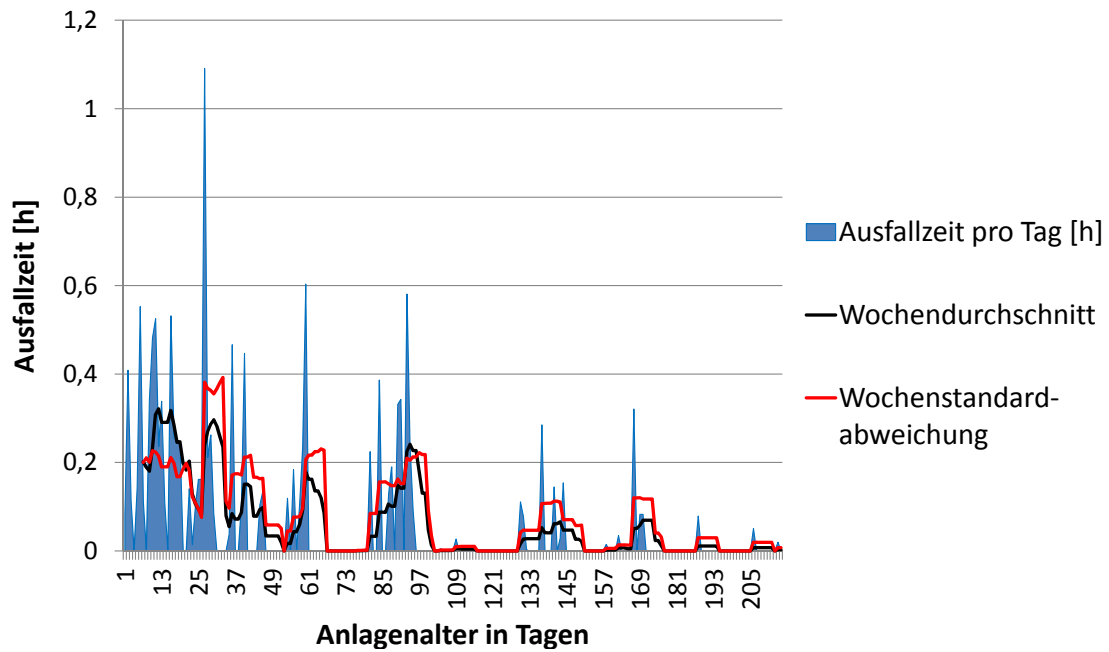


Abbildung A.11 Verhalten des Hubwerks 3

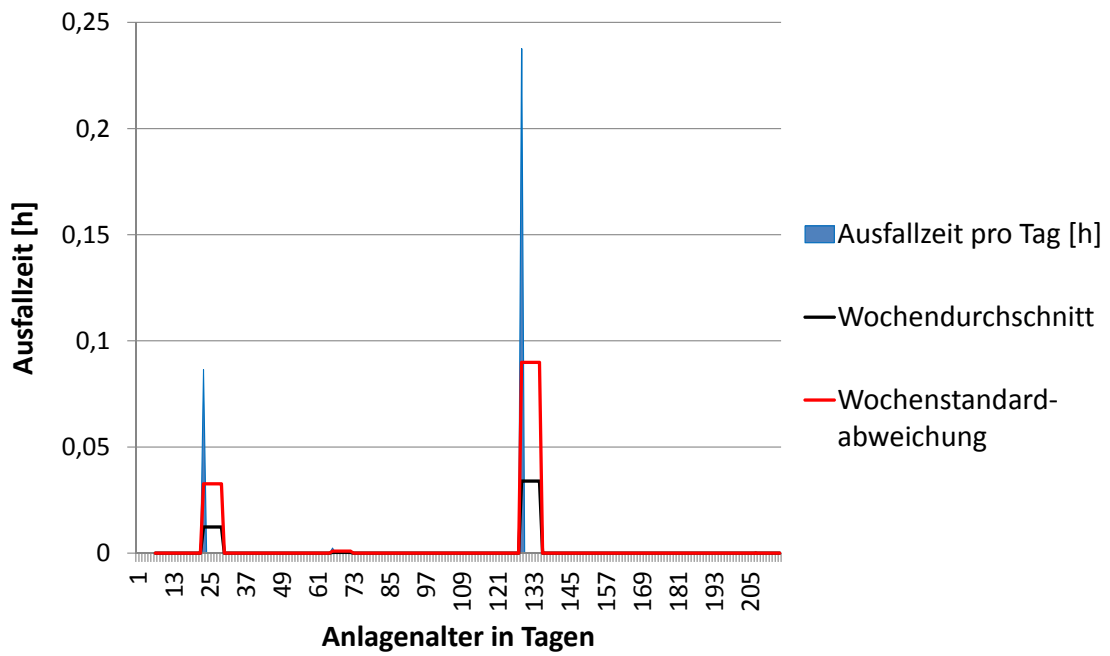


Abbildung A.12 Verhalten der automatischen Gehängereinigung

# B Zur Prognose der Leistungsverfügbarkeit

## B.1 Ermittlung der Prognoseparameter

### B.1.1 Lagerplanung - Kapitel 8

#### Ermittlung der Solleleistungsdaten

Die Materialflusszahlen der Gesamtanlage (vgl. Tabelle 8.4, S.110) werden für alle Anlagenelemente heruntergebrochen. Daraus ergeben sich die geforderten Spielzeiten, beispielhaft wird dies in Tab. B.1) für die Basisauslegung des Lagers mit Verfahrwagen gezeigt.

**Tabelle B.1** Materialflusszahlen [Paletten/Stunde] - Basislager mit Verfahrwagen

Start	$\Sigma$	ab WE	zu AL	zu K1-K2	ab K1-K2	Verfahr- wagen	ab RBG	zu RBG	RBG	Ziel
Anzahl		1	1	2	2	1	3	3	3	
WE	12	12	-	-	-	12	-	4	4	HRL
HRL	60	-	-	30	-	60	20	-	20	K1-K2
HRL	12	-	12	-	-	12	4	-	4	AL
K1-K2	60	-	-	-	30	60	-	20	20	HRL
$\Sigma$	144	12	12	30	30	144	24	24	48	
Spielzeit [min]		5	5	2	2	0,42	2,5	2,5	1,25	
Spielzeit [s]		300	300	120	120	25	150	150	75	

**Tabelle B.2** Angenommene Lagerdimensionen

	Einheit	Basis	Erweitert
Gassen		3	5
Breite	Paletten	6	10
Höhe	Paletten	25	25
Tiefe	Paletten	84	84
Anzahl	Paletten	12.600	21.000
Breite	m	12,60	21,00
Höhe	m	30,75	30,75
Tiefe	m	92,25	92,25

### Angenommene Lager- und Leistungsdaten

#### Leistungsdaten der Regalbediengeräte viapal [via10, S. 5]

**Höhe:**

45 m

**Fahrgeschwindigkeit:**

240 m/min

**horizontale Beschleunigung:**

1 m/s

**Geschwindigkeit Heben/Senken:**

80 m/min

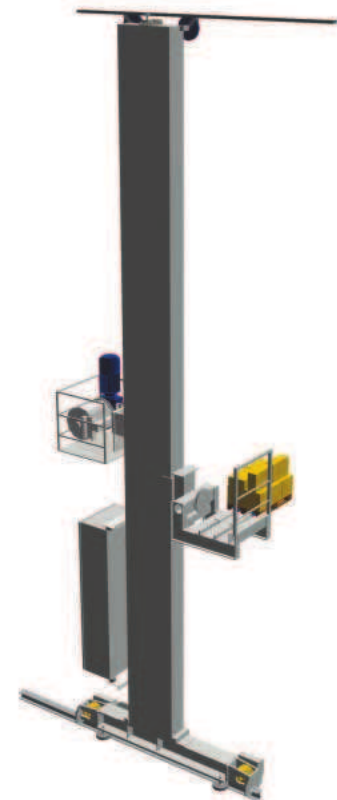
**Zeit für Aufnahme/Abgabe einer Palette:**

5 s (eigene Annahme)

#### Berechnung der Spielzeiten nach FEM 9.951 [FEM03]

Einzelspiel: 40,8 s, Doppelspiel: 61,5 s

Durchschnittliche Spielzeit bei einem Doppelspielanteil  
von 50%: 58,8 s



**Abbildung B.1** viapal  
[via10]

**Leistungsdaten des Verfahrwagens  
Typ 148 VW [FAB10]**

**Ausführung:**

leicht: 500 kg, mittel: 2.000 kg, schwer: 5.000 kg

**Ladungsträger:**

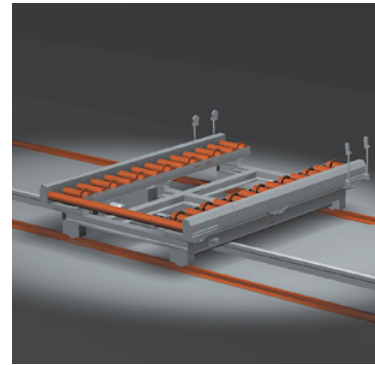
800 mm x 1.200 mm bis 2.000 mm x 2.500 mm

**Antriebsleistung:**

0,37 kW bis 1,5 kW

**Geschwindigkeit:**

0,15 m/s bis 1,5 m/s, gewählt: 1,5 m/s



**Abbildung B.2**  
Typ 148 VW [FAB10]

**Leistungsdaten des Fahrerlosen Transportsystems  
Nuyts FTS [Nuy06]**

**Ladekapazität:**

ca. 300 kg

**Fahrzeugdimensionen:**

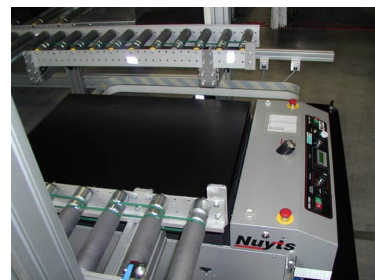
1800 x 1700 x 450 mm

**Maximale Geschwindigkeit:**

1 m/s

**Durchschnittliche Geschwindigkeit:**

0,5 m/s (eigene Annahme)



**Abbildung B.3**  
Nuyts FTS [Nuy06]

**Tabelle B.3** Weitere angenommene Werte

Bezeichnung	Wert	Einheit
Pufferplätze im Einlagerstich	5	Stück
Pufferplätze im Auslagerstich	5	Stück
Pufferplätze Übergabe vom/zum RBG	1	Stück
Pufferplätze vor und nach den Arbeitspätzen	3	Stück
Fördergeschwindigkeit der Steigfördertechnik	0,5	m/s

**Berechnung der Prognoseparameter**

Aus den Daten des geplanten Lagers und den Leistungsdaten der ausgewählten Elemente lassen sich die Prognoseparameter ableiten. Beispielhaft werden für ein defektes Regalbediengerät in der Basisvariante des Lagers mit Verfahrwagen die Parameter für die Prognose der Auswirkungen am Wareneingang ermittelt.

**Redundanzfaktoren** Der Redundanzfaktor hängt im gleichen Maße von der technischen Lagerauslegung, als auch von den organisatorischen Betriebsstrategien. Parallele Regalbediengeräte mit hohen Reservekapazitäten können theoretisch die komplette Ein- und Auslagerleistung eines ausgefallenen Regalbediengerätes zumindest für eine Zeit übernehmen. Organisatorisch betrachtet gibt es allerdings immer einen gewissen Teil an Aufträgen, die an das betrachtete Regalbediengerät gebunden sind, und so nicht von



redundanten Geräten übernommen werden können. Im Beispielfall wird dieser Anteil auf 20 % geschätzt, der Redundanzfaktor  $R_{RBG} = 0,2$ . Elemente, die wie der Verfahrwagen über keine parallelen Redundanzen verfügen, haben einen Redundanzfaktor von 1.

**Kapazitätsfaktoren** Zur Ermittlung des Kapazitätsfaktors müssen zunächst die technischen Reservekapazität der Elemente ermittelt werden. Sie berechnen sich aus dem Verhältnis von technisch möglicher Leistung zur Soll-Leistung. Die Mindestanforderungen ergeben sich aus Tabelle B.1, für die Regalbediengeräte wird demnach eine Leistung von 48 Ein- und Auslagervorgängen pro Stunde gefordert, für den Verfahrwagen 144 verfahrene Paletten pro Stunde.

Die technisch möglichen Kapazitäten ergeben sich aus den Leistungsdaten: Aus dem Kehrwert der durchschnittlichen Spielzeit ergeben sich 102,7 Ein- und Auslagervorgänge pro Stunde, das ergibt einen technischen Kapazitätsfaktor der Regalbediengeräte von 2,1.

Aus den Lagerdimensionen ergibt sich ein Maximalweg von 8,4 m, wenn der Verfahrwagen von der äußersten Übergabestelle zur weitest entfernten Übergabestelle fahren muss. Im günstigsten Fall kann der Verfahrwagen an seiner Position bleiben, um den nächsten Auftrag zu übergeben. Das ergibt einen durchschnittlichen Weg von 4,2 m pro Verfahrtauftrag. Um die geforderten 144 Paletten pro Stunde fahren zu können, ist eine Geschwindigkeit von 0,34 m/s nötig. Aus dem Verhältnis der möglichen Geschwindigkeit von 1,5 m/s und der genannten nötigen Geschwindigkeit ergibt sich ein technischer Kapazitätsfaktor des Verfahrwagens von 4,4.

Wirksam wird der minimale Kapazitätsfaktor zwischen betrachtetem Element und Schnittstelle. Unter der Annahme, dass die verbindende Stetigförderertechnik ausreichend groß dimensioniert wurde, ergibt sich für den wirksamen Kapazitätsfaktor:

$$K_{RGB,WE} = \text{Min}(K_{RGB}, K_{VW}) = 2,1$$

**Pufferzeiten** Nach Gleichung (8.1), S. 101 werden zur Berechnung der Pufferzeiten die Taktzeiten an den Schnittstellen benötigt; sie bilden den Kehrwert der Leistungszahlen pro Stunde an den Schnittstellen:

**Tabelle B.4** Taktzeiten

Schnittstelle	Arbeitstakt
Wareneingang (basis)	2,0 min
Wareneingang (erweitert)	1,3 min
Kommissionierarbeitsplätze	2,0 min
Auslagerung (basis)	5,0 min
Auslagerung (erweitert)	3,3 min

Die vorhandenen Pufferplätze zwischen dem betrachteten Element  $i$  und der betrachteten Schnittstelle  $x$  ergeben sich aus den Werten der Tabelle B.3. Im Falle des Regalbediengeräts und dem Wareneingang bei der Basisvariante der Verfahrwagenlagers sind dies 5 Pufferplätze zwischen Wareneingang und VW und 1 Pufferplatz zwischen VW und RBG.

Mit Hilfe des bereits ermittelten Redundanzfaktors ergibt sich für die Pufferzeit  $P_{RBG,WE}$ :

$$P_{RBG,WE} = t_{WE} \cdot p_{RBG,WE} \cdot (2 - R_{RBG}) = 2,0 \text{ min/Stück} \cdot (5 + 1) \text{ Stück} \cdot 0,2 = 21,6 \text{ min}$$

**Laufzeitreserve** Die Laufzeitreserve berechnet sich nach Gleichung (8.2), S. 102 aus dem bereits ermittelten Kapazitätsfaktor und der Restzeit. Am Wareneingang werden zum Schichtende, nach 8 h die nicht eingelagerten Paletten geprüft. Für die Prognose wird die  $T_R = 4$  h angenommen. Die Laufzeitreserve  $L_{RBG,WE}$  ist demnach:

$$L_{RBG,WE} = \frac{T_R \cdot (K_{RBG,WE} - 1)}{K_{RBG,WE}} = \frac{240 \text{ min} \cdot (2,1 - 1)}{2,1} = 125,7 \text{ min}$$

Analog berechnen sich die Prognoseparameter für alle übrigen Kombinationen aus Elementen und Schnittstellen.

### B.1.2 Modellfabrik - Kapitel 9

**Tabelle B.5** Materialflusszahlen der Modellfabrik in Stück pro 4 Stunden, Produktaufteilung 50:50, (Fall I, Fall III)

Anzahl	WE	Fräse	Laser	MKR	AP	SR60	WA	Summe
	1	1	1	2	1	1	1	
WE	-	43	43	-	-	-	-	86
Fräse	-	-	-	43	-	-	-	43
Laser	-	-	-	43	-	-	-	43
MKR	-	-	-	-	86	-	-	86
AP	-	-	-	-	-	43	-	86
SR 60	-	-	-	-	-	-	-	43
WA	-	-	-	-	-	-	-	0
Summe	0	43	43	86	86	43	86	387

**Ermittlung der Sollleistungsdaten** Bei der Produktaufteilung 70:30 werden insgesamt nur 82 Stück in 4 h gefertigt.

**Tabelle B.6** Materialflusszahlen der Modellfabrik in Stück pro 4 Stunden, Produktaufteilung 70:30, (Fall II)

Anzahl	WE	Fräse	Laser	MKR	AP	WA	Summe
	1	1	1	2	1	1	
WE	-	57,4	24,6	-	-	-	84
Fräse	-	-	-	57,4	-	-	57,4
Laser	-	-	-	24,6	-	-	24,6
MKR	-	-	-	-	86	-	84
AP	-	-	-	-	-	-	84
SR 60	-	-	-	-	-	-	57,4
WA	-	-	-	-	-	-	0
Summe	0	57,4	24,6	84	84	84	385,4

### Berechnung der Prognoseparameter

Aus den Daten der Modellfabrik und den eingestellten Leistungsdaten der Simulationselemente lassen sich die Prognoseparameter ableiten.

**Redundanzfaktoren** Der Redundanzfaktor repräsentiert den Materialflussanteil, der an das jeweilige Element gebunden ist und nicht von einer Redundanz übernommen werden kann. Die Förderelemente sind notwendig um die Werkstücke zu allen Bearbeitungsstationen zu transportieren. diese können zwar im Störfall über die Kurzschlüsse kleine Warteschleifen fahren, echte Alternativstrecken sind aber nicht vorhanden, daher haben alle Förderelemente einen Redundanzfaktor von 1.

Die Bearbeitungsstationen Fräse, Laser und SR 60 sind jeweils einfach vorhanden, je nach Produktaufteilung läuft aber jeweils nur ein Teil des Gesamtmaterialflusses über diese Stationen, vgl. Tabelle 9.3, S. 123. Der Redundanzfaktor dieser Stationen entspricht daher jeweils dem Produktanteil, der auf der Station bearbeitet wird.

Die Bearbeitungsstation MKR ist zweifach vorhanden, wobei jede Station nur 75 % der geforderten Gesamtmenge bearbeiten kann. Im Störfall einer Station können demnach 25 % nicht bearbeitet werden. Der Redundanzfaktor der MKR-Stationen beträgt demnach  $R_{MKR} = 0,25$ .

**Kapazitätsfaktoren** Die Kapazitätsfaktoren der Bearbeitungsstationen berechnen sich aus Sollstückzahlen (Tabellen B.5 und B.6) und den Leistungsdaten (Tabelle 9.3) der Bearbeitungsstationen, vgl. Tabelle B.7. Versorgende Förderstrecken haben keine Reservekapazitäten ( $K_{FS1-4,versorgend} = 1$ ), bei der Entsorgung können bis zu 6 % mehr Einheiten auf die Förderstrecken als üblich abgegeben werden ( $K_{FS1-4,entsorgend} = 1,06$ ).

$$\begin{aligned} K_{Laser,WA,50:50} &= \text{Min}(K_{FS1-4,versorgend}, K_{Laser}, K_{MKR}, K_{SR60}) \\ &= \text{Min}(1,06; 3,35; 1,67; 1,34) = 1,06 \end{aligned}$$

**Tabelle B.7** Die Kapazitätsfaktoren  $K_i$  der Elemente  $i$

$i$	50:50	70:30	$i$	Entsorgend	Versorgend
Fräse	3,35	2,51	FS 1	1,00	1,06
Laser	3,35	5,85	FS 2	1,00	1,06
MKR	1,67	1,76	FS 3	1,00	1,06
SR 60	1,34	1,00	FS 4	1,00	1,06

**Puffer** Der Förderkreis, der die Bearbeitungsstationen verbindet, dient gleichzeitig als großer Ausgangspuffer: Der Wareneingang und der Handarbeitsplatz in Quellenfunktion können eine sehr große Anzahl von Produkten auf den Förderkreis abgeben, auch wenn die nachliegende Verarbeitung gestört ist. Als Eingangspuffer für den Wareneingang und den Handarbeitsplatz in Senkenfunktion dienen nur die Anzahl der Produkte, die sich im nötigen Bearbeitungszustand auf dem Förderkreis befinden. Diese Anzahl ist abhängig vom Füllstand der Anlage. Gewählt wurden die Parameter aus Tabelle B.8.

Mit Hilfe der Taktzeit aus Tabelle 9.3, S. 123 und dem bereits ermittelten Redundanzfaktor ergibt sich für die Pufferzeit des Koordinatenroboters bezogen auf den Handarbeitsplatz  $P_{MKR,AP}$ :

$$\begin{aligned} P_{MKR,AP} &= t_{AP} \cdot p_{MKR,AP} \cdot (2 - R_{MKR}) \\ &= 150 \text{ s/Stück} \cdot 2 \text{ Stück} \cdot 2 - 0,25 \\ &= 525 \text{ s} = 8,75 \text{ min} \end{aligned}$$

Analog dazu berechnen sich die übrigen Pufferzeiten.

**Tabelle B.8** Gewählte Pufferplätze für die Prognose

	Wareneingang	Handarbeitsplatz	Warenausgang
FE 1	0	2	3
FE 2	50	3	4
FE 3	50	23	3
FE 4	50	1	3
Fräse	50	3	3
Laser	50	3	3
MKR	50	2	5
SR 60	50	27	2

**Laufzeitreserve** Während bei einer realen Anlage Störungen zu einem zufälligen Zeitpunkt auftreten, kann bei einer Simulation das Auftreten einer Störung festgelegt werden. Daher können für die Simulationsexperimente konkrete Laufzeitreserven berechnet werden. In Fall I und II tritt die Störung nach 30 Minuten Simulationszeit auf, in Fall III nach 2 Stunden, 45 Minuten [Nag10, S. 43]. Aus der Gesamtsimulationsdauer von 4 Stunden ergibt sich daraus eine Restzeit  $T_{R,I,II} = 210$  Minuten in den Simulationsreihen I und II, bzw.  $T_{R,III} = 75$  Minuten in der Simulationsreihe III.

Mit den Kapazitätsfaktoren ergeben sich nach Gleichung (8.2), S. 102 die Laufzeitreserven, beispielsweise für den MKR bzogen auf den Warenausgang im Fall einer spätauftretenden Störung:

$$L_{MKR,WA} = \frac{T_{R,III} \cdot (K_{MKR,WA} - 1)}{K_{MKR,WA}} = \frac{75 \text{ min} \cdot (1,06 - 1)}{1,06} = 11,89 \text{ min}$$

Analog berechnen sich die Prognoseparameter für alle übrigen Kombinationen aus Restzeit, Elementen und Schnittstellen.

## B.2 Das Prognoseergebnis der weiteren Elemente der Modellfabrik im Vergleich zur Simulation

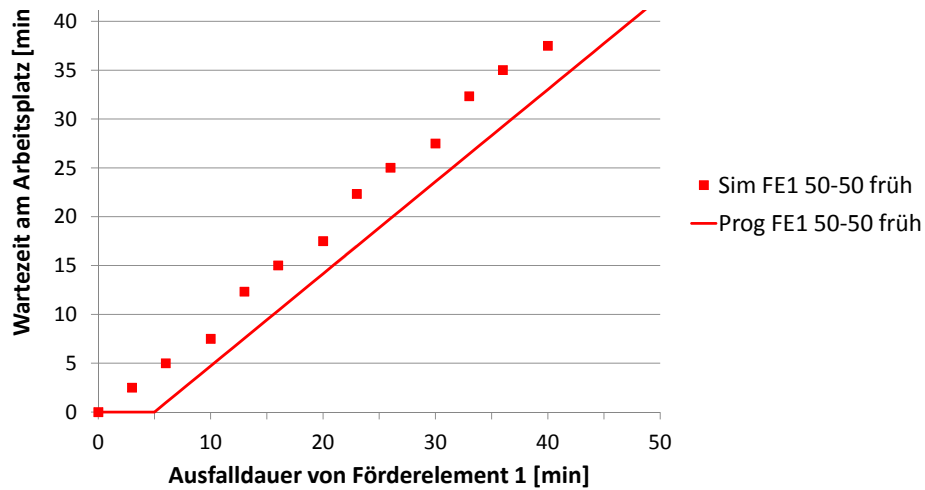


Abbildung B.4 Prognose und Simulationsergebnis von Fördererelement 1 am Arbeitsplatz

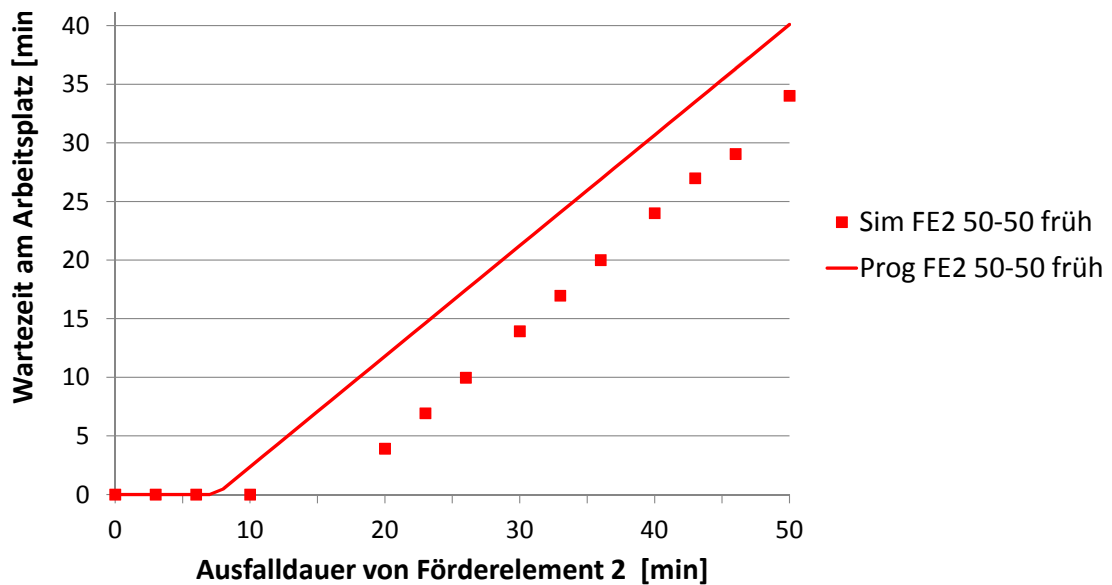


Abbildung B.5 Prognose und Simulationsergebnis von Fördererelement 2 am Arbeitsplatz

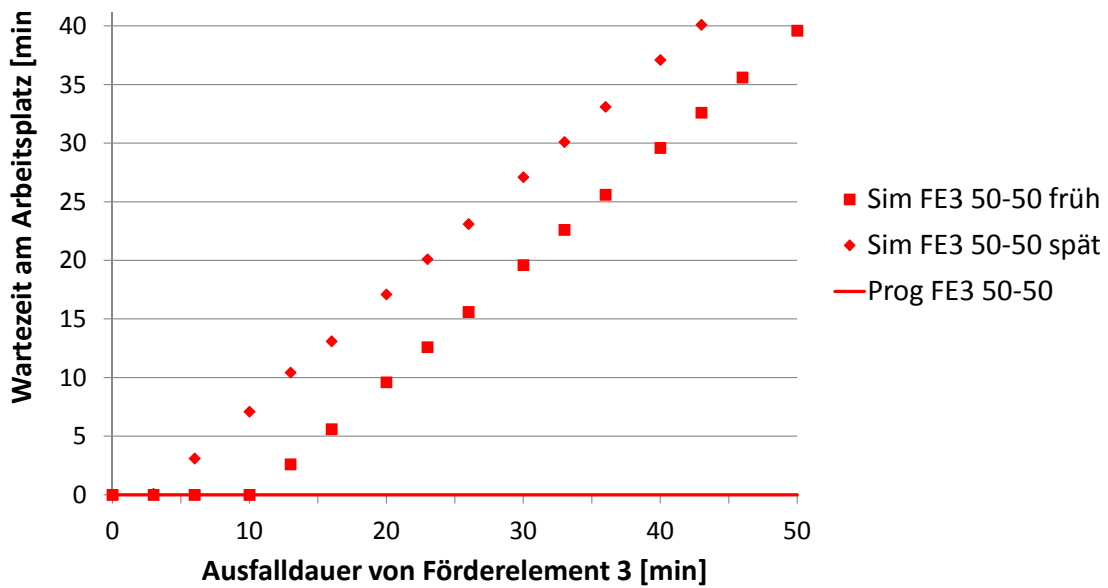


Abbildung B.6 Prognose und Simulationsergebnis von Förderelement 3 am Arbeitsplatz

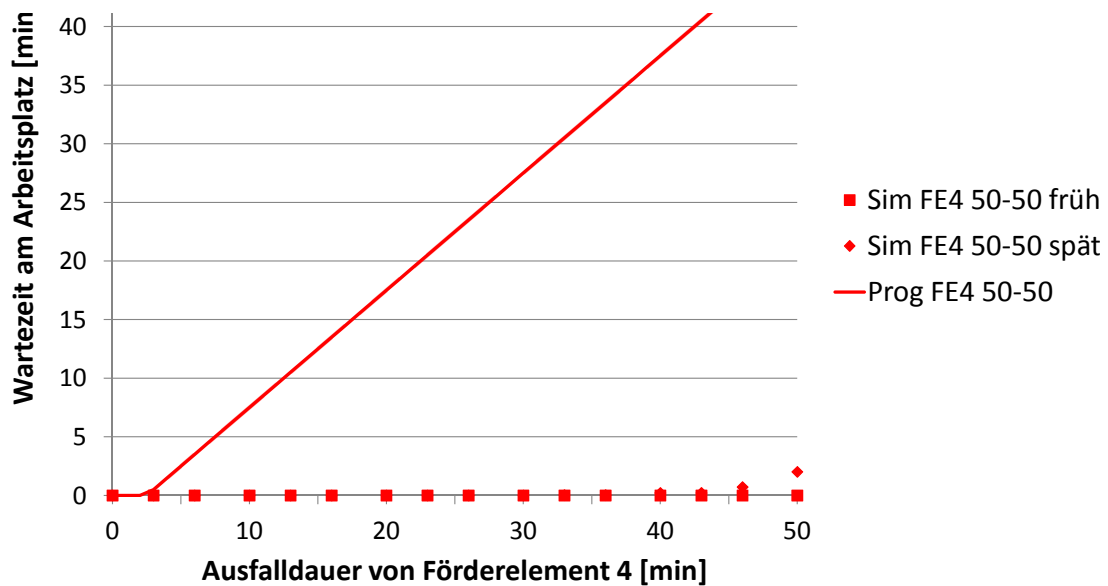


Abbildung B.7 Prognose und Simulationsergebnis von Förderelement 4 am Arbeitsplatz

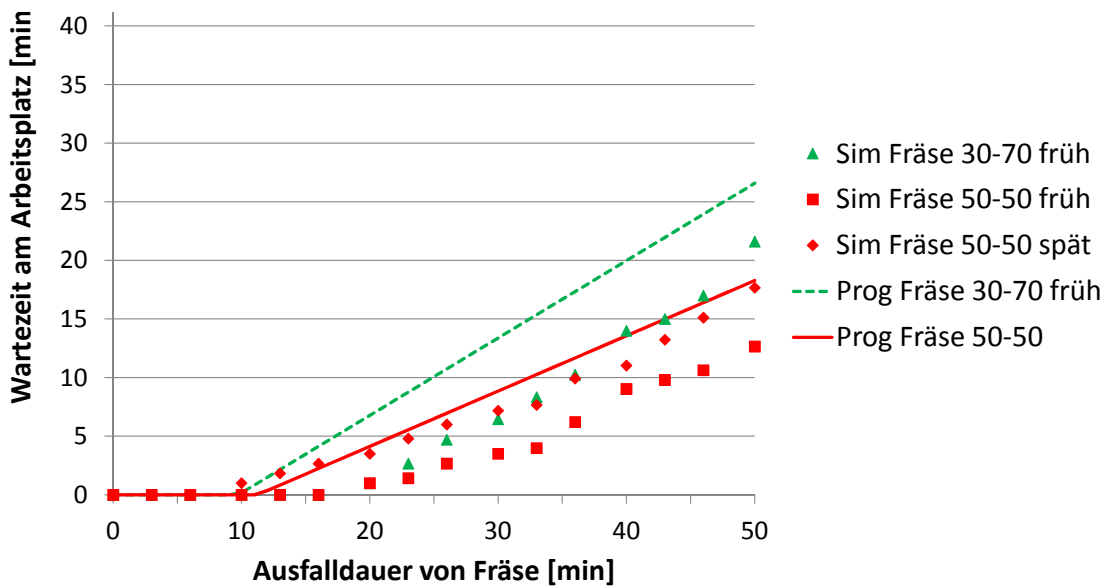


Abbildung B.8 Prognose und Simulationsergebnis von Fräse am Arbeitsplatz

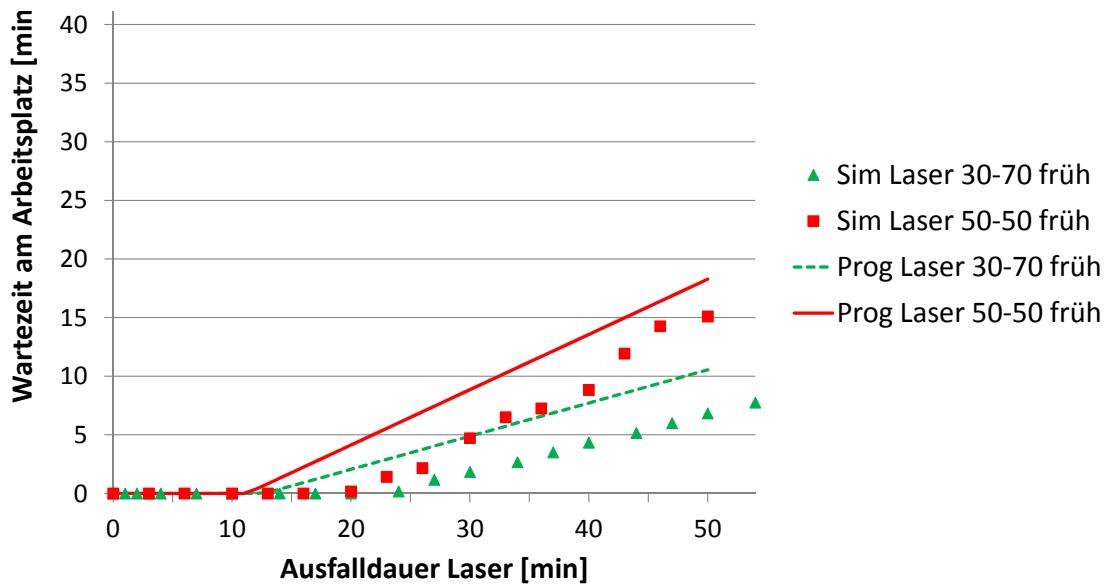


Abbildung B.9 Prognose und Simulationsergebnis von Laser am Arbeitsplatz

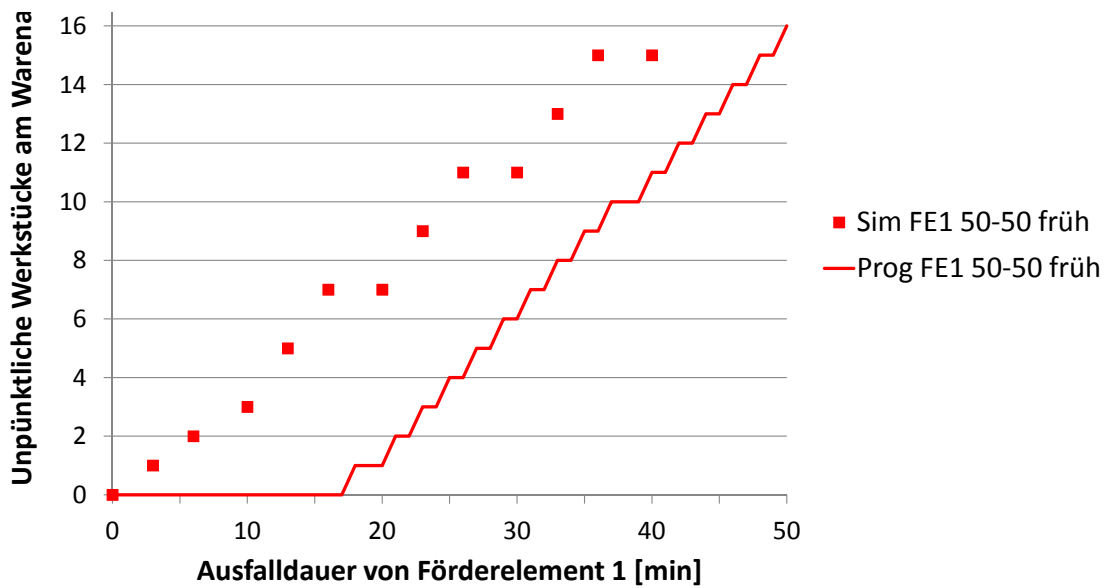


Abbildung B.10 Prognose und Simulationsergebnis von Fördererelement 1 am Warenausgang

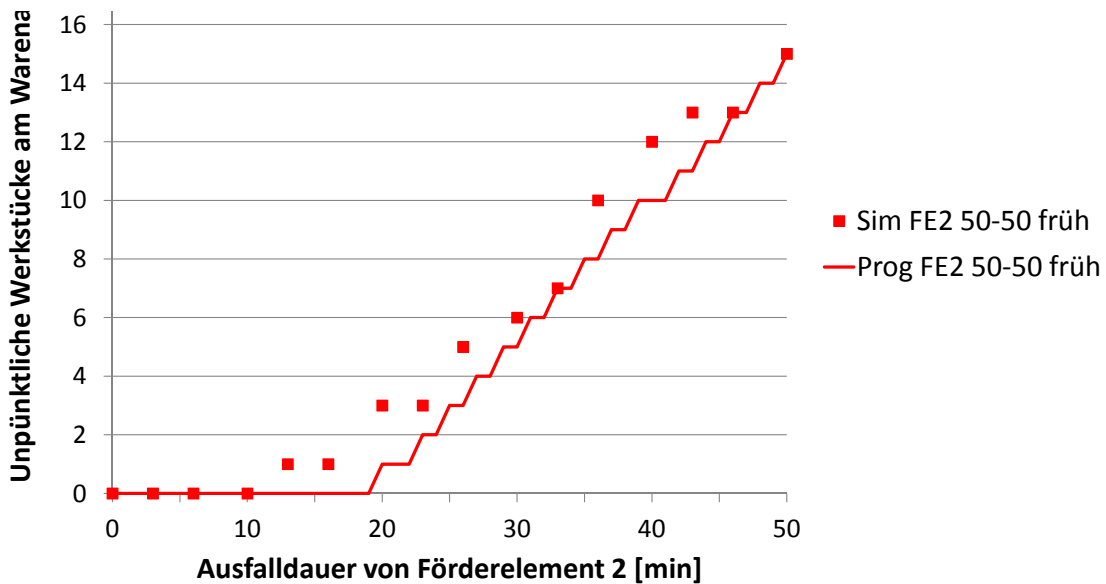


Abbildung B.11 Prognose und Simulationsergebnis von Fördererelement 2 am Warenausgang



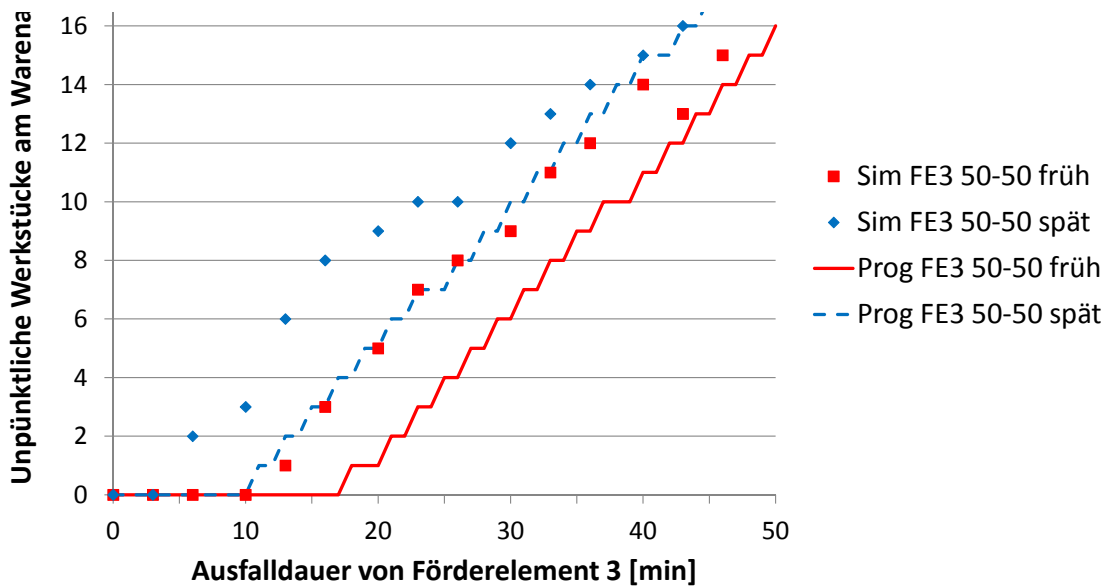


Abbildung B.12 Prognose und Simulationsergebnis von Fördererelement 3 am Warenausgang

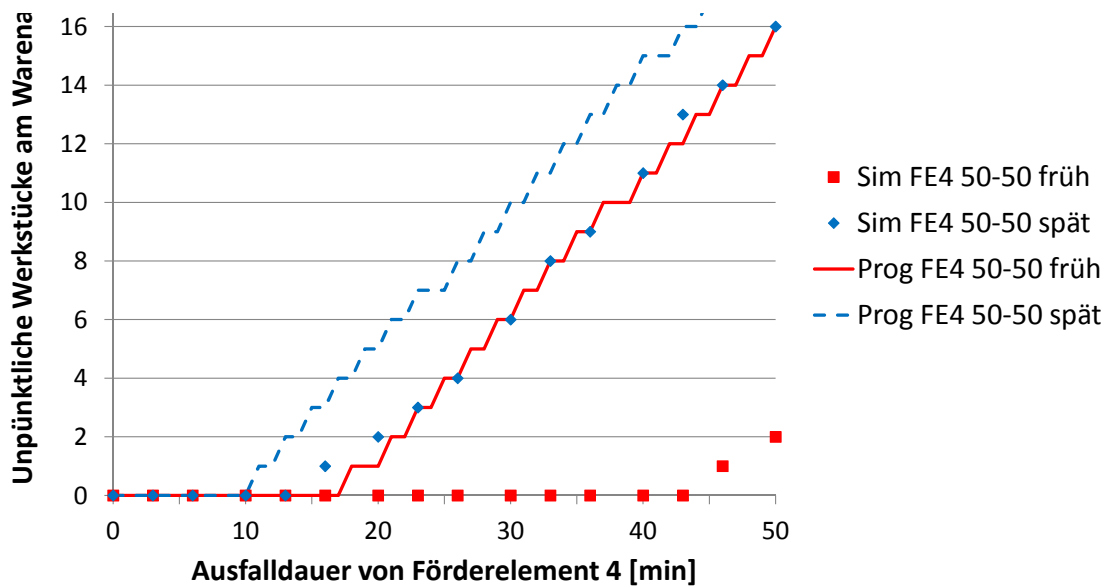


Abbildung B.13 Prognose und Simulationsergebnis von Fördererelement 4 am Warenausgang

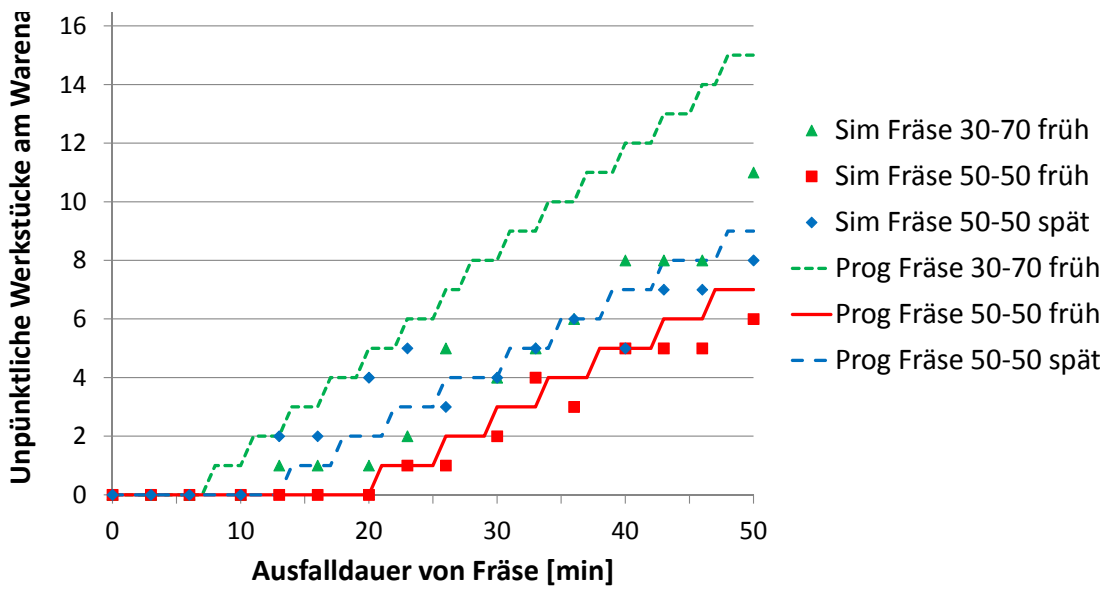


Abbildung B.14 Prognose und Simulationsergebnis von Fräse am Warenausgang

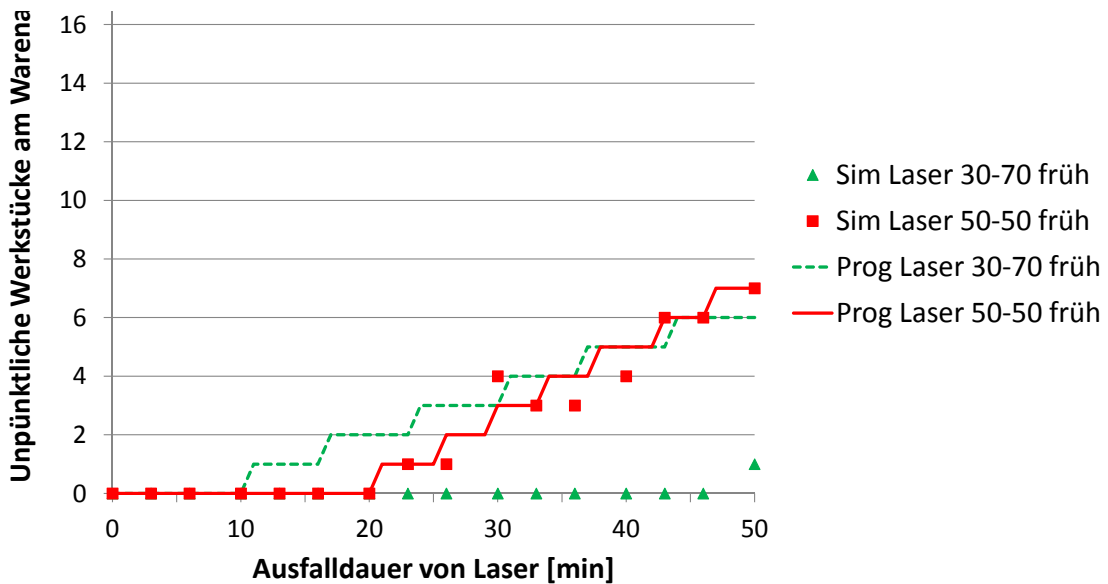


Abbildung B.15 Prognose und Simulationsergebnis von Laser am Warenausgang

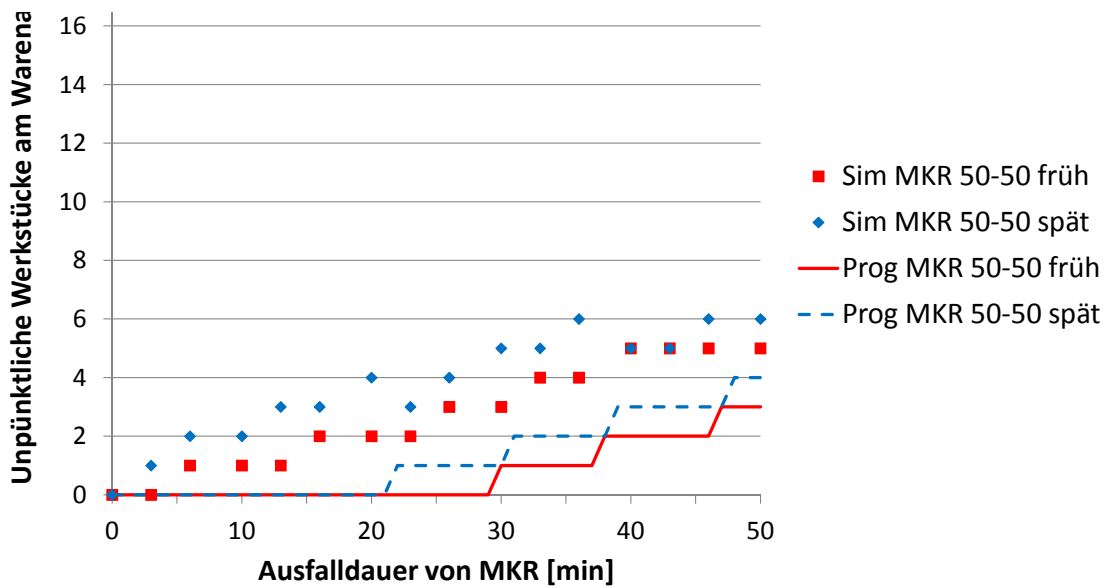


Abbildung B.16 Prognose und Simulationsergebnis von MKR am Warenausgang

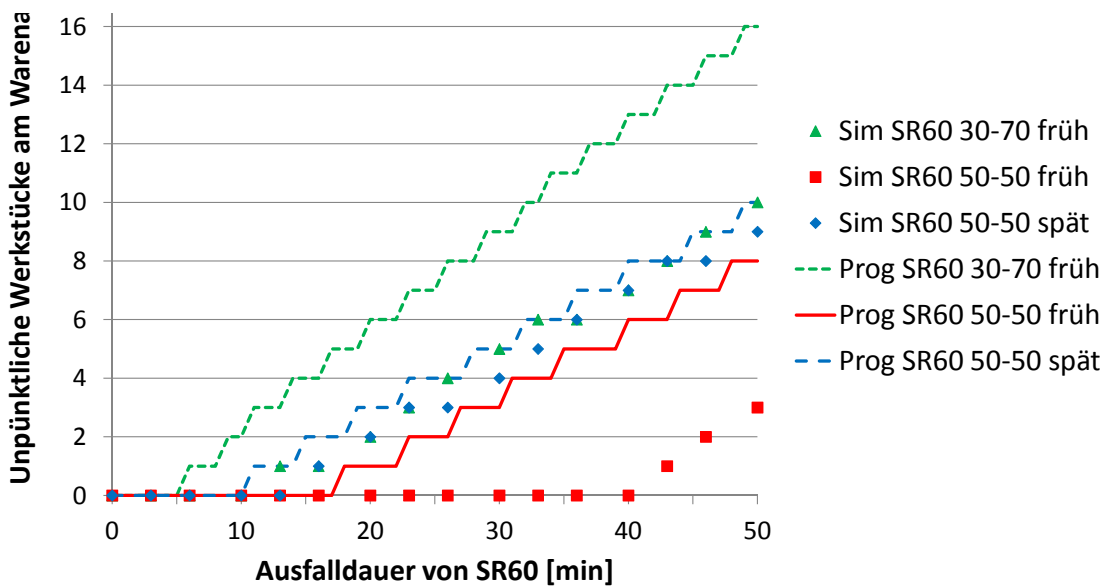


Abbildung B.17 Prognose und Simulationsergebnis von SR 60 am Warenausgang

---

# Literaturverzeichnis

- [AFI<sup>+</sup>08] ARNOLD, Dieter ; FURMANS, Kai ; ISERMANN, Heinz ; KUHN, Axel ; TEMPELMEIER, Horst: *Handbuch Logistik*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008 (VDI-Buch)
- [AFX08] AFX dpa: *Nach Catering-Panne bei Lufthansa wieder normaler Flugverkehr*. <http://www.wallstreet-online.de/nachrichten/nachricht/2385755.html>. Version: 16.05.2008, Abruf: 23.03.2009
- [Ano08] ANONYM: *Der Generalunternehmer besteht darauf, anonym zu bleiben, ist den Gutachtern aber bekannt*. 2008
- [Arm81] ARMBRUSTER, R.: Schwachstellen bei der Inbetriebnahme aus der Sicht des Betreibers. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *Automatisierte Materialfluß-Systeme (AMS), Vermeiden von Schwachstellen*, VDI-Verlag, 1981 (VDI-Berichte 433), S. 65–73
- [Arn06] ARNOLD, Dieter (Hrsg.): *Intralogistik: Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. Berlin : Springer, 2006
- [Böc78] BÖCKMANN, Hubert: *Technisch-wirtschaftliche Kriterien hinsichtlich der Verfügbarkeit komplexer Lager- und Warenverteilungssysteme*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1978
- [Ber10] BERNER, Winfried: *Change! 15 Fallstudien zu Sanierung, Turnaround, Prozessoptimierung, Reorganisation und Kulturveränderung*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel, 2010 (Reihe Systemisches Management)
- [Bir07] BIROLINI, Alessandro: *Reliability Engineering: Theory and Practice*. 5. ed. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007
- [BL04] BERTSCHE, Bernd ; LECHNER, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Berlin : Springer, 2004 (VDI-Buch)
- [BNS76] BOHL, Bernhard F. ; NEUHAUS, Walter A. ; SCHEID, Wolf-Michael: *Forschungsberichte zur industriellen Logistik*. Bd. 3: *Systemstudie als Grundlagenmodell optimierter Instandhaltungsplanung von automatischen Transport-, Lager- und Verteilsystemen in Krankenhausanlagen*. Dortmund : Institut für Logistik, 1976
- [CeM10] CEMAT: *Was ist Intralogistik?* <http://www.cemat.de/17520?x=1>. Version: 12.02.2010, Abruf: 14.01.2011

- [DC79] DAL CIN, Mario: *Leitfäden der angewandten Mathematik und Mechanik*. Bd. 50: *Fehlertolerante Systeme: Modelle der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Diagnose und Erneuerung*. Stuttgart : Teubner, 1979
- [DEF08a] DEF STAN 00-42 PART 3: *Reliability and Maintainability (R&M) Assurance Guide*. <http://www.dstan.mod.uk/data/00/042/03000300.pdf>.  
Version: 14.03.2008, Abruf: 16.10.2009
- [DEF08b] DEF STAN 00-42 PART 4: *Reliability and Maintainability (R&M) Assurance Activity Part 4 Testability*.  
<http://www.dstan.mod.uk/data/00/042/04000200.pdf>.  
Version: 15.02.2008, Abruf: 16.10.2009
- [Die99] DIESCH, Rolf: *Forschungsberichte IWB*. Bd. 128: *Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss. 1999*. München : Utz, 1999
- [DIN90] DIN-NORM 40041: *Zuverlässigkeit: Begriffe*. Dezember 1990
- [DIN00] DIN EN NORM 50126-1: *Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS) Teil 1: Grundlegende Anforderungen und genereller Prozess*. März 2000. – Berichtigt im September 2006
- [DIN03] DIN-NORM 31051: *Grundlagen der Instandhaltung*. Juni 2003
- [DIN08] DIN EN NORM 60300-3-4: *Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-4: Anwendungsleitfaden – Anleitung zum Festlegen von Zuverlässigkeitsforderungen*. Juni 2008
- [Ds07] DAIFUKU EUROPE LTD. ; SYSMAT GMBH: *Regalbediengeräte einer Kommissionieranlage, Wittlich, Verfügbarkeitsentwicklung in der Inbetriebnahmephase*. 2006 - 2007
- [Erl10] ERLACH, Klaus: *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010 (VDI-Buch)
- [FAB10] FAB GMBH FÖRDERTECHNIK UND ANLAGENBAU: *Produktinformation: Verfahrwagen Typ 148 VW*.  
<http://www.fab-materialfluss.de/verfahrwagen.php>.  
Version: 2010, Abruf: 15.11.2010
- [FEM81] FEM-REGEL 9.221: *Leistungsnachweis für Regalbediengeräte: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit*. Oktober 1981
- [FEM89] FEM-REGEL 9.222: *Regeln über die Abnahme und Verfügbarkeit von Anlagen mit Regalbediengeräten und anderen Gewerken*. Juni 1989
- [FEM03] FEM-REGEL 9.851: *Serienhebezeuge - Leistungsnachweis für Regalbediengeräte - Spielzeiten*. Juni 2003

- [Füg06] FÜGEN, Oliver: *Vergleich unterschiedlicher Formen der Instandhaltungsorganisation für technische Systeme mittels Simulation*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2006
- [FJ06] FOLLERT, Guido ; JUNG, Eike-Niklas: Verfügbarkeit intralogistischer Systeme: Kennwert für Planung und Betrieb. In: *Hebezeuge und Fördermittel* 46 (2006), Nr. 10, S. 482–484
- [FJ08] FOLLERT, Guido ; JUNG, Eike-Niklas: Verfügbarkeit - damit können Sie rechnen! Software optimiert und vereinfacht Verfügbarkeitskalkulation. In: *Logistik für Unternehmen* 22 (2008), Nr. 4, S. 58–59
- [FN06] FOLLERT, Guido ; NAGEL, Lars: Verfügbarkeit intralogistischer Systeme. In: *eLogistics Journal* (2006). <http://www.elogistics-journal.de/archiv/2006/november/629>, Abruf: 04.04.2007
- [Fra93] FRANKE, Wilfried: Zur Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen. In: *f+h Fördern und Heben* 43 (1993), Nr. 5, S. 295–303
- [Fra00] FRANCK, Albrecht: Verfügbarkeit / Zuverlässigkeit von Lager- und Warenverteilanlagen: Ein Dilemma des Sachverständigen? In: *LOGISTIK HEUTE* 22 (2000), Nr. 3, S. 37–39
- [Fra07] FRANK, Peter: *Erfahrungsbericht Verfügbarkeitstest: Persönliches Gespräch*. Stuttgart, LogiMAT 2007, 14.02.2007
- [Gab10] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Stichwort: Logistik*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55886/logistik-v6.html>. Version: 2010, Abruf: 13.09.2010
- [Gud76a] GUDEHUS, Timm: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transportsystemen: Teil 1: Kenngrößen der Systemelemente. In: *f+h Fördern und Heben* 26 (1976), Nr. 10, S. 1029–1033
- [Gud76b] GUDEHUS, Timm: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transportsystemen: Teil 2: Kenngrößen von Systemen. In: *f+h Fördern und Heben* 26 (1976), Nr. 13, S. 1343–1346
- [Gud79] GUDEHUS, Timm: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transportsystemen: Teil 3: Grundformeln für Systeme ohne Redundanz. In: *f+h Fördern und Heben* 29 (1979), Nr. 1, S. 23–25
- [Her07] HERGESELL, Gerhard: *Abnahmedaten zu Flughafen: Nicht zu bekommen - Stellungnahme zur Anfrage nach Daten aus konkreten Projekten eines Geschäftsgebietes für Logistik: E-Mailnachricht*. Nürnberg, 11.05.2007
- [HFSB09] HIPPENMEYER, H. ; FURMANS, Kai ; SCHÖNUNG, F. ; BERBIG, D.: KARIS - Kleinskaliges Autonomes Redundantes Intralogistiksystem: Ein innovativer alternativer Ansatz für zukünftige Materialflusssysteme. In: VDI WISSENSFORUM GMBH (Hrsg.): *18. Deutscher Materialfluss-Kongress*, VDI-Verlag, 2009 (VDI-Berichte 2066), S. 163–175

- [HH06] HEIDENBLUT, Volker ; HOMPEL, Michael ten: *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006
- [Hül90] HÜLSEN, Eberhard: Sicherung der Verfügbarkeit einer Paketsortieranlage. In: GESELLSCHAFT FÖRDERTECHNIK, MATERIALFLUSS UND LOGISTIK (Hrsg.): *Verfügbarkeit von Materialfluss-Systemen*, VDI-Verlag, 1990 (VDI-Berichte 833), S. 155–170
- [KS08] KRANEFELD, Anja ; STAUSBERG, Michael: *Kennzahlen für die Instandhaltung*. WEKA MEDIA, 2008
- [Kul07] KULWIEC, Ray: *Reliability of automated storage and retrieval systems (AS/RS): A white paper*. <http://www.mhia.org/downloads/industrygroups/as-rs/technicalpapers/whitepaper3.pdf>. Version: 2007, Abruf: 11.06.2010
- [LSG09] LSG SKY CHEFS DEUTSCHLAND GMBH: *Elektrohängebahn der Cateringanlage FRA ZD in Frankfurt am Main, Planung, Inbetriebnahme und Anlagenanlauf*. 2007-2009
- [Mai08a] MAIER, Martina M.: Definitionen der Verfügbarkeit reichen in der Praxis nicht aus: FML-Fachbereich A3 will neue Richtlinien zur Verfügbarkeit erarbeiten. In: *Logistik für Unternehmen* 22 (2008), Nr. 1/2, S. 48–50
- [Mai08b] MAIER, Martina M.: *Leistungsverfügbarkeit als neue Kenngröße zur Abnahme von Maschinen und Anlagen: erste Ergebnisse des VDI-FML-Fachbereichs A 3*. Ilmenau, 25.09.2008 (16. CIM - Jahrestagung)
- [Mai09] MAIER, Martina M.: AbnahmeprozEDUREN mit dem neuen Kennwert „Leistungsverfügbarkeit“: angewandt auf die durchschnittliche, deutsche Kleinanlage. In: SCHEID, Wolf-Michael (Hrsg.): *5. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)*, Universitätsverlag Ilmenau, 2009, S. 219–230
- [Mai10a] MAIER, Martina M.: Prognose der Leistungsverfügbarkeit in der Planungsphase. In: OVERMEYER, Ludger (Hrsg.): *6. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)*, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2010, S. 233–244
- [Mai10b] MAIER, Martina M.: Verfügbarkeit intralogistischer Anlagen: Teil I: Die Entwicklung eines Kennwerts. In: *f+h Fördern und Heben* (2010), Nr. 1/2, S. 18–22
- [Mai10c] MAIER, Martina M.: Verfügbarkeit intralogistischer Anlagen: Teil II: Ein Kennwert passt sich an. In: *f+h Fördern und Heben* (2010), Nr. 3, S. 72–75
- [Meu08] MEURER, Christoph: *VDI Guideline „Performance Availability“*. Cannes, France, 19.09.2008 (FEM Intralogistic System PG, Plenary meeting)

- [MHI99] MHIA: *A Recommended Industry Practice and Standard Specification to Accompany Automated Storage and Retrieval System (AS/RS), Request for Quotation*. May 1999
- [Mil07] MILLER, Carol: *MHIA White Paper Details Results of AS/RS Reliability Study*. <http://www.mhia.org/news/mhia/7016/mhia-white-paper-\details-results-of-as-rs-reliability-study>.  
Version: 20.08.2007, Abruf: 12.10.2009
- [MK08] MAY, Constantin ; KOCH, Arno: Overall Equipment Effectiveness (OEE): Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. In: *Zeitschrift der Unternehmensberatung* 3 (2008), Nr. 6, S. 245–250
- [Mou97] MOUBRAY, John: *Reliability-centered maintenance*. 2. ed. New York : Industrial Press, 1997
- [MSNB09] MAIER, Martina M. ; SCHEID, Wolf-Michael ; NEBEL, Steffen ; BERTSCHE, Bernd: Leistungsverfügbarkeit: Die neue Kenngröße zur Beurteilung intralogistischer Anlagen. In: VDI-GESELLSCHAFT SYSTEMENTWICKLUNG UND PROJEKTGESTALTUNG (Hrsg.): *Technische Zuverlässigkeit 2009*, VDI-Verlag, 2009 (VDI-Berichte 2065), S. 307–313
- [Nag10] NAGEL, Marie: *Simulation der Leistungsverfügbarkeit der Modellfabrik*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Bachelorarbeit, 2010
- [Neu78] NEUHAUS, Walter A.: *Forschungsberichte zur industriellen Logistik*. Bd. 8: *Beitrag zur methodischen Untersuchung der Zuverlässigkeit in Stückgutlagersystemen: Zugl.: Dortmund, Univ., Diss. 1978*. Dortmund : Institut für Logistik, 1978
- [Öno03] ÖNORM EN 528: *Regalbediengeräte - Sicherheit*. 01.05.2003
- [Nuy06] NUYTS GMBH: *Referenzprojekt: Draexlmaier (DVS) GmbH: 11 Fahrerlose Transportfahrzeuge*.  
<http://www.nuyts.de/customers/customers.htm>.  
Version: 12.09.2006, Abruf: 15.11.2010
- [RAM10] RAMS.ORG: *The Annual Reliability and Maintainability Symposium*.  
<http://www.rams.org>. Version: 2010, Abruf: 20.10.2010
- [RZ07] REGBER, Holger ; ZIMMERMANN, Klaus: *Change-Management in der Produktion: Prozesse effizient verbessern im Team*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Landsberg am Lech : mi-FachVerlag, 2007
- [Sal90] SALZER, Klaus W.: Die neue Richtlinie VDI 3649 zur Verfügbarkeit von Förder- und Lagersystemen. In: GESELLSCHAFT FÖRDERTECHNIK, MATERIALFLUSS UND LOGISTIK (Hrsg.): *Verfügbarkeit von Materialfluss-Systemen*, VDI-Verlag, 1990 (VDI-Berichte 833), S. 99–107



- [Sch90] SCHWANDA, Viktor: Nachweis der Verfügbarkeit. In: GESELLSCHAFT FÖRDERTECHNIK, MATERIALFLUSS UND LOGISTIK (Hrsg.): *Verfügbarkeit von Materialfluss-Systemen*, VDI-Verlag, 1990 (VDI-Berichte 833), S. 61–76
- [Sch06] SCHEID, Wolf-Michael: *RAM - Reliability, Availability, Maintenance: Gedanken zu einer europäisch-nordamerikanischen Initiative*. Ilmenau, 30. März 2006 (14. CIM-Jahrestagung)
- [Sie90] SIEGFRIED, Peter: Verfügbarkeit von komplexen Anlagen. In: GESELLSCHAFT FÖRDERTECHNIK, MATERIALFLUSS UND LOGISTIK (Hrsg.): *Verfügbarkeit von Materialfluss-Systemen*, VDI-Verlag, 1990 (VDI-Berichte 833), S. 109–118
- [SIE06] SIEMENS I IA & DT, DEMATIK: *Entwicklung des Kennwerts „Anlagennutzungszeit“*. 2006
- [SR85] SCHULZE, L. ; ROSENBAACH, K.-D.: Analyse des Anlagenverhaltens komplexer, automatischer Lager- und Transportsysteme. In: *f+h Fördern und Heben* 35 (1985), Nr. 2, S. 87–89
- [Tra08] TRANSPHARM LOGISTIK GMBH: *Logistikzentrum in Ulm, Inbetriebnahme und Dauerverfügbarkeit*. 2004-2008
- [TU 05] TU ILMENAU, FAKULTÄT MASCHINENBAU, FACHBEREICH FABRIKBETRIEB: *Hochregallagerstatistik*. 1962-2005
- [VB01] VOM BOVERT, Ernst-Martin: *Modellerstellung zur Verfügbarkeitsprognose komplexer Förder- und Lagersysteme: Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2000*. Dortmund : Verlag Praxiswissen, 2001 (Logistik für die Praxis)
- [VDI73] VDI-RICHTLINIE 3561: *Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen*. Juli 1973
- [VDI83] VDI-RICHTLINIE 3581: *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transport und Lageranlagen*. April 1983. – zurückgezogen und ersetzt: 2004
- [VDI84] VDI-RICHTLINIE 4008 BLATT 8: *Erneuerungsprozesse*. März 1984
- [VDI86a] VDI-RICHTLINIE 4004 BLATT 4: *Zuverlässigkeitskenngrößen: Verfügbarkeitskenngrößen*. Juli 1986
- [VDI86b] VDI-RICHTLINIE 4008 BLATT 7: *Strukturfunktion und ihre Anwendung*. Mai 1986
- [VDI92a] VDI-RICHTLINIE 3579: *Ausschreibung und Vergabe von Lagersystemen*. Juli 1992. – zurückgezogen: März 2006
- [VDI92b] VDI-RICHTLINIE 3649: *Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme*. Januar 1992. – Inhaltlich überprüft und unverändert weiterhin gültig: August 2003
- [VDI92c] VDI-RICHTLINIE 3979: *Abnahmeregeln für Stückgut-Fördersysteme*. Juli 1992. – Inhaltlich überprüft und unverändert weiterhin gültig: April 2002

- [VDI93] VDI-RICHTLINIE 3977: *Empfehlungen für die Abnahme von automatischen Lagersystemen*. Juli 1993
- [VDI94] VDI-RICHTLINIE 3646: *Spielzeitermittlung von Fördermitteln der Stetigfördertechnik in automatisierten Lagersystemen*. November 1994
- [VDI95] VDI-RICHTLINIE 3580: *Grundlagen zur Erfassung von Störungen an Hochregalanlagen*. Oktober 1995
- [VDI98a] VDI-RICHTLINIE 3978: *Durchsatz und Spielzeiten in Stückgut- Fördersystemen*. August 1998
- [VDI98b] VDI-RICHTLINIE 4001 BLATT 1: *Allgemeine Hinweise zum VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit*. April 1998
- [VDI98c] VDI-RICHTLINIE 4008 BLATT 2: *Boolesches Modell*. Mai 1998
- [VDI99a] VDI-RICHTLINIE 4008 BLATT 3: *Markoff-Zustandsänderungsmodelle mit endlich vielen Zuständen*. April 1999
- [VDI99b] VDI-RICHTLINIE 4480 BLATT 3: *Durchsatz von automatischen Umlauflagern*. März 1999
- [VDI02a] VDI-RICHTLINIE 3423: *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen - Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung*. Januar 2002
- [VDI02b] VDI-RICHTLINIE 4480 BLATT 2: *Durchsatz von automatischen Lagern mit nicht gassengebundenen Regalbediensystemen*. Juli 2002
- [VDI02c] VDI-RICHTLINIE 4480 BLATT 4: *Durchsatz von automatischen Lagern mit mehrfachtiefer Lagerung*. 07.2002
- [VDI04a] VDI-RICHTLINIE 3581: *Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente*. Dezember 2004. – Berichtigt im Oktober 2006
- [VDI04b] VDI-RICHTLINIE 4452: *Abnahmeregeln für Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*. November 2004
- [VDI05] VDI-RICHTLINIE 4001 BLATT 2: *Terminologie der Zuverlässigkeit*. März 2005
- [VDI06] VDI-RICHTLINIE 4008 BLATT 4: *Methoden der Zuverlässigkeit Petri-Netze*. April 2006
- [VDI09a] VDI-RICHTLINIE 3561 BLATT 2: *Spielzeitermittlung von regalgangunabhängigen Regalbediengeräten*. Februar 2009
- [VDI09b] VDI-RICHTLINIE 3561 BLATT 4: *Spielzeitermittlung von automatischen Kanallager-Systemen*. Juli 2009
- [VDI11] VDI-RICHTLINIE 4486: *Zuverlässigkeit in der Intralogistik: Leistungsverfügbarkeit*. Januar 2011

- [via10] VIASTORE SYSTEMS GMBH: *Produktinformation Regalbediengeräte: Mehr Leistung im Lager*.  
<http://www.viastore.de/fileadmin/Mediendatenbank/ServiceCorner/Produktinformationen/RBGdeutschnet.pdf>.  
Version: 2010, Abruf: 15.11.2010
- [VP09] VDI-PRESSESTELLE: *Vom Dampfkessel zur Bionik: 125 Jahre VDI-Richtlinien: ein Eckpfeiler der deutschen Wirtschaft*.  
[http://www.125jahre-richtlinien.de/fileadmin/rili\\_impulse/redakteur/downloads/Basis\\_PM\\_210409.pdf](http://www.125jahre-richtlinien.de/fileadmin/rili_impulse/redakteur/downloads/Basis_PM_210409.pdf).  
Version: 21.04.2009, Abruf: 15.09.2009
- [Wel06] WELSCH, Volker: Das automatische Lager und seine intralogistischen Aufgaben. In: ARNOLD, Dieter (Hrsg.): *Intralogistik*. Springer, 2006, S. 168–181
- [Wil10] WILDNER, Christian: Anlaufstrategien für Hochregallager bei Wiederinbetriebnahme eines ausgefallenen Regalbediengerätes. In: OVERMEYER, Ludger (Hrsg.): *6. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)*, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2010, S. 163–174
- [Wit07] WITTENSTEIN, Anna-Katharina: *IPA-IAO Forschung und Praxis*. Bd. 463: *Bedarfssynchrone Leistungsverfügbarkeit in der kundenspezifischen Produktentwicklung: Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2007*. Heimsheim : Jost-Jetter, 2007
- [Wol07] WOLF, Josefa: *FA303 - Zuverlässigkeit in der Intralogistik*.  
<http://www.vdi.de/7928.0.html>. Version: 2007, Abruf: 20.07.2009
- [Zah09] ZAHN, Erich: *Erstellung der FEM 9.222: Telefoninterview*. 15.01.2009
- [Zol80] ZOLLINGER, H. A. ; MHIA (Hrsg.): *Systems Reliability*. <http://www.mhia.org/vango/Core/orders/product.aspx?prodid=316>.  
Version: 21.04.1980, Abruf: 12.10.2009