

Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg**
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing)

genehmigte Dissertation

von

Friederike Engehausen

aus

Hannover

2021

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Tag der Einreichung: 11. August 2020

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Januar 2021

Wissen schafft Innovation

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß

Anschrift:

Technische Universität Hamburg

Institut für Produktionsmanagement und -technik

Denickestraße 17

21073 Hamburg

Band 44:

Friederike Engehausen

Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien

1. Auflage

Hamburg 2021

ISSN 1613-8244

Copyright Friederike Engehausen 2021

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zum Großteil während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) der Technischen Universität Hamburg.

Mein ganz besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater und Leiter des Instituts Herrn Professor Hermann Lödding für die intensive fachliche Betreuung dieser Arbeit. Durch das von ihm geschaffene Arbeitsumfeld am Institut konnte ich mich sowohl fachlich als auch persönlich weiterentwickeln. Herrn Dr. Axel Friedewald danke ich für seine Arbeit, mit der er seit Jahrzehnten zum Erfolg und Bestehen des Instituts beiträgt. Mein Dank gilt zudem der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die mir die Möglichkeit und vor allem die Zeit zur Erstellung dieser Arbeit gegeben hat. Herrn Professor Peter Nyhuis, Leiter des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Herrn Professor Otto von Estorff, Leiter des Instituts für Modellierung und Berechnung der Technischen Universität Hamburg, möchte ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken.

Ich danke allen ehemaligen Kollegen, die mich während der Promotionszeit begleitet haben. Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr. Andreas Piontek für seine Whiteboarddiagramme und die exzellente Musikauswahl. Ihm, Herrn Dr. Christoph Koch und Herrn Michael Winter danke ich für die vielen fachlichen Diskussionen. Herrn Michael Winter danke ich zudem für die sorgfältige Korrektur meiner Arbeit. Allen ehemaligen Kollegen danke ich für die motivierenden Worte, die anregenden Gespräche an der Kaffeemaschine und die vielen lustigen Momente am Institut, durch die ich die Institutszeit immer positiv in Erinnerung behalten werde. Außerdem danke ich Herrn Bastian Schoop, der mich über Jahre als studentische Hilfskraft unterstützt hat.

Mein Dank gilt zudem meinen Freunden und meiner Familie. Meiner Schwester Caroline danke ich dafür, dass sie mich bedingungslos in all meinen Plänen unterstützt. Meinem Vater danke ich dafür, dass er mir von der Kindheit an stets die Bedeutung von Bildung vorgelebt hat. Meiner Mutter danke ich dafür, dass sie mich gelehrt hat, der Welt mit Neugier, Wissbegier und Humor zu begegnen. Sie zeigt mir, dass Lernen und Weiterentwicklung vollkommen unabhängig von Alter sind.

Mein persönlicher Dank gilt meinem Partner Alexander Siegfried, der mich stets motiviert, über mich hinauszuwachsen, Bestehendes in Frage zu stellen und mich auf die wirklich wichtigen Dinge im Leben zu konzentrieren.

Hamburg, im Juni 2021

Friederike Engehausen

Kurzfassung

In vielen Fertigungen existieren Prozesse, an denen die Rüstzeiten von der Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge in der Warteschlange abhängen. Zur Vermeidung hoher Rüstaufwände bündeln Unternehmen dann Aufträge, die zu einer Rüstfamilie gehören. Der Leistungssteigerung steht allerdings eine hohe Streuung der Durchlaufzeiten gegenüber, da einige Aufträge in der Bearbeitung vorgezogen, während andere verzögert werden. Obwohl dieser Effekt den Unternehmen bekannt ist, existiert meist kein systematisches Vorgehen für den Umgang mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten. Es fehlt ein allgemeingültiges Modell, das den Einfluss einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen erklären kann.

Der Einfluss der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen hängt von der Konfiguration der Reihenfolgebildung ab. Diese Arbeit stellt daher im ersten Schritt eine zyklische Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien vor, die eine hohe Leistung bei moderater Streuung der Durchlaufzeiten ermöglicht. In der anschließenden Modellierung leitet die Arbeit deduktiv den Einfluss dieser Rüstzyklusbildung auf die logistischen Zielgrößen Leistung und Durchlaufzeit her. Das Ergebnis sind Gleichungen, die den Einfluss der Rüstzyklusbildung auf die mittlere Leistung, die mittlere Durchlaufzeit sowie die minimale und maximale Durchlaufzeit quantifizieren. Simulationsreihen bestätigen die Genauigkeit der Gleichungen und Robustheit des Modells. Die Modellierungsergebnisse lassen sich in Form von Kennlinien darstellen und erweitern damit die bestehende Theorie der logistischen Kennlinien. Anschließend stellt die Arbeit einen Leitfaden vor, der Unternehmen dabei hilft, das Modell gewinnbringend anzuwenden. Die Anwendung des entwickelten Vorgehens bei einem Leiterplattenhersteller bestätigt seine praktische Relevanz.

Abstract

In many companies there are processes where setup times depend on the processing sequence of the jobs in the queue. To avoid high setup efforts, companies bundle orders that belong to the same setup family. However, the output rate increase is accompanied by scattering throughput times, as some orders are accelerated in processing while others are delayed. Although companies are aware of this effect, there is usually no systematic procedure for dealing with sequence-dependent setup times. Up to now, there is no generally valid model that explains the influence of setup-optimized sequencing on the logistic objectives.

The influence of setup-optimized sequencing on the logistic objectives depends on the configuration of the sequencing rule. This work therefore presents a cyclic sequencing rule with setup families that enables a high output rate with moderately scattering throughput times. The work deductively derives a model for the influence of this setup-optimized sequencing rule on the logistic objectives output rate and throughput times. The results are equations to quantify the influence of the setup cycles on the mean output, the mean throughput time as well as the minimum and maximum throughput time. Simulation studies confirm the accuracy of the equations and robustness of the model. The modelling results can be visualized in the form of operating curves, thus extending the existing theory of logistic operating curves. The work presents guidelines that help companies to apply the model profitably. The application of the developed procedure at a PCB manufacturer confirms its practical relevance.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Verzeichnis der Formelzeichen	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	7
2.1 Einordnung der Fertigungssteuerung in die Produktionslogistik	7
2.2 Logistische Zielgrößen	8
2.2.1 Bedeutung logistischer Zielgrößen	8
2.2.2 Durchlaufelement	9
2.2.3 Durchlaufdiagramm	12
2.2.4 Produktionskennlinien	16
2.2.5 Terminabweichung und Termintreue	22
2.2.6 Aufteilung der Terminabweichung in ihre Ursachen	24
2.2.7 Aufteilung der Durchlaufzeit in ihre Bestandteile	28
2.3 Fertigungssteuerung	32
2.3.1 Ein Modell der Fertigungssteuerung.....	32
2.3.2 Auftragsfreigabe	33
2.3.3 Kapazitätssteuerung.....	34
2.3.4 Reihenfolgebildung.....	34
3 Bestehende Ansätze	37
3.1 Rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung	37
3.1.1 Ziele.....	37
3.1.2 Kombinierte Reihenfolgeregeln	38
3.1.3 Familienbasierte Reihenfolgeregeln	40
3.2 Quantifizierung des Einflusses rüstzeitoptimaler Reihenfolgeregeln.....	41
3.2.1 Conway, Maxwell und Miller	41
3.2.2 Kekre	42
3.2.3 Missbauer	43
3.2.4 Mayer	43
3.3 Fazit zum bestehenden Forschungsbedarf	48
4 Modellierung	51
4.1 Anforderungen an die Modellierung	51
4.2 Rüstzyklusbildung	52

4.2.1	Einführung	53
4.2.2	Parameter	53
4.3	Modellierung der Leistung	54
4.3.1	Bestimmung des Leistungssteigerungspotenzials	55
4.3.2	Bestimmung der Auflagemenge	58
4.3.3	Bestimmung des Leistungssteigerungsfaktors	63
4.3.4	Leistungskennlinie	65
4.3.5	Weitere Effekte	68
4.4	Modellierung der Durchlaufzeit	74
4.4.1	Einfluss der Reihenfolgebildung	74
4.4.2	Einfluss des Bestands	78
4.4.3	Durchlaufzeitkennlinie	78
4.5	Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange	82
4.5.1	Einführung	82
4.5.2	Modellierung der Leistung	83
4.5.3	Modellierung der Durchlaufzeit	85
4.6	Fazit zur Modellierung	88
5	Evaluation der Modellierung	91
5.1	Beschreibung der Evaluationsumgebung	91
5.2	Verifikation und Validierung des Simulationsmodells	93
5.3	Versuchsplanung	96
5.4	Evaluation des Modells für die Leistung	97
5.4.1	Referenzszenario	97
5.4.2	Einfluss der Bestandsstreuung	100
5.4.3	Einfluss der Anzahl der Rüstfamilien	103
5.4.4	Einfluss der Aufteilung der Rüstfamilien	104
5.4.5	Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten	106
5.4.6	Überlagerung der Einflussgrößen	109
5.4.7	Evaluation der Leistung mit aktiver Warteschlange	111
5.5	Evaluation des Modells für die Durchlaufzeit	113
5.5.1	Referenzszenario	113
5.5.2	Einfluss der Bestandsstreuung	115
5.5.3	Einfluss der Anzahl der Rüstfamilien	116
5.5.4	Einfluss der Aufteilung der Rüstfamilien	117
5.5.5	Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten	119
5.5.6	Überlagerung der Einflussgrößen	120
5.5.7	Evaluation der Durchlaufzeit mit aktiver Warteschlange	121
5.6	Fazit zur Evaluation der Modellierung	125

6 Auslegung und Implementierung der Reihenfolgebildung	127
6.1 Parametrierung des Verfahrens	127
6.2 Hilfsmittel zur Rüstzyklusbildung.....	129
6.3 Alternative Maßnahmen zur Reduzierung des Rüstaufwands	131
6.3.1 Reduzierung der Rüstzeiten	131
6.3.2 Reduzierung der Anzahl der Rüstfamilien	134
6.4 Leitlinien der Rüstzyklusbildung	136
6.5 Fazit zur Auslegung und Implementierung der Reihenfolgebildung	138
7 Praxisbeispiel	139
7.1 Anwendungsumgebung	139
7.1.1 Steuerungsrelevante Fertigungsmerkmale	139
7.1.2 Beschreibung des Arbeitssystems.....	140
7.1.3 Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten am Arbeitssystem	141
7.2 Ausgangsszenario	142
7.2.1 Vorgehen bei der Reihenfolgebildung	142
7.2.2 Logistische Zielerreichung	143
7.3 Konzept zur Rüstzyklusbildung	145
7.3.1 Anwendung der Leitlinien	146
7.3.2 Hilfsmittel zur Rüstzyklusbildung	149
7.4 Evaluation der Testphase	150
8 Erfüllung der Anforderungen	153
9 Schlussbetrachtung	155
9.1 Zusammenfassung	155
9.2 Ausblick.....	157
Literaturverzeichnis	159
Anhang: Evaluationsergebnisse	165

Abkürzungsverzeichnis

ATCS	Apparent Tardiness Cost with Setups
AVG	Arbeitsvorgang
bspw.	beispielsweise
Conwip	Constant Work in Process
ERP	Enterprise Resource Planning
f.	folgende
FIFO	First In – First Out
FPE	Frühester Plan-Endtermin
KOZ	kürzeste Operationszeit
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
S.	Seite(n)
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

Verzeichnis der Formelzeichen

AB	Abgang [Std]
AD	Auflagedauer [BKT]
AM	Auflagemenge in Anzahl Aufträgen [-]
AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]
B	Bestand [Std]
BA	Bestand in Anzahl Aufträgen [-]
BI _{min}	idealer Mindestbestand [Std]
BIA _{min}	idealer Mindestbestand in Anzahl Aufträgen [-]
F	Anzahl von Einheiten im System
k	Länge der aktiven Warteschlange in Anzahl Aufträgen [-]
KAP	Kapazität [Std/BKT]
L	Leistung [Std]
LA	Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]
LSF	Leistungssteigerungsfaktor [-]
P	Länge der Betrachtungsperiode [BKT]
p	Anteil [-]
PR	Prioritätsrang [Std]
PRA	Prioritätsrang in Anzahl Aufträgen [-]
R	Reichweite [BKT]
RA	Reihenfolgeabweichung [Std]
RAA	Reihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
Rg	Rang [Std]
RgA	Rang in Anzahl Aufträgen [-]
RgAAB	Abgangsrang in Anzahl Aufträgen [-]
RgAZU	Zugangsrang in Anzahl Aufträgen [-]
RS	Rückstand [Std]
RSA	Rückstand in Anzahl Aufträgen [-]
ΔRüst	eingesparte Rüstaufwände [Std]
RZD	Rüstzyklusdauer [BKT]
RZL	Rüstzykluslänge in Anzahl Aufträgen [-]
TAA	Terminabweichung im Abgang [BKT]
TAB	Termin Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]
TAE	Termin Bearbeitungsende Auftrag [BKT]
TAR	relative Terminabweichung [BKT]
TAZ	Terminabweichung im Zugang [BKT]
TBE	Termin Bearbeitungsende (Arbeitsvorgang) [BKT]
TBEV	Termin Bearbeitungsende Vorgänger (Arbeitsvorgang) [BKT]
t _e	Einzelzeit (Vorgabezeit) je Werkstück [min/ME]
TKAP	Tageskapazität (Einsatzzeit des Arbeitssystems) [Std/BKT]
t _r	Rüstzeit [min]
TRA	Termin Rüstanfang (Arbeitsvorgang) [BKT]
TT	Termintreue [%]
W	Aufenthaltsdauer einer Einheit im System
x	Losgröße [ME]
ZAU	Auftragszeit [Std]

ZAZ	Zwischenankunftszeit [Std]
ZBA	Bearbeitungszeit [Std]
ZDA	Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
ZDF	Durchführungszeit [BKT]
ZDL	(Arbeitsvorgangs-)Durchlaufzeit [BKT]
ZR	Rüstzeit [Std]
ΔZR	Rüstzeitdifferenz [Std]
ZU	Zugang [Std]
ZUE	Übergangszeit [BKT]
α_1	Streckfaktor [-]
λ	Ankunftsrate

Einheiten

BKT	Betriebskalendertage
ME	Mengeneinheiten
Min	Minuten
Std	Stunden
%	Prozent

Indizes

i, j	allgemeine Laufvariablen
Ist	Ist-Wert
m	Mittelwert
max	Maximalwert
mg	gewichteter Mittelwert
min	Minimalwert
n, z	Anzahl
OG	Obergrenze
Plan	Plan-Wert
rel	relativer Wert
s	Standardabweichung
UG	Untergrenze
v	Variationskoeffizient
vir	virtuell
95%	95. Perzentil
(T)	Wert zum Zeitpunkt T
+	großer Wert
-	kleiner Wert

1 Einleitung

Die Einleitung soll eine Einführung in die Thematik dieser Arbeit geben. Der erste Abschnitt erläutert dafür die Problemstellung, die sich aus der Praxis der Produktionsplanung und -steuerung mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten ergibt. Aus der Problemstellung leitet sich dann die Zielsetzung dieser Arbeit ab. Der dritte Abschnitt erläutert den Aufbau der Arbeit und damit, wie die Zielsetzung erreicht werden soll.

1.1 Problemstellung

Unternehmen können sich längst nicht mehr allein über die Qualität ihrer Produkte am Markt behaupten. Erfolgreiche Unternehmen schaffen es, gute Produkte mit einer leistungsfähigen Logistik zu kombinieren. Durch eine zunehmende Individualisierung der Produkte wachsen die logistischen Herausforderungen der Unternehmen. Kurze Lieferzeiten und eine hohe Produktqualität zu konkurrenzfähigen Preisen anzubieten, wird dadurch zunehmend schwieriger. Eine effektive Produktionsplanung und -steuerung (PPS) kann kurze und verlässliche Lieferzeiten bei geringen Kosten sicherstellen (Lödding 2016, S. 1 f.; Wiendahl 2002, S. 1).

Die zunehmende Individualisierung der Produkte erfordert eine hohe Flexibilität der Fertigung. Viele Unternehmen ordnen ihre Fertigung daher im Werkstatt- oder Verrichtungsprinzip an. Hierbei können Produkte mit unterschiedlichen Bearbeitungsschritten und unterschiedlichen Bearbeitungsfolgen gefertigt werden (Wiendahl 2008, S. 27-33).

Neben dem Vorteil der Flexibilität hat die Werkstattfertigung den Nachteil langer Durchlaufzeiten. Ein Grund hierfür ist das Dilemma der Ablaufplanung: Eine hohe Auslastung der Arbeitssysteme erfordert einen hohen Bestand. Ein hoher Bestand verursacht wiederum lange Warteschlangen und damit lange Durchlaufzeiten. Kurze Durchlaufzeiten sind daher nur schwer mit einer hohen Auslastung kombinierbar. In der Konsequenz müssen Unternehmen für kurze Durchlaufzeiten häufig Auslastungsverluste in Kauf nehmen, die wiederum mit hohen Kosten verbunden sind. Kurze Lieferzeiten zu geringen Kosten anzubieten ist also eine der größten Herausforderungen der PPS (Gutenberg 1983, S. 215-220).

Die geforderte Flexibilität kommt auf Ebene der einzelnen Fertigungsanlagen an ihre Grenzen. Meist sind Rüstvorgänge notwendig, um zwischen unterschiedlichen Produkten zu wechseln. Dies stellt zwar einen Verlust dar, da die Anlage während der Rüstzeit nicht wertschöpfend tätig ist, in der PPS ist dies aber durch eine Losgrößenplanung und Maßnahmen zur Rüstzeitreduzierung gut beherrschbar (Nyhuis 1991, S. 99-105; Shingō 2019).

Eine zusätzliche Herausforderung stellen reihenfolgeabhängige Rüstzeiten dar. Die Rüstzeiten sind in diesem Fall nicht konstant, sondern davon abhängig, in welcher Reihenfolge die Aufträge abgearbeitet werden. Besonders in einer Werkstattfertigung mit komplexen Materialflüssen ist es schwierig vorherzusagen, in welcher Reihenfolge

Aufträge am Arbeitssystem eintreffen und in welcher Reihenfolge die Mitarbeiter die Aufträge bearbeiten. In einer Studie gab ein Fünftel der befragten Unternehmen an, dass ihre am häufigsten eingesetzte Reihenfolgebildung rüstoptimal ist (Seitz et al. 2018, S. 20).

Ein Beispiel für reihenfolgeabhängige Rüstzeiten ist die Herstellung von Farben. Wird auf einer Anlage von dunklen zu hellen Farben gewechselt, so muss die Anlage mehrere Stunden gereinigt werden. Der Rüstvorgang von hellen zu dunklen Farben kann dagegen in signifikant kürzerer Zeit durchgeführt werden. Die Rüstzeiten können dann in einer Rüstzeitmatrix dargestellt werden, wie im Beispiel in Abbildung 1-1 dargestellt (Conway et al. 1967, S. 53 f.).

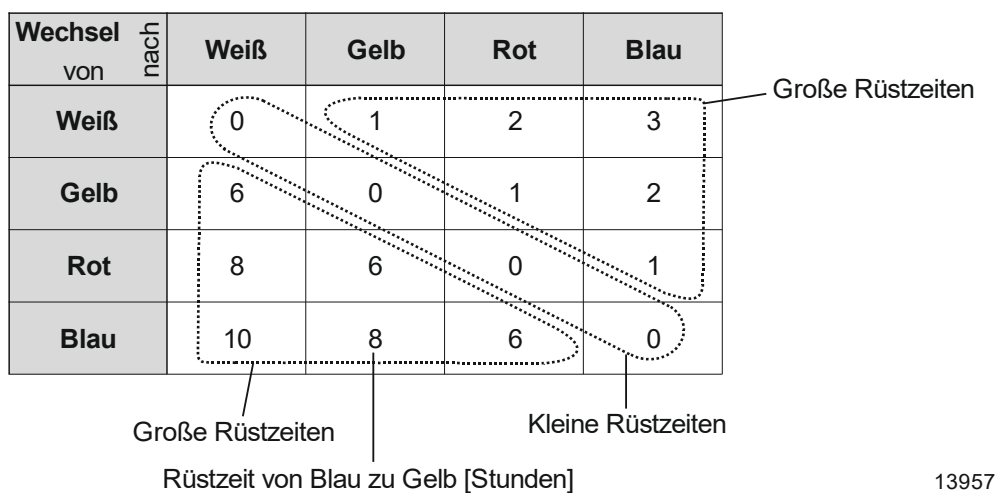


Abbildung 1-1. Rüstzeitmatrix (in Anlehnung an Conway et al. (1967, S. 53))

Über und unterhalb der Diagonalen sind große Rüstzeiten eingetragen. Kleine Rüstzeiten befinden sich auf der Diagonalen. In dem Beispiel betragen diese null, sie können aber auch von null verschieden sein (Conway et al. 1967, S. 53 f.).

Liegen nun mehrere Aufträge für verschiedene Farben in der Warteschlange des Arbeitssystems, offenbart sich das Dilemma. Abbildung 1-2 stellt den Zielkonflikt dar, den reihenfolgeabhängige Rüstzeiten verursachen.

Die Reihenfolgebildung hat üblicherweise das Ziel, Reihenfolgeabweichungen gegenüber dem Plan zu vermeiden oder zu minimieren. In diesem Fall wäre es sinnvoll, die Aufträge in der Reihenfolge ihres Plan-Endtermins zu bearbeiten. Dies hätte jedoch zur Folge, dass zwischen jedem Auftrag lange gerüstet wird. Eine rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung würde dagegen Aufträge vorziehen, die mit der aktuellen Maschineneinstellung gefertigt werden können. In der gleichen Zeit werden dadurch mehr Aufträge bearbeitet. Die Auslastung bzw. die Leistung des Arbeitssystems wird also erhöht (Lödding 2016, S. 514 f.).

Nachteil dieser Reihenfolgevertauschung ist jedoch, dass zu Gunsten einer höheren Leistung nicht der terminlich dringendste Auftrag bearbeitet wird. Die Reihenfolgebildung erzeugt also einen Zielkonflikt zwischen einer hohen Leistung und einer hohen Termintreue (Pickardt & Branke 2012, S. 5823).

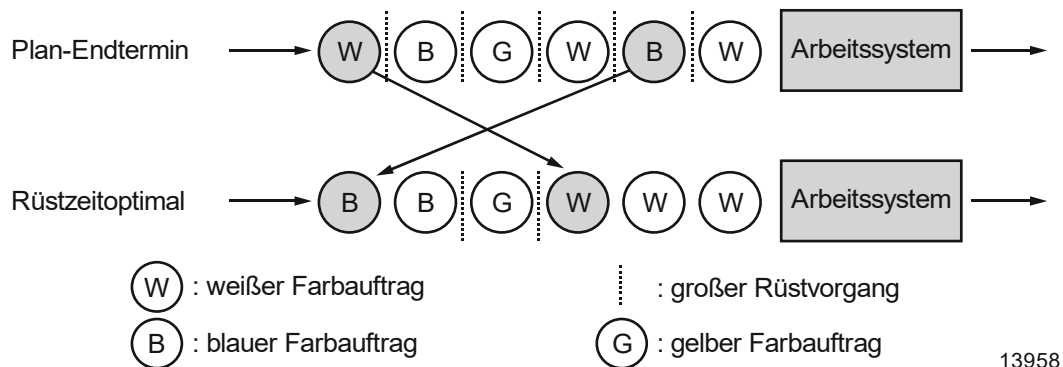


Abbildung 1-2. Zielkonflikt durch reihenfolgeabhängige Rüstzeiten

Weder die Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin noch die rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung sind eine optimale Lösung für das Problem. Bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten erfolgt die Entscheidung für eine hohe Leistung immer zu Lasten der Termintreue. In der PPS muss also ein geeignetes Modell vorliegen, das den Einfluss der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die Zielgrößen quantifiziert. Nur so können sich Unternehmen bewusst im Zielkonflikt positionieren und geeignete Vorgaben zur rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung festlegen.

1.2 Zielsetzung

Diese Arbeit verfolgt zwei Ziele, um eine Positionierung im Zielkonflikt durch reihenfolgeabhängige Rüstzeiten zu ermöglichen:

1. Entwicklung eines Modells zur Erklärung des Einflusses reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten auf die logistischen Zielgrößen

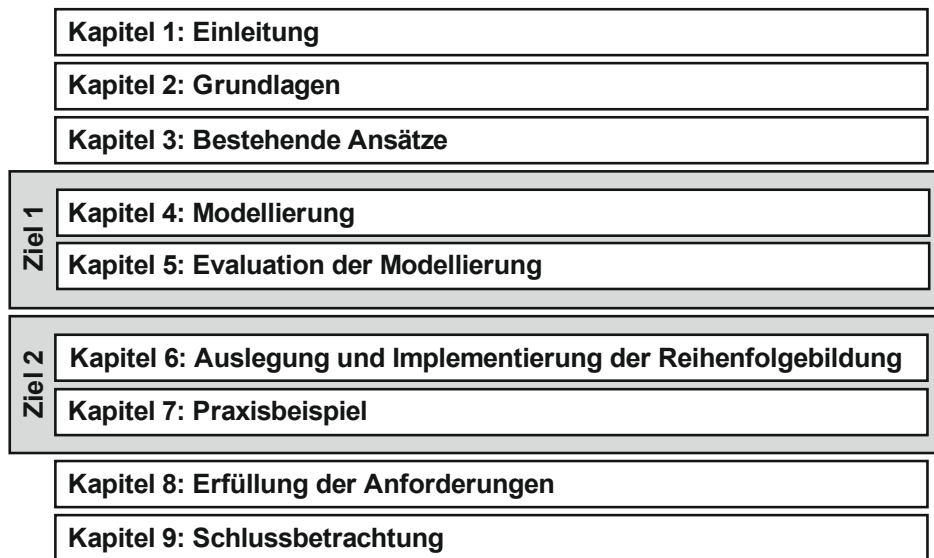
Das Modell soll den Grundstein für die Positionierung legen. Gleichungen sollen den Einfluss reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten auf die Zielgrößen quantifizieren können. Die Darstellung der Ergebnisse in Form von Kennlinien soll ein intuitives Verständnis für den Zielkonflikt ermöglichen.

2. Entwicklung von Leitlinien zur Auslegung einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung

Basierend auf den Erkenntnissen des Modells sollen Leitlinien zur Auslegung einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung entwickelt werden. Diese sollen Unternehmen dabei helfen, die Ergebnisse dieser Arbeit operativ nutzen zu können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um die genannten Ziele zu erreichen, gliedert sich die Arbeit in insgesamt neun Kapiteln. Abbildung 1-3 zeigt den Aufbau der Arbeit.



13959

Abbildung 1-3. Aufbau der Arbeit

Die Kapitel 1 bis 3 legen die Grundlagen für die Arbeit. Kapitel 1 gibt dafür eine Einleitung in das Thema und erläutert die Problemstellung, die Zielsetzung und den Aufbau der Arbeit. Kapitel 2 arbeitet die wichtigsten Grundlagen der Modellierung logistischer Zielgrößen sowie der Fertigungssteuerung heraus. Kapitel 3 stellt bestehende Ansätze vor, die den Einfluss reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten auf die logistischen Zielgrößen beschreiben oder quantifizieren. Aus der Analyse dieser Ansätze werden die Forschungsdefizite abgeleitet.

Kapitel 4 stellt eine Modellierung für den Einfluss reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten auf die logistischen Zielgrößen vor. Dafür werden zunächst Anforderungen an die Modellierung aufgestellt. Es wird ein Modell für den Einfluss auf die Leistung und ein Modell für den Einfluss auf die Durchlaufzeit vorgestellt.

Die Modellierungsergebnisse werden in Kapitel 5 simulativ evaluiert. Dafür werden Simulationsreihen durchgeführt und ausgewertet. Die Simulationsergebnisse werden dann der Prognose der Modellierung gegenübergestellt. Es wird der Einfluss wesentlicher Parameter auf die Genauigkeit der Modellierung untersucht. Kapitel 4 und 5 erfüllen zusammen das Ziel der Entwicklung eines Modells zur Erklärung des Einflusses reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten auf die logistischen Zielgrößen.

Kapitel 6 stellt einen Leitfaden zur Auslegung und Implementierung der Reihenfolgebildung mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten vor. Dies soll die Übertragung der Ergebnisse in die Praxis erleichtern.

Kapitel 7 erprobt den Leitfaden anhand eines Praxisbeispiels. Hierbei soll überprüft werden, inwiefern die Modellierung sowie die Auslegung der Reihenfolgebildung praktisch anwendbar und verständlich sind. Kapitel 6 und 7 erfüllen zusammen das Ziel der Entwicklung eines Leitfadens zur Auslegung einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung.

Kapitel 8 und 9 bilden den Abschluss der Arbeit. Kapitel 8 gleicht die Ergebnisse der Arbeit mit den Anforderungen ab. Die Schlussbetrachtung in Kapitel 9 fasst die Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf sinnvolle Erweiterungen zur Modellierung und Auslegung einer Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien.

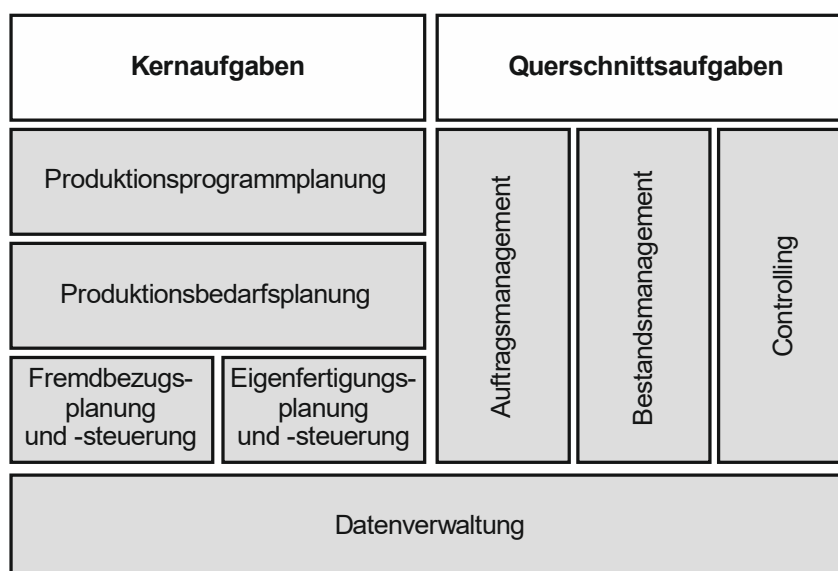
2 Grundlagen

Dieser Abschnitt führt die zum Verständnis der Arbeit erforderlichen Grundlagen ein und stellt bestehende Ansätze in dem Themengebiet vor. Da sich diese Arbeit mit einem Thema der Fertigungssteuerung befasst, grenzt Abschnitt 2.1 die Fertigungssteuerung zunächst von anderen Aufgaben der Produktionslogistik ab. Ein wesentliches Ziel der Fertigungssteuerung ist es, in einem von Störungen geprägten Umfeld die logistischen Ziele zu erreichen. Abschnitt 2.2 gibt daher eine Definition sowie Ansätze zur Analyse und Modellierung logistischer Zielgrößen. Abschnitt 2.3 erläutert, wie die Fertigungssteuerung Einfluss auf logistische Zielgrößen nehmen kann und stellt ausgewählte Verfahren der Fertigungssteuerung vor.

2.1 Einordnung der Fertigungssteuerung in die Produktionslogistik

Neben der Produktqualität entscheidet auch die logistische Leistungsfähigkeit über den Erfolg eines Unternehmens. Effiziente Logistikprozesse helfen Unternehmen, schnell, pünktlich und mit wettbewerbsfähigen Kosten zu liefern (Lödding 2016, S. 1).

Aufgabe der Logistik ist es daher, Material- und Informationsflüsse zu planen, zu steuern und zu überwachen. Die Beschaffungs- und Distributionslogistik hat dabei die Aufgabe, Materialflüsse zwischen Produktions- oder Handelsunternehmen zu koordinieren. Im Gegensatz dazu steht die Produktionslogistik, deren Aufgabe die *Planung*, *Steuerung* und *Überwachung* von innerbetrieblichen Materialflüssen ist (Pawellek 2007, S. 13-14).



13348

Abbildung 2-1. Aachener PPS-Modell (Schuh 2007, S. 21)

Kernaufgabe der *Produktionsplanung* ist es, über Absatzprognosen und Kundenaufträge den Ressourcenbedarf der Produktion vorherzusagen. Abbildung 2-1 zeigt das Aachener PPS-Modell (Schuh 2007, S. 21). Nach dem Aachener PPS-Modell umfasst die Produktionsplanung die Aufgaben der Produktionsprogrammplanung, der Produktionsbedarfsplanung, der Eigenfertigungsplanung und der Fremdbezugsplanung (Schuh 2007, S. 21).

Die *Produktionssteuerung* hat zur Aufgabe, den Produktionsplan trotz unvermeidlicher Störungen wie Maschinen- oder Personalausfällen zu erfüllen (Wiendahl 1997, S. 12). Welche Möglichkeiten der Steuerung in der Fertigung hierfür zur Verfügung stehen, stellt Lödding in einem Modell der Fertigungssteuerung dar (siehe Abschnitt 2.3.1). Über die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung kann die Fertigungssteuerung Abweichungen vom Plan vermeiden oder zumindest verringern (Lödding 2016, S. 8).

Eine weitere Aufgabe der Produktionslogistik ist neben der Planung und Steuerung auch die Überwachung der innerbetrieblichen Materialflüsse. Aufgabe des *Produktionscontrollings* ist es, die logistischen Prozesse auf den Unternehmenserfolg auszurichten. Dazu legt das Produktionscontrolling Zielwerte für die logistischen Zielgrößen fest, ermittelt Abweichungen von diesen und leitet Maßnahmen zur Verbesserung ab (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 179 ff.).

2.2 Logistische Zielgrößen

Wie erfolgreich ein Unternehmen seine Produktionslogistik gestaltet, lässt sich anhand der logistischen Zielgrößen ermitteln. In diesem Abschnitt soll daher zunächst die Bedeutung logistischer Zielgrößen erläutert werden. Daraufhin werden etablierte Modelle vorgestellt, die zur Analyse der logistischen Zielgrößen in der Produktion genutzt werden.

2.2.1 Bedeutung logistischer Zielgrößen

Wiendahl unterscheidet zwischen Zielgrößen der Logistikleistung bzw. Logistikqualität und Zielgrößen der Logistikkosten (Wiendahl 1997, S. 136 ff.). Abbildung 2-2 zeigt die Aufteilung der Zielgrößen in externe und interne Zielgrößen nach Lödding.

Kunden nehmen externe logistische Zielgrößen direkt wahr. Interne Zielgrößen leiten sich von den externen Zielgrößen ab, lassen sich jedoch in der Fertigung messen und beeinflussen (Lödding 2016, S. 21 f.).

Externe, logistische Zielgrößen der Logistikleistung unterscheiden sich für die Auftrags- und die Lagerfertigung. In der Auftragsfertigung entscheiden die Lieferzeit, die Lieferterminabweichung und die Liefertreue über die Kundenzufriedenheit. In der Lagerfertigung entscheidet dies der Servicegrad. Er gibt an, ob ein Kundenauftrag sofort aus dem Lager bedient werden kann. Die Logistikkosten nimmt der Kunde vor allem über den Preis wahr (Lödding 2016, S. 21 f.).

Intern entscheiden die Zielgrößen Durchlaufzeit, Terminabweichung und Termintreue über die logistische Leistungsfähigkeit einer Fertigung. Hohe Bestände, eine geringe Auslastung der Kapazitäten sowie hohe Verzugskosten infolge verspäteter Fertigstellung von Aufträgen führen dagegen zu Kosten in der Fertigung. Diese internen Logistikkosten erhöhen die Herstellkosten der Produkte und spiegeln sich dem Kunden gegenüber im Preis wider (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 1-13).

	Logistikleistung	Logistikkosten
extern	<i>Auftragsfertigung</i> Lieferzeit Lieferterminabweichung Liefertreue	Preis
	<i>Lagerfertigung</i> Servicegrad	
intern	Durchlaufzeit Terminabweichung Termintreue	Bestand Auslastung Verzugskosten

12194

Abbildung 2-2. Zielgrößen der Logistikleistung und der Logistikkosten (Lödding 2016, S. 22)

Die Herausforderung der Produktionslogistik liegt darin begründet, dass einige Zielgrößen gleichläufig, andere dagegen gegenläufig sind. Bestände und Durchlaufzeiten unterstützen sich, da geringe Fertigungsbestände zu geringeren Durchlaufzeiten führen. Dagegen besteht der wohl bekannteste Zielkonflikt, auch als *Dilemma der Ablaufplanung* bezeichnet, zwischen Beständen bzw. Durchlaufzeiten und der Auslastung: Hohe Bestände führen zu einer hohen Auslastung der Kapazitäten, jedoch verlängern sie auch die Wartezeiten in der Fertigung und damit die Durchlaufzeiten (Gutenberg 1983, S. 215-220).

2.2.2 Durchlaufelement

Die Durchlaufzeit ist von besonderer Bedeutung für Produktionsbetriebe. In der Auftragsfertigung bildet sie die Untergrenze für die Lieferzeit. In der Lagerfertigung führen lange Durchlaufzeiten in der Fertigung dazu, dass das Unternehmen nur langsam auf schwankende Kundenbedarfe reagieren kann. Infolgedessen müssen hohe Sicherheitsbestände im Lager vorgehalten werden, um einen hohen Servicegrad zu gewährleisten (Lödding 2016, S. 32).

Abbildung 2-3 zeigt, welche Zeitanteile die Durchlaufzeit beeinflussen.

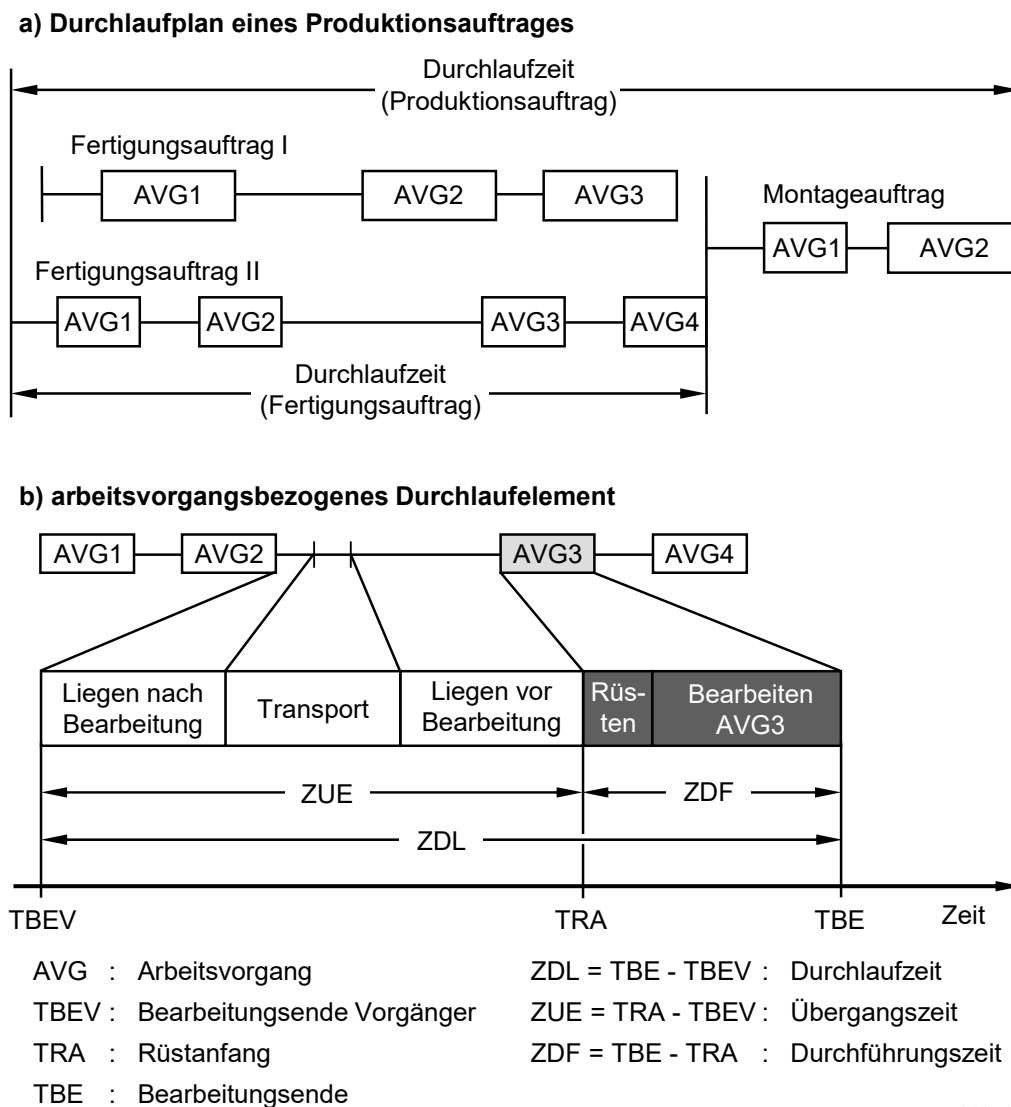


Abbildung 2-3. Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente (REFA (1952, S. 57) nach Lödding (2016, S. 59))

Je nach Detailniveau wird zwischen der *Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit* (ZDL) und der *Auftragsdurchlaufzeit* (ZDA) unterschieden. Abbildung 2-3 a) stellt die Bestandteile der Auftragsdurchlaufzeit dar. Dabei durchläuft ein Fertigungsauftrag mehrere, aufeinander folgende Arbeitsvorgänge. Nach Fertigstellung eines Arbeitsvorgangs trifft der Auftrag am folgenden Arbeitssystem ein und wartet, bis der nächste Arbeitsvorgang durchgeführt wird. Zur Analyse der Bestandteile der Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit hat sich das eindimensionale Durchlaufelement etabliert, das in Abbildung 2-3 b) dargestellt ist (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 21 f.).

Die Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit ist demnach die Zeit, die ein Auftrag von der Fertigstellung des vorherigen Arbeitsvorgangs bis zur Fertigstellung des betrachteten Arbeitsvorgangs benötigt. Der Vorgänger des ersten Arbeitsvorgangs ist dabei der Zeitpunkt des Zugangs zur Fertigung (Bechte 1984, S. 9):

$$ZDL = TBE - TBEV \quad (2-1)$$

ZDL Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit [BKT]
 TBE Bearbeitungsende [BKT]
 TBEV Bearbeitungsende Vorgänger [BKT]

Die Auftragsdurchlaufzeit bezeichnet dagegen die Zeit, die ein Auftrag für das Durchlaufen der gesamten Fertigung benötigt, also von der Freigabe oder dem Einstoß eines Auftrags in die Fertigung bis zur Fertigstellung. Sie ergibt sich aus der Summe der Durchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge (Bechte 1979b, S. 12-14):

$$ZDA = \sum_{i=1}^n ZDL_i \quad (2-2)$$

ZDA Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
 ZDL_i Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs i [BKT]
 n Anzahl der Arbeitsvorgänge

Alternativ kann sie aus der Differenz zwischen dem Bearbeitungsende und dem Bearbeitungsanfang bestimmt werden (Wiendahl 1997, S. 46):

$$ZDA = TAE - TAB \quad (2-3)$$

ZDA Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
 TAE Bearbeitungsende Auftrag [BKT]
 TAB Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]

Die Arbeitsvorgangsdurchlaufzeit (im Weiteren kurz als Durchlaufzeit bezeichnet) beinhaltet entsprechend dem Durchlaufelement in Abbildung 2-3 auch die Zeitanteile *Liegen nach Bearbeitung*, *Transport* und *Liegen vor Bearbeitung*. Diese werden meist nicht einzeln betrachtet, sondern als *Übergangszeit* zusammengefasst. *Rüsten* und *Bearbeiten* ergeben zusammen die *Durchführungszeit* (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 22).

Sind die Zeitpunkte des Rüstanfanges und Bearbeitungsendes bekannt, lässt sich die Durchführungszeit als die Differenz dieser beiden Zeitpunkte ermitteln. Meist wird jedoch nur das Bearbeitungsende erfasst, sodass sich die Übergangszeit mit folgender Gleichung berechnen lässt (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 23):

$$ZUE = ZDL - ZDF \quad (2-4)$$

ZUE	Übergangszeit [BKT]
ZDL	(Arbeitsvorgangs-)Durchlaufzeit [BKT]
ZDF	Durchführungszeit [BKT]

Die Durchführungszeit ist als Zeitdauer definiert, die der Auftrag das Arbeitssystem belegt. Sie wird in der Einheit Betriebskalendertage gemessen und berechnet sich aus dem Quotienten der Auftragszeit und der Tageskapazität bzw. der Einsatzzeit des Arbeitssystems (Wiendahl 1997, S. 41):

$$ZDF = \frac{ZAU}{TKAP} \quad (2-5)$$

ZDF	Durchführungszeit [BKT]
ZAU	Auftragszeit [Std]
TKAP	Tageskapazität (Einsatzzeit des Arbeitssystems) [Std/BKT]

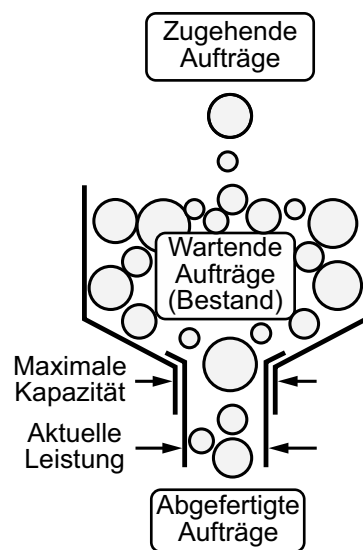
Die Auftragszeit stellt dabei eine wesentliche Größe dar. Im Gegensatz zur Durchführungszeit beschreibt sie die Arbeitssystembelegung in Stunden. Sie ist Grundlage zur Terminierung und Kapazitätsabstimmung von Aufträgen und berechnet sich als Summe der Vorgabewerte für die Rüstzeit und die Bearbeitungszeit. Die Bearbeitungszeit ergibt sich aus dem Produkt von Losgröße und Einzelzeit (REFA 1978, S. 42):

$$ZAU = \frac{(x \cdot t_e + t_r)}{60 \frac{\text{min}}{\text{Std}}} \quad (2-6)$$

ZAU	Auftragszeit [Std]
x	Losgröße [ME]
t _e	Einzelzeit (Vorgabezeit) je Werkstück [min/ME]
t _r	Rüstzeit [min]

2.2.3 Durchlaufdiagramm

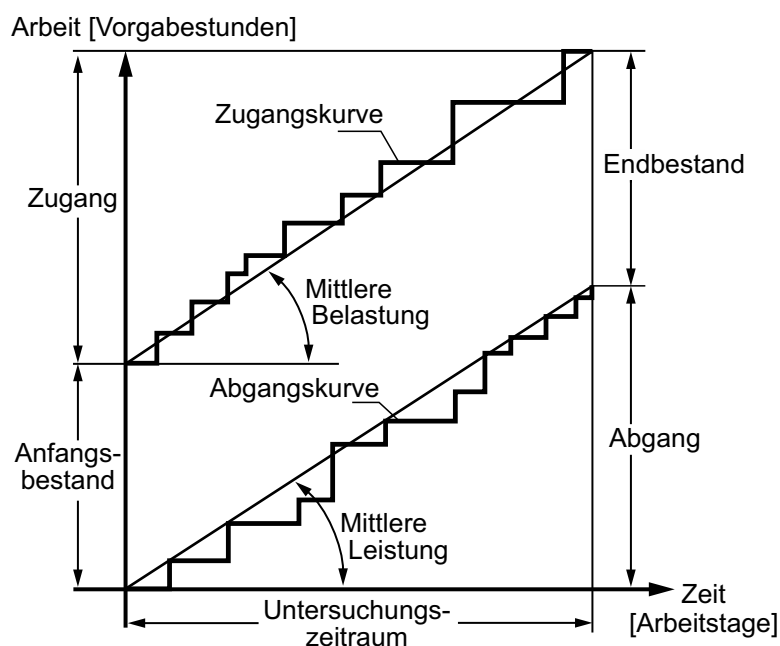
Nach Bechte, Kivenko und Orlicky hat sich die Darstellung eines Arbeitssystems oder einer gesamten Fertigung als Trichter etabliert (Abbildung 2-4). Die Trichteröffnung repräsentiert dabei die Leistung des Arbeitssystems, der Füllgrad des Trichters entspricht dem Bestand. Die Auftragszeit der Aufträge wird durch die Größe der Aufträge (Kreise) repräsentiert (Bechte 1984, S. 13 f.; Kivenko 1981, S. 10 f.; Orlicky 1975, S. 263-267).



11206

Abbildung 2-4. Trichtermodell (Bechte (1984, S. 51) nach Wiendahl (1997, S. 84))

Der zeitliche Ablauf der Vorgänge im Trichter lässt sich in ein Durchlaufdiagramm übertragen (Abbildung 2-5). Dabei werden Zugang und Abgang meist in Vorgabestunden kumulativ über der Zeit aufgetragen. Der Zugang zu Beginn des Untersuchungszeitraums entspricht dem zu dem Zeitpunkt vorliegenden Bestand am Arbeitssystem (Anfangsbestand). Insbesondere Wiendahl (1997, S. 79-135) prägt den Begriff des Durchlaufdiagramms. Die Gegenüberstellung von Zugang und Abgang über der Zeit zur Analyse des logistischen Verhaltens von Arbeitssystemen wird jedoch auch von vielen Autoren vorgeschlagen (Bechte 1979a; Conway et al. 1967, S. 15-20; Schmitz 1961).



11206

Abbildung 2-5. Durchlaufdiagramm (Bechte (1984, S. 51) nach Wiendahl (1997, S. 84))

Aus dem Durchlaufdiagramm lassen sich unterschiedliche logistische Zielgrößen ableiten. Der vertikale Abstand der beiden Kurven entspricht immer dem Bestand, der zum jeweiligen Zeitpunkt T am Arbeitssystem vorliegt. Bei hinreichend hoher Anzahl von Bestandsmesspunkten entspricht der mittlere Bestand für ein Zeitintervall $[T_0, T_1]$ demnach (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 27 f.):

$$B_m = \frac{\sum_{T=T_0}^{T_1} B(T)}{z} \quad (2-7)$$

B_m	mittlerer Bestand [Std]
$B(T)$	Bestand im Zeitabschnitt T [Std]
z	Anzahl der Zeitabschnitte im Bezugszeitraum [-]
T_0	Beginn des Bezugszeitraums
T_1	Ende des Bezugszeitraums

Die mittlere Leistung entspricht der Steigung der Abgangskurve bzw. dem Quotienten des Abgangs und der Länge der Betrachtungsperiode (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 26 f.):

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{P} \quad (2-8)$$

L_m	mittlere Leistung [Std/BKT]
ZAU_i	Auftragszeit je Arbeitsvorgang i [Std]
n	Anzahl der zurückgemeldeten Arbeitsvorgänge [-]
P	Länge der Betrachtungsperiode [BKT]

Die Reichweite ergibt sich aus dem horizontalen Abstand der Zugangs- und Abgangskurve. Sie beschreibt, wie lange der vorliegende Bestand bei bekannter Leistung ausreicht, bis das Arbeitssystem leer läuft. Die Gleichung zur Berechnung lässt sich trigonometrisch aus dem Durchlaufdiagramm herleiten und wird auch als *Trichterformel* bezeichnet (Bechte 1984, S. 39 f.):

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad (2-9)$$

R_m	mittlere Reichweite [BKT]
B_m	mittlerer Bestand [Std]
L_m	mittlere Leistung [Std/BKT]

Sind der Anfangs- und der Endbestand über einen Auswertungszeitraum in etwa gleich, verlaufen Zugangs- und Abgangskurve parallel, sodass die Reichweite näherungsweise der mittleren gewichteten Durchlaufzeit entspricht (Bechte 1984, S. 46 f.; Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 30):

$$R_m \cong ZDL_{mg} \quad (2-10)$$

R_m mittlere Reichweite [BKT]
 ZDL_{mg} mittlere gewichtete Durchlaufzeit [BKT]

Über lange Zeiträume bietet die Trichterformel eine gute Annäherung für die *mittlere gewichtete Durchlaufzeit*. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert der mit den Auftragszeiten gewichteten Durchlaufzeiten der Arbeitsvorgänge (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 29 f.):

$$ZDL_{mg} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZDL_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \quad (2-11)$$

ZDL_{mg} mittlere gewichtete Durchlaufzeit [BKT]
 ZDL_i Durchlaufzeit je Arbeitsvorgang i [BKT]
 ZAU_i Auftragszeit je Arbeitsvorgang i [Std]

Die Trichterformel beschreibt vereinfacht die Einflussgrößen auf die Durchlaufzeit. Unternehmen können Durchlaufzeiten also senken, indem sie entweder die Bestände reduzieren oder die Leistung erhöhen. Die Leistung ergibt sich aus der Marktnachfrage und dem Kapazitätsangebot und eignet sich daher nur selten als kurzfristige Regelgröße für die Durchlaufzeit. Bestände können dagegen auch kurzfristig gesenkt werden, indem entweder Plan-Durchlaufzeiten reduziert oder Bestände am Arbeitssystem direkt geregelt werden (Lödding 2016, S. 62 f.).

Die Trichterformel ist eng verwandt mit dem Gesetz von Little (*Little's Law*). Little's Law beschreibt den Zusammenhang zwischen Anzahl von Einheiten in einem System, der mittleren Ankunftsrate und der mittleren Aufenthaltsdauer einer Einheit im eingeschwungenen Warteschlangenprozess (Little 1961):

$$F_m = \lambda_m \cdot W_m \quad (2-12)$$

F_m mittlere Anzahl von Einheiten im System
 λ_m mittlere Ankunftsrate
 W_m mittlere Aufenthaltsdauer einer Einheit im System

Dabei entspricht die Anzahl von Einheiten in der Terminologie des Trichtermodells dem Bestand in Anzahl Aufträgen ($F_m = BA_m$) und die mittlere Aufenthaltsdauer der mittleren virtuellen Durchlaufzeit ($W_m = ZDL_{vir}$). In einem stationären Prozess entspricht die Ankunftsrate der Abgangsrate ($\lambda_m = LA_m$), sodass sich hieraus die Trichterformel mit der Angabe der Größen in Anzahl Aufträgen ableiten lässt (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 32-34):

$$BA_m = LA_m \cdot ZDL_{vir} \leftrightarrow ZDL_{vir} = \frac{BA_m}{LA_m} \quad (2-13)$$

BA_m mittlerer Bestand in Anzahl Aufträgen [-]
 LA_m mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

ZDL_{vir} mittlere virtuelle Durchlaufzeit [BKT]

Die mittlere virtuelle Durchlaufzeit entspricht dabei nicht dem arithmetischen Mittelwert, sondern einem aus den Mittelwerten von Bestand und Leistung berechneten scheinbaren Mittelwert der Durchlaufzeiten. Der so berechnete Wert unterscheidet sich von dem mit der Trichterformel (Gleichung 2-9) berechneten Wert wie folgt: Die mittlere virtuelle Durchlaufzeit entspricht der mittleren Verweilzeit eines Auftrags bis zur Abfertigung am Arbeitssystem. Die Trichterformel dagegen beschreibt, wie lange es dauert, bis der Bestand vollständig abgearbeitet ist (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 33-36).

2.2.4 Produktionskennlinien

Zwar hilft es bei der Analyse des aktuellen Systemzustands, die Zugänge und Abgänge im Durchlaufdiagramm darzustellen. Dies gibt jedoch noch keine Hinweise auf vorliegende Verbesserungspotenziale. Unternehmen stehen also weiterhin vor der Fragestellung, wie sie z. B. eine hohe Auslastung bei möglichst geringen Durchlaufzeiten erreichen können. Die von Nyhuis und Wiendahl entwickelten Produktionskennlinien beantworten diese Frage, indem sie die logistischen Zielgrößen für unterschiedliche Betriebszustände in einem Diagramm gegenüberstellen (Nyhuis & Wiendahl 2012).

Verlauf der Produktionskennlinien

In der Theorie der Produktionskennlinien wird zwischen drei charakteristischen Betriebszuständen unterschieden. Abbildung 2-6 stellt in Bildteil a) die Durchlaufdiagramme für diese Zustände dar und erklärt, wie diese mit der Produktionskennlinie in Bildteil b) zusammenhängen.

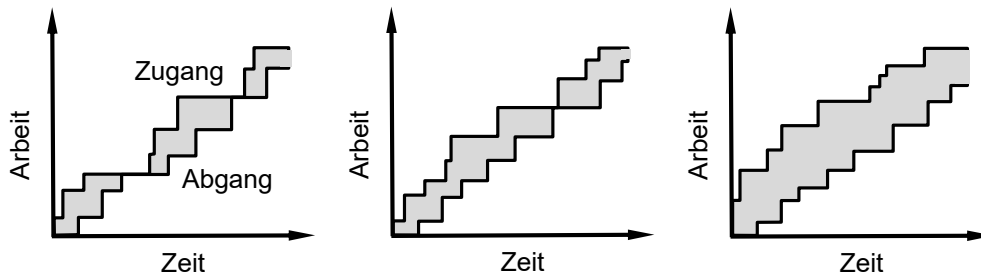
Im Unterlastbereich (I) ist das Bestandsniveau zu gering, um das Arbeitssystem voll auszulasten. Das Arbeitssystem wartet also aufgrund von Materialflussabbrissen. Aufträge können dagegen sofort nach Ankunft bearbeitet werden, da sie auf ein leeres Arbeitssystem treffen. Im Übergangsbereich (II) liegt gerade so viel Bestand am Arbeitssystem vor, dass es nur noch sehr selten zu Materialflussabbrissen kommt. Das Arbeitssystem ist also nahezu voll ausgelastet. Aufträge treffen meist auf ein arbeitendes Arbeitssystem, sodass Wartezeiten entstehen. Im Überlastbereich (III) liegt so viel Bestand vor, dass das Arbeitssystem voll ausgelastet ist. Aufträge konkurrieren um die Ressource und warten lange auf ihre Bearbeitung (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 37 f.; Kettner & Jendralski 1979, S. 415 f.).

Für jeden Betriebszustand eines Arbeitssystems können aus dem Durchlaufdiagramm der mittlere Bestand, die mittlere Leistung sowie die mittlere Reichweite ausgewertet werden. Aus der Darstellung der Zielgrößen über dem Bestand ergibt sich die Produktionskennlinie, die im unteren Bildteil der Abbildung 2-6 dargestellt ist. Da der

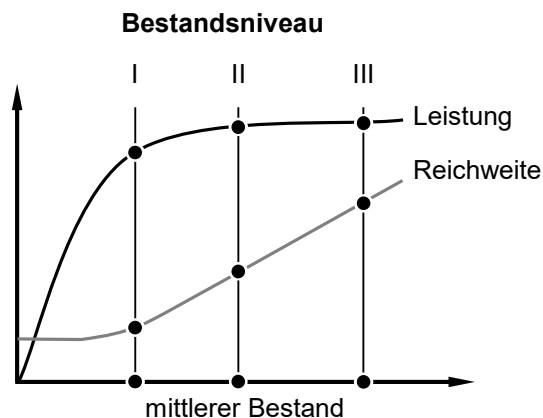
Bestand durch Regulierung des Zugangs zur Fertigung gesteuert werden kann, ist er die unabhängige Größe der Produktionskennlinien.

a) typische Betriebszustände an einem Arbeitssystem

I: geringes Bestandsniveau II: Übergangsbereich III: hohes Bestandsniveau



b) Darstellung der Betriebszustände in Produktionskennlinien



13960

Abbildung 2-6. Herleitung der Produktionskennlinien (Wiendahl 1997, S. 138 nach Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 37)

Berechnung von Produktionskennlinien

Selten liegen für ein betrachtetes Arbeitssystem ausreichend Daten vor, um für jeden Betriebszustand die Zielgrößen aus den Rückmeldungen auswerten zu können. Eine Möglichkeit, Produktionskennlinien zu erzeugen, ist daher die Simulation des Arbeitssystemverhaltens unter verschiedenen Belastungsszenarien (u. a. Bechte 1984, S. 87-98; Erdlenbruch 1984, S. 100-105; Kettner & Jendralski 1979, S. 415 f.). Da insbesondere die Erstellung und Evaluation von Simulationsmodellen sehr aufwendig sein kann, gibt es Ansätze, Produktionskennlinien zu berechnen bzw. anzunähern. Grundsätzlich kann hier zwischen Modellen der Warteschlangentheorie (z. B. Hopp & Spearman 2008, S. 264-302; Sainis 1975) und der Theorie der Produktionskennlinien von Nyhuis und Wiendahl unterschieden werden (Nyhuis & Wiendahl 2012).

International ist die Warteschlangentheorie weiter verbreitet als die Kennlinientheorie von Nyhuis und Wiendahl, allerdings spiegeln die Annahmen der Warteschlangentheorie die Praxis der Produktionsplanung und -steuerung häufig nicht realistisch wider. Die Warteschlangentheorie geht davon aus, dass Kapazitäten und Belastungen starr sind, obwohl dies in der Praxis meist nicht der Fall ist. Diese Annahme führt dazu, dass die Auslastung auch bei hohen Beständen unterschätzt wird. Die Theorie von Nyhuis und Wiendahl bietet dagegen die Möglichkeit, über eine geeignete Parametrierung den Produktionsprozess realistischer abzubilden (Nyhuis et al. 2005, S. 419 f.).

Schritt 1: Ableitung idealer Produktionskennlinien. Die Theorie der Produktionskennlinien von Nyhuis und Wiendahl beruht auf der Definition eines idealen Produktionsprozesses nach Wedemeyer. Abbildung 2-7 stellt das Durchlaufdiagramm für den idealen Prozess dar.

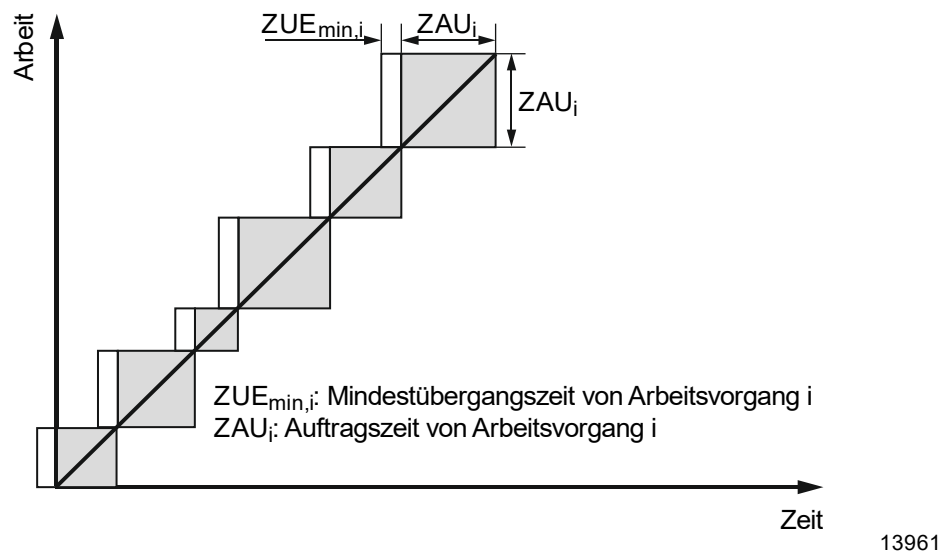
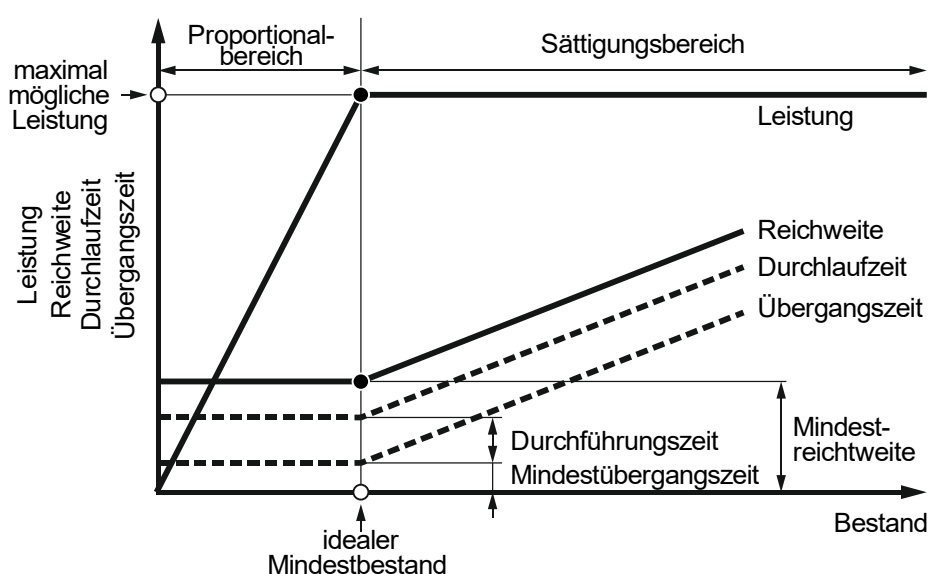


Abbildung 2-7. Idealer Produktionsprozess unter Berücksichtigung von Mindestübergangszeiten (in Anlehnung an Wedemeyer (1989, 52 f.) nach Nyhuis & Wiendahl (2012, S. 65-67))

Wedemeyer definiert das ideale Bestandsniveau an einem Arbeitssystem wie folgt: „Der untere Grenzwert [des Bestands] ist erreicht, wenn der Folgeauftrag gerade mit dem Bearbeitungsende des aktuellen Auftrags eintrifft“ (Wedemeyer 1989, S. 51).

Diese Definition impliziert, dass weder das Arbeitssystem auf Aufträge noch die Aufträge auf das Arbeitssystem warten. Von diesem Prozess leitet er die in Abbildung 2-8 dargestellte Leistungskennlinie ab, die sich nur durch die Berechnung des Abknickpunkts konstruieren lässt (Wedemeyer 1989, S. 52 f.).



13962

Abbildung 2-8. Ideale Leistungs- und Zeitgrößenkennlinien (Wedemeyer (1989, 52 f.) nach Nyhuis & Wiendahl (2012, S. 65-67))

Basierend auf der Arbeit von Wedemeyer definiert Nyhuis den Bestand im Abknickpunkt der idealen Kennlinie als den *idealen Mindestbestand*. Dieser bestimmt die untere Grenze, bei der das Arbeitssystem gerade voll ausgelastet ist. Er berechnet sich über die mittlere gewichtete Auftragszeit. Sind Mindestübergangszeiten durch bspw. Transportvorgänge oder technisch bedingte Nachliegezeiten erforderlich, so erhöht sich der ideale Mindestbestand (Nyhuis 1991, S. 24 f.):

$$BI_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_i \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} + \frac{\sum_{i=1}^n (ZUE_{\min,i} \cdot ZAU_i)}{\sum_{i=1}^n ZAU_i} \quad (2-14)$$

- BI_{\min} idealer Mindestbestand [Std]
- ZAU_i Auftragszeit je Arbeitsvorgang i [Std]
- $ZUE_{\min,i}$ Mindestübergangszeit je Arbeitsvorgang i [Std]

Die maximale Leistung wird im Wesentlichen durch die Kapazität bestimmt. Je nachdem, welcher Faktor die Kapazität begrenzt, bestimmt das Betriebsmittel oder das Personal die maximal mögliche Leistung (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 66).

Ist die Leistungskennlinie bekannt, so lässt sich mithilfe der Trichterformel (Gleichung 2-9) die Reichweite bestimmen. Im Gegensatz zur realen Kennlinie lässt sich die ideale Kennlinie (Abbildung 2-8) in nur zwei charakteristische Bereiche einteilen. Im Proportionalbereich steigt die Leistung proportional zum Bestand an. Sobald der Bestand den Wert des idealen Mindestbestands erreicht, beginnt der Sättigungsbereich. Das Arbeitssystem ist voll ausgelastet, sodass mehr Bestand zu keiner weiteren Leistung führt, sondern lediglich zu Wartezeiten bei den Aufträgen, die sich in einem Anstieg der Reichweite äußert (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 67 f.).

Schritt 2: Ableitung realer Kennlinien. Die Annahmen des idealen Produktionsprozesses liegen in der Realität nur selten vor. Auftrags- und Zwischenankunftszeiten streuen und können meist nicht exakt vorhergesagt werden, sodass ein Pufferbestand zur vollen Auslastung des Arbeitssystems nötig ist. Nyhuis hat daher eine Formel basierend auf einer C-Normfunktion zur Annäherung der realen Kennlinie entwickelt (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 81-84):

$$B_m(L_m) = BI_{\min} \cdot \frac{L_m}{L_{\max}} + BI_{\min} \cdot \alpha_1 \cdot \left(1 - \sqrt[4]{1 - \frac{L_m}{L_{\max}}} \right)^4 \quad (2-15)$$

- B_m mittlerer Bestand [Std]
- L_m mittlere Leistung [Std/BKT]
- BI_{\min} idealer Mindestbestand [Std]
- L_{\max} maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
- α_1 Streckfaktor [-]

Abbildung 2-9 zeigt den Zusammenhang zwischen idealer und realer Produktionskennlinie.

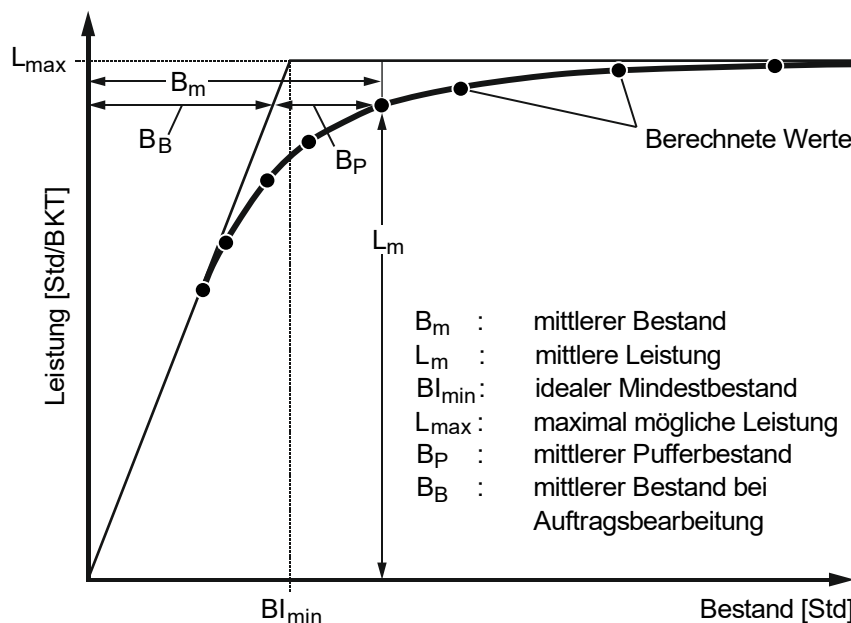
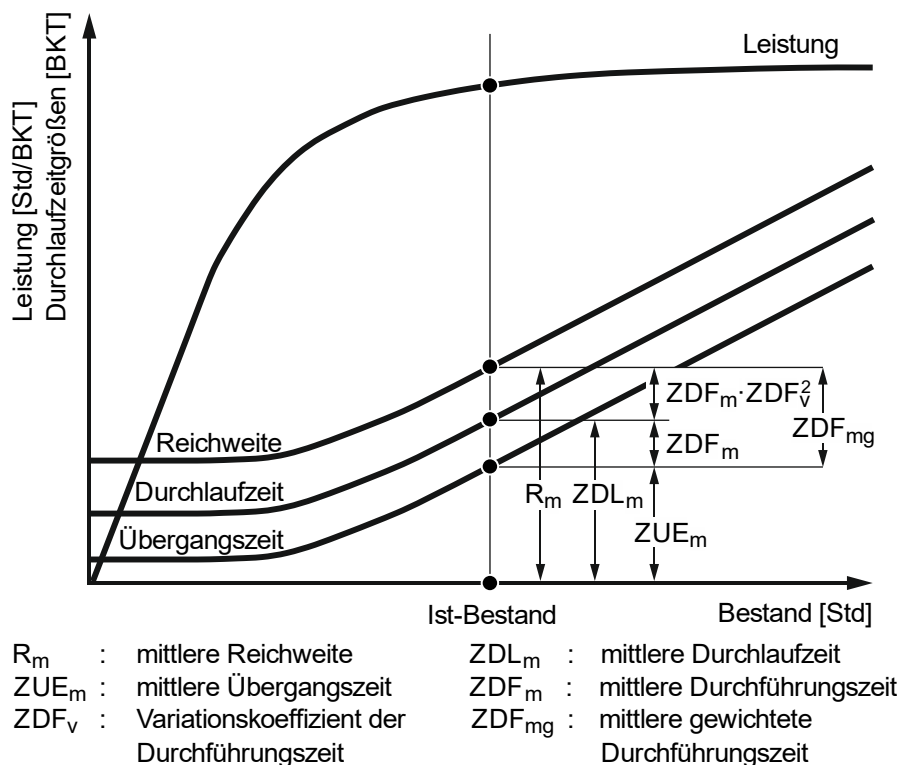


Abbildung 2-9. Konstruktion realer Produktionskennlinien (in Anlehnung an Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 82)

Der Bestand setzt sich im realen Prozess aus dem Puffer- und dem Bearbeitungsbestand zusammen. Der erste Summand der Gleichung 2-15 ist der Bearbeitungsbestand und entspricht dem Verlauf der idealen Kennlinien. Der zweite Summand be-

schreibt den Pufferbestand, der von drei Parametern abhängt. Je höher die Auftragszeiten streuen, desto höher ist der ideale Mindestbestand und desto höher ist auch der notwendige Pufferbestand. Der Pufferbestand wächst zudem überproportional zur angestrebten Auslastung (L_m/L_{max}) an. Wie gut Zugang und Abgang eines Arbeitssystems aufeinander abgestimmt sind, wird in der Gleichung durch den empirischen Faktor α_1 ausgedrückt. Für Werkstattfertigungen hat sich dabei ein Wert für den Streckfaktor von $\alpha_1=10$ bewährt (Nyhuis & Wiendahl 2012, S. 81-84).



13964

Abbildung 2-10. Zusammenhang zwischen Durchlaufzeitgrößen in der Produktionskennlinie (Ludwig & Nyhuis 1992, S. 479 nach Lödding 2016, S. 72)

Schritt 3: Berechnung der Durchlaufzeitgrößen. Aus dem Quotienten des Bestands und der Leistung lässt sich wie bei der idealen Kennlinie die Reichweite bestimmen. Der formale Zusammenhang zwischen der Reichweite und der Durchlaufzeit wurde von Ludwig und Nyhuis hergeleitet (Ludwig & Nyhuis 1992):

$$ZDL_m = R_m - ZDF_m \cdot ZDF_v^2 \quad (2-16)$$

- ZDL_m mittlere Durchlaufzeit [BKT]
- R_m mittlere Reichweite [BKT]
- ZDF_m mittlere Durchführungszeit [BKT]
- ZDF_v Variationskoeffizient der Durchführungszeit [BKT] (=ZAU_v)

Abbildung 2-10 zeigt den Zusammenhang zwischen den Durchlaufzeitgrößen im realen Produktionsprozess. Die Übergangszeit ergibt sich aus der Differenz zwischen Durchlaufzeit und Durchführungszeit (Gleichung 2-4). Der dargestellte Zusammenhang zwischen den Durchlaufzeitgrößen gilt allerdings nur dann, wenn die Reihenfolge auftragszeitunabhängig gebildet wird.

Anwendung von Produktionskennlinien

Mithilfe von Produktionskennlinien ist es möglich, sich einer Lösung des Dilemmas der Ablaufplanung zu nähern. Sie visualisieren den Bestandspunkt, der eine hohe Leistung bei moderaten mittleren Durchlaufzeiten ermöglicht (Wiendahl 1997, S. 138 f.).

Darüber hinaus können die Kennlinien genutzt werden, um Plan-Durchlaufzeiten mithilfe der flussgradorientierten Terminierung zu bestimmen (Ludwig 1995, S. 83-87). Hierfür wird der von Ludwig und Nyhuis hergeleitete Zusammenhang zwischen den Durchlaufzeitgrößen genutzt (Ludwig & Nyhuis 1992). Da Übergangszeiten (bei Anwendung auftragszeitunabhängiger Reihenfolgeregelungen) unabhängig von der individuellen Durchführungszeit eines Arbeitsvorgangs sind, können mithilfe der Kennlinien Plan-Übergangszeiten festgelegt werden. Die Summe der Plan-Übergangszeit des Arbeitssystems und der Plan-Durchführungszeit ergibt die Plan-Durchlaufzeit eines Arbeitsvorgangs für das betrachtete Arbeitssystem (Lödding 2016, S. 74-79).

2.2.5 Terminabweichung und Termintreue

Die Terminabweichung ist allgemein die Differenz zwischen Ist- und Planterminen im Auftragsdurchlauf. Die Abgangs- bzw. Zugangsterminabweichungen ergeben sich über die Differenz der jeweiligen Termine. Dabei ist die Abgangsterminabweichung die wichtigste Größe, da der Kunde sie direkt wahrnimmt, falls der Lieferzeitpuffer nicht ausreicht (Dombrowski 1988, S. 48):

$$TAA = TAE_{Ist} - TAE_{Plan} \quad (2-17)$$

TAA	Terminabweichung Abgang [BKT]
TAE _{Ist}	Ist-Bearbeitungsende Auftrag [BKT]
TAE _{Plan}	Plan-Bearbeitungsende Auftrag [BKT]

Analog dazu berechnet sich die Zugangsterminabweichung über die Differenz von Ist- und Plan-Zugangstermin (Dombrowski 1988, S. 48):

$$TAZ = TAB_{Ist} - TAB_{Plan} \quad (2-18)$$

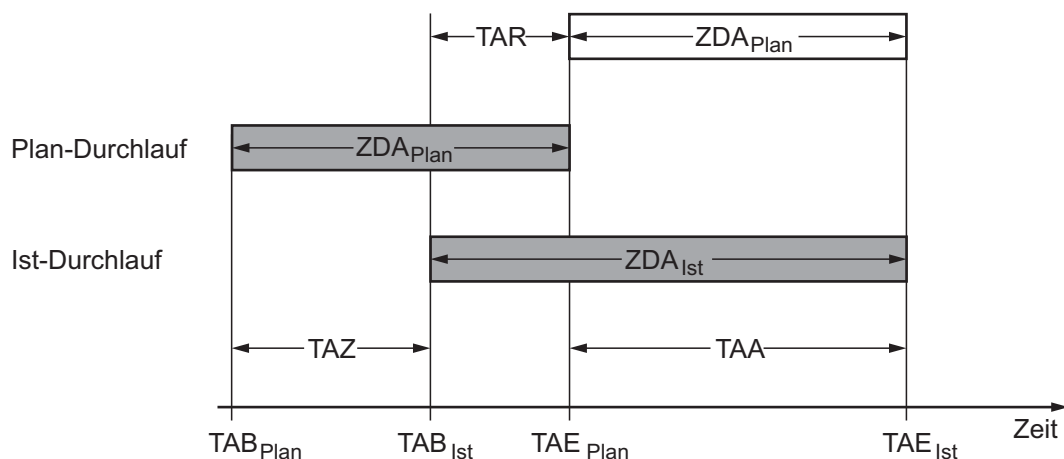
TAZ	Terminabweichung Zugang [BKT]
TAB _{Ist}	Ist-Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]
TAB _{Plan}	Plan-Bearbeitungsanfang Auftrag [BKT]

Die relative Terminabweichung beschreibt die Abweichung der Ist- von der Plan-Durchlaufzeit. Sie gibt an, ob der Auftrag gegenüber seinem Plan-Durchlauf beschleunigt oder verzögert wurde. Sie ergibt sich aus der Differenz zwischen Ist- und Plan-Durchlaufzeit oder zwischen Abgangs- und Zugangsterminabweichung (Dombrowski 1988, S. 49 f.):

$$TAR = ZDA_{Ist} - ZDA_{Plan} = TAA - TAZ \quad (2-19)$$

TAR	relative Terminabweichung [BKT]
ZDA _{Ist}	Ist-Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
ZDA _{Plan}	Plan-Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
TAA	Terminabweichung Abgang [BKT]
TAZ	Terminabweichung Zugang [BKT]

Abbildung 2-11 zeigt, wie die unterschiedlichen Terminkennzahlen zusammenhängen.



- TAB : Bearbeitungsanfang Auftrag (Auftragsfreigabe)
- TAE : Bearbeitungsende Auftrag
- ZDA : Durchlaufzeit
- TAA : Terminabweichung Abgang
- TAZ : Terminabweichung Zugang
- TAR : Terminabweichung relativ

10977

Abbildung 2-11. Definition der Terminabweichungsgrößen (Dombrowski 1988, S. 49 nach Löd- ding 2016, S. 33)

Die *Terminabweichung* kann für einzelne Aufträge oder einzelne Arbeitsvorgänge berechnet werden. Die *Termin-treue* wird dagegen auf eine Menge von Aufträgen (oder Arbeitsvorgängen) bezogen, um die Fähigkeit der gesamten Fertigung (oder des Arbeitssystems) zur Einhaltung von Terminvorgaben zu bewerten. Auch die *Termin-treue* kann für die Zugänge oder Abgänge bestimmt werden. Dabei hat sich die Berechnung

der Termintreue in Analogie zur Bestimmung der Prozessfähigkeit auf Basis einer Toleranzgrenze bewährt (Dombrowski 1988, S. 21-31). Die Abgangstermintreue (im Weiteren kurz als Termintreue bezeichnet) ist dabei die wichtigste Größe und berechnet sich über den Anteil der Aufträge, die innerhalb einer Toleranzgrenze fertiggestellt wurden (Yu 2001, S. 13 f.; Lödding 2016, S. 34):

$$TT = \frac{\text{AnzAuf mit } TAA_{UG} \leq TAA \leq TAA_{OG}}{\text{AnzAuf}} \cdot 100 \quad (2-20)$$

TT	Termintreue [%]
AnzAuf	Anzahl Aufträge [-]
TAA _{UG}	Untergrenze für die zulässige Terminabweichung Abgang [BKT]
TAA	Terminabweichung Abgang [BKT]
TAA _{OG}	Obergrenze für die zulässige Terminabweichung Abgang [BKT]

2.2.6 Aufteilung der Terminabweichung in ihre Ursachen

Aufgrund ihrer Bedeutung für die Kunden sind die Termintreue und die Terminabweichung für viele Unternehmen die wichtigsten logistischen Zielgrößen. Um diese zu verbessern, ist das Verständnis ihrer Ursachen elementar. Nach Lödding sind die Ursachen einer schlechten Termintreue *Rückstand* und *Reihenfolgeabweichungen* in der Fertigung (Lödding 2016, S. 8). Basierend auf den Arbeiten von Yu und Dombrowski hat Kuyumcu ein Modell für die Aufteilung der Terminabweichung in ihre Ursachen entwickelt (Kuyumcu 2013).

Terminabweichung aus Rückstand

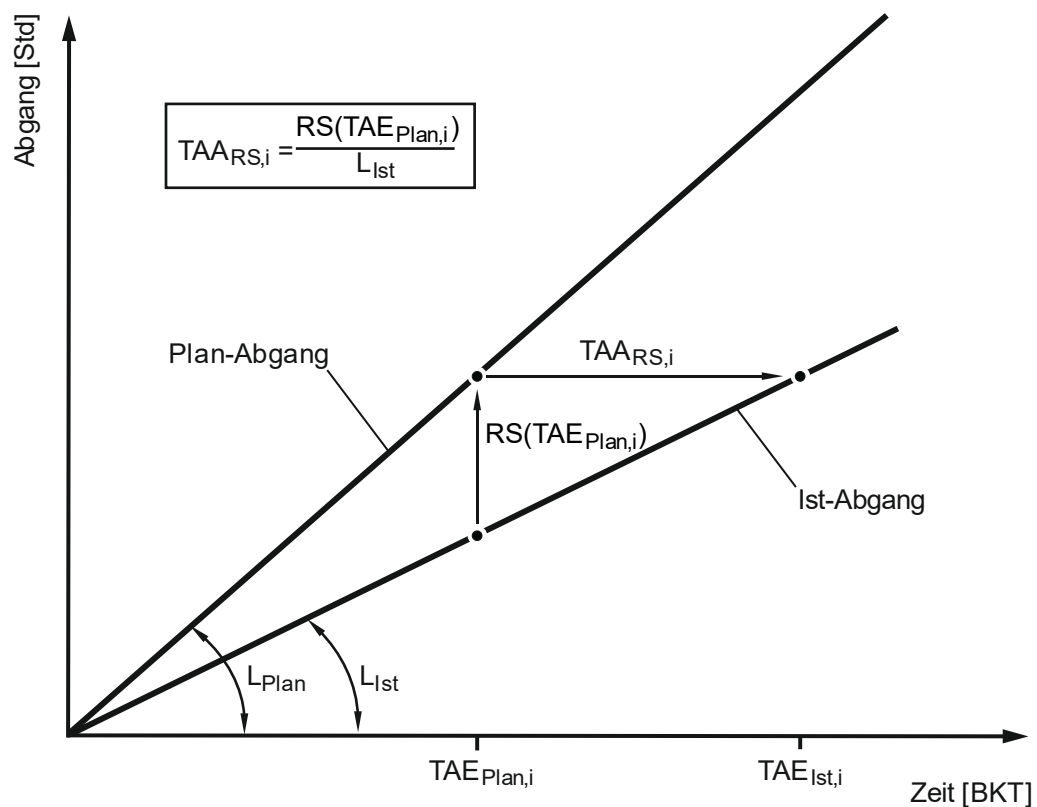
Der Rückstand ist definiert als die Differenz aus Plan-Abgang und Ist-Abgang. Er beschreibt, ob eine Fertigung die geplante Menge zu einem bestimmten Zeitpunkt fertigstellen konnte (Petermann 1996, S. 95 f.; Schmitz 1961, S. 19):

$$RS(t) = AB_{\text{Plan}}(t) - AB_{\text{Ist}}(t) \quad (2-21)$$

RS	Rückstand [Std]
AB _{Plan}	Plan-Abgang [Std]
AB _{Ist}	Ist-Abgang [Std]

Ein positiver Rückstand bedeutet, dass die Fertigung weniger Aufträge fertiggestellt hat als geplant. Negativer Rückstand bedeutet, dass die Fertigung schneller war als geplant (Lödding 2016, S. 81).

Um den Einfluss des Rückstands auf die Terminabweichung eines Auftrags zu ermitteln, wird angenommen, dass die Aufträge in der geplanten Reihenfolge bearbeitet wurden (Lödding 2016, S. 61 f.). Abbildung 2-12 zeigt, wie sich die Terminabweichung aus Rückstand dann berechnen lässt.



- $TAA_{RS,i}$: Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i
 $TAE_{Plan,i}$: Plan-Bearbeitungsende von Auftrag i
 $TAE_{Ist,i}$: Ist-Bearbeitungsende von Auftrag i
 L : Leistung
 $RS(t)$: Rückstand zum Zeitpunkt t

12518

Abbildung 2-12. Terminabweichung aus Rückstand (Lödding 2016, S. 82)

Es wird zunächst das Ist-Bearbeitungsende unter der Annahme ermittelt, dass alle Aufträge in der geplanten Reihenfolge bearbeitet worden wären. Das Ist-Bearbeitungsende (TAE_{Ist}) des Auftrags entspricht dem Termin, an dem der Ist-Abgang den Plan-Abgang erreicht. Im Beispiel aus Abbildung 2-12 ist der Ist-Abgang geringer als der Plan-Abgang. Es liegt ein positiver Rückstand vor. Analog zu dem von Yu beschriebenen Gesetz ergibt sich die rückstandsbedingte Terminabweichung eines Auftrags aus dem Verhältnis des Rückstands zur Leistung (Kuyumcu 2013, S. 45; Yu 2001, S. 41; Lödding et al. 2013, S. 61 f.):

$$TAA_{RS,i} = \frac{RS(TAE_{Plan,i})}{L_{Ist}} \quad (2-22)$$

- $TAA_{RS,i}$ Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i [BKT]
 RS Rückstand [Std]
 $TAE_{Plan,i}$ Plan-Fertigstellungstermin von Auftrag i [BKT]
 L_{Ist} Ist-Leistung [Std/BKT]

Der Mittelwert der Terminabweichung für das gesamte Arbeitssystem oder die Fertigung ergibt sich nach Yu ähnlich der Trichterformel durch das Verhältnis des mittleren Rückstands zur mittleren Leistung (Yu 2001, S. 41):

$$TAA_{RSA,m} = \frac{RSA_m}{LA_m} \quad (2-23)$$

$TAA_{RSA,m}$ mittlere Terminabweichung aus Rückstand [BKT]
 RSA_m mittlerer Rückstand in Anzahl Aufträgen [-]
 LA_m mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Werden Rückstand und Leistung in Stunden gemessen und ins Verhältnis zueinander gesetzt, so ergibt sich ähnlich zur Trichterformel die mittlere gewichtete Terminabweichung aus Rückstand (Lödding 2016, S. 83).

Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung

Die Reihenfolgeabweichung beschreibt, inwieweit Aufträge abweichend von der geplanten Reihenfolge bearbeitet wurden. Reihenfolgeabweichungen beeinflussen im Wesentlichen die Streuung der Terminabweichung. Die Berechnung der Reihenfolgeabweichung erfolgt über die Differenz des Ist-Rangs vom Plan-Rang. Die Plan-Ränge ergeben sich über die Plan-Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge, während die Ist-Ränge die tatsächliche Bearbeitungsreihenfolge widerspiegeln. Tabelle 2-1 zeigt beispielhaft, wie aus den Rängen die Reihenfolgeabweichungen berechnet werden (Lödding et al. 2013, S. 62).

Tabelle 2-1. Berechnung der Reihenfolgeabweichung (Lödding 2016, S. 86)

Auftrag	Plan-Rang [-]	Ist-Rang [-]	RAA [-]	ZAU [Std]	Plan-Rang [Std]	Ist-Rang [Std]	RA [Std]
2020	1	1	0	1	1	1	0
4080	2	3	1	3	4	5	1
5030	3	4	1	3	7	8	1
6020	4	2	-2	1	8	2	-6
			Σ 0				Σ -4
							Mittelwert: -1

RAA Reihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträge [-]
 RA Reihenfolgeabweichung [Std]
 ZAU Auftragszeit [Std]

Dabei können die Ränge in Anzahl Aufträgen (Spalten 2 und 3) oder gewichtet mit der Auftragszeit (Spalten 6 und 7) bestimmt werden. Aus der Differenz der Ist- von den Plan-Rängen ergibt sich die Reihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen (Lödding et al. 2013, S. 62):

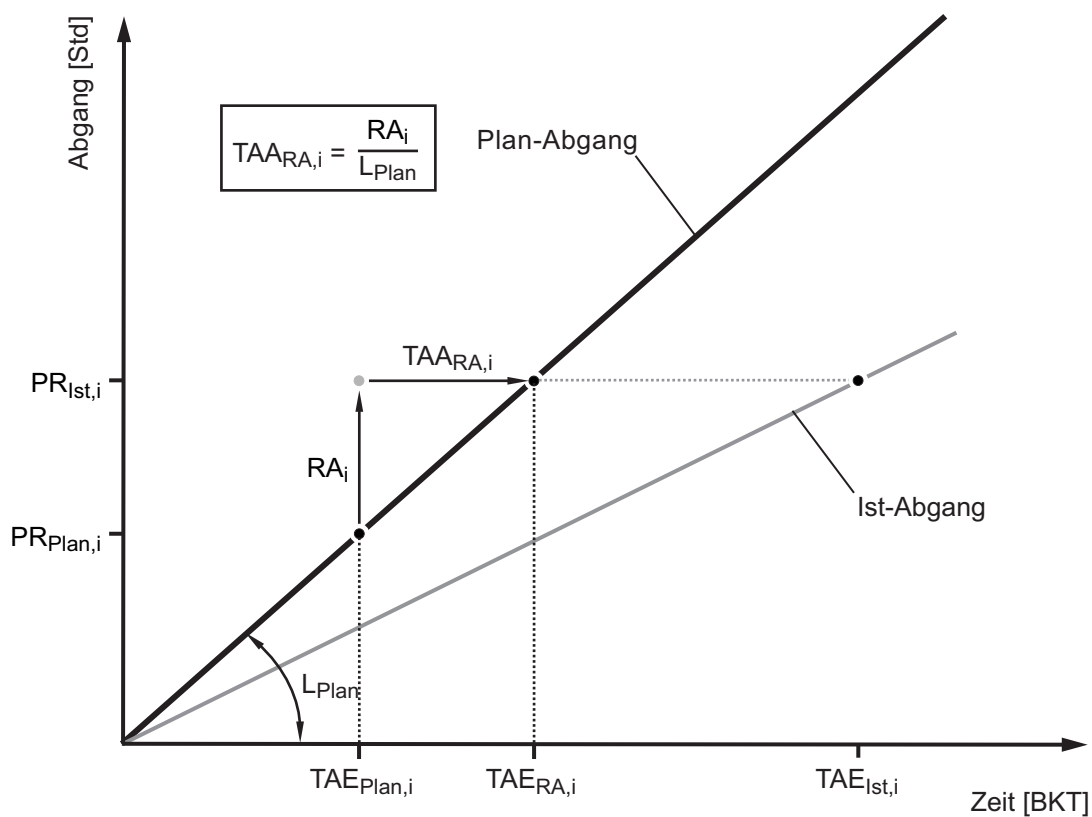
$$RAA_i = PRA_{Ist,i} - PRA_{Plan,i} \quad (2-24)$$

RAA_i Reihenfolgeabweichung von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
 PRA_i Prioritätsrang von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Analog dazu entspricht die Reihenfolgeabweichung in Vorgabestunden (Lödding et al. 2013, S. 62):

$$RA_i = PR_{Ist,i} - PR_{Plan,i} \quad (2-25)$$

RA_i Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]
 PR_i Prioritätsrang von Auftrag i [Std]



$TAA_{RA,i}$: Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag
 TAE : Fertigstellungstermin
 L : Leistung
 RA : Reihenfolgeabweichung
 PR : Prioritätsrang

12554

Abbildung 2-13. Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung (Lödding 2016, S. 87)

Die Summe aller Reihenfolgeabweichungen in Anzahl Aufträgen entspricht immer null, während die Summe der Reihenfolgeabweichungen in Vorgabestunden von null abweichen kann. In dem Beispiel in Tabelle 2-1 ist der Mittelwert negativ. Dies bedeutet, dass Aufträge mit einer kleinen Auftragszeit tendenziell beschleunigt wurden. Ist der

Mittelwert der Reihenfolgeabweichungen in Stunden positiv, wurden tendenziell Aufträge mit hohem Arbeitsinhalt beschleunigt (Lödding et al. 2013, S. 62).

Abbildung 2-13 zeigt, wie sich die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung berechnet. Sie ergibt sich analog zur Terminabweichung aus Rückstand aus dem Quotienten von Reihenfolgeabweichung und Plan-Leistung (Kuyumcu 2013, S. 43):

$$TAA_{RA,i} = \frac{RA_i}{L_{Plan}} \quad (2-26)$$

$TAA_{RA,i}$	Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [BKT]
RA_i	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]
L_{Plan}	Plan-Leistung [Std/BKT]

Dabei kann die Terminabweichung anstatt in Vorgabestunden auch auf Basis der Reihenfolgeabweichung und Leistung in Anzahl Aufträgen berechnet werden.

Terminabweichung aus Rückstand und Reihenfolgeabweichung

Die Terminabweichung eines Auftrags ergibt sich dann aus der Summe der Terminabweichung aus Rückstand und der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung (Kuyumcu 2013, S. 46):

$$TAA_i = TAA_{RS,i} + TAA_{RA,i} \quad (2-27)$$

TAA_i	Terminabweichung von Auftrag i [BKT]
$TAA_{RS,i}$	Terminabweichung aus Rückstand von Auftrag i [BKT]
$TAA_{RA,i}$	Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [BKT]

Wird für einen Zeitraum für jeden Auftrag die Terminabweichung aus Rückstand und die Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung ermittelt, können Ursachen für eine schlechte Termintreue sowie Maßnahmen zu ihrer Verbesserung ermittelt werden (Kuyumcu 2013, S. 108-126).

2.2.7 Aufteilung der Durchlaufzeit in ihre Bestandteile

Ähnlich zu dem Modell zur Aufteilung der Terminabweichung in ihre Ursachen entwickelten Lödding und Piontek ein Modell zur Aufteilung der Durchlaufzeit. Dabei beschreiben bestehende Modelle lediglich die mittlere Durchlaufzeit, die sich aus dem Verhältnis von mittlerem Bestand zu mittlerer Leistung ergibt. Im Mittel ist dieser Wert korrekt, im Einzelfall können die Durchlaufzeiten durch Reihenfolgeentscheidungen oder Bestandsschwankungen jedoch stark von diesem Mittelwert abweichen. Im Folgenden wird ein Modell vorgestellt, das die Durchlaufzeit in die Komponenten *bestandsbedingte* und *reihenfolgebedingte* Durchlaufzeit aufteilt (Lödding & Piontek 2018).

Bestandsbedingte Durchlaufzeit

Die bestandsbedingte Durchlaufzeit entspricht der zum Zugangszeitpunkt vorliegenden Bestandsreichweite und lässt sich somit über die Trichterformel beschreiben (Lödding & Piontek 2018, S. 3):

$$ZDL_{B,i} = \frac{B(T_{ZU,i})}{L} \quad (2-28)$$

$ZDL_{B,i}$	bestandsbedingte Durchlaufzeit von Auftrag i [BKT]
$B(T_{ZU,i})$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag i [Std]
L	Leistung zwischen Zugangszeitpunkt und FIFO-Abgangszeitpunkt von Auftrag i [Std/BKT]

Sie entspricht somit der Durchlaufzeit des Auftrags, wenn die Aufträge in der Reihenfolge ihres Zugangs, also First In – First Out (FIFO), bearbeitet werden (Lödding & Piontek 2018, S. 3).

Reihenfolgebedingte Durchlaufzeit

Ähnlich zu der Bestimmung der Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung wird die reihenfolgebedingte Durchlaufzeit bestimmt. Dabei werden die Plan- und Ist-Ränge jedoch anders definiert als bei der Terminabweichung. Dem Modell liegt dabei der Gedanke zugrunde, dass eine Abweichung der Durchlaufzeit von dem mit der Trichterformel bestimmten Wert (Gleichung 2-28) durch Abweichungen von der FIFO-Reihenfolge verursacht wird. Der Plan-Abgangsrang eines Auftrags entspricht somit seinem Ist-Zugangsrang. Der Ist-Zugangsrang eines Auftrags ergibt sich über die Summe der Ist-Zugänge in Ist-Zugangsreihenfolge. Die Berechnung der Reihenfolgeabweichung erfolgt nur über die Ist-Ränge, sodass auf den Index verzichtet wird (Lödding & Piontek 2018, S. 3):

$$Rg_{Zu,i} = \sum_{j=1}^{RgA_{Zu,i}} ZAU_j \quad (2-29)$$

$Rg_{Zu,i}$	Zugangsrang von Auftrag i [Std]
$RgA_{Zu,i}$	Zugangsrang von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
ZAU_j	Auftragszeit von Auftrag j [Std]

Analog dazu ergibt sich der Abgangsrang eines Auftrags aus der Summe der Abgänge in Abgangsreihenfolge. Aus der Differenz von Abgangs- und Zugangsrang in Vorgabestunden ergibt sich die Reihenfolgeabweichung in Stunden (Lödding & Piontek 2018, S. 3 f.):

$$RA_i = Rg_{Ab,i} - Rg_{Zu,i} \quad (2-30)$$

Grundlagen

RA_i	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]
$Rg_{Zu,i}$	Zugangsrang von Auftrag i [Std]
$Rg_{Ab,i}$	Abgangsrang von Auftrag i [Std]

Alternativ kann die Reihenfolgeabweichung auch in Anzahl Aufträgen berechnet werden. Dafür bildet man die Differenz von Zugangsrang und Abgangsrang in Anzahl Aufträgen (Lödding & Piontek 2018, S. 3 f.):

$$RAA_i = Rg_{Ab,i} - Rg_{Zu,i} \quad (2-31)$$

RAA_i	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$Rg_{Zu,i}$	Zugangsrang von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]
$Rg_{Ab,i}$	Abgangsrang von Auftrag i in Anzahl Aufträgen [-]

Tabelle 2-2 zeigt beispielhaft die Berechnung der Reihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen und in Vorgabestunden.

Tabelle 2-2. Berechnung der Reihenfolgeabweichung (in Anlehnung an Lödding & Piontek 2018, S. 4)

Auftrag	Zugangsrang [-]	Abgangsrang [-]	RAA [-]	ZAU [Std]	Zugangsrang [Std]	Abgangsrang [Std]	RA [Std]
1	1	2	1	2	2	7	5
2	2	1	-1	5	7	5	-2
3	3	3	0	3	10	10	0
			$\Sigma 0$				$\Sigma 3$

RAA	Reihenfolgeabweichung in Anzahl Aufträgen [-]
RA	Reihenfolgeabweichung [Std]
ZAU	Auftragszeit [Std]

Analog zur Terminabweichung aus Reihenfolgeabweichung ergibt sich die reihenfolgebedingte Durchlaufzeit aus dem Verhältnis der Reihenfolgeabweichung zur Leistung (Lödding & Piontek 2018, S. 4):

$$ZDL_{RA,i} = \frac{RA_i}{L} \quad (2-32)$$

$ZDL_{RA,i}$	reihenfolge(abweichungs)bedingte Durchlaufzeit von Auftrag i [BKT]
RA_i	Reihenfolgeabweichung von Auftrag i [Std]
L	Leistung zwischen FIFO-Abgangszeitpunkt und Abgangszeitpunkt von Auftrag i [Std/BKT]

Dabei kann die reihenfolgebedingte Durchlaufzeit auch auf Basis der Reihenfolgeabweichung sowie der Leistung in Anzahl Aufträgen (pro BKT) berechnet werden. Im Gegensatz zur mittleren und zur bestandsbedingten Durchlaufzeit kann die reihenfolge-

bedingte Durchlaufzeit auch negative Werte annehmen. Dies ist der Fall, wenn Aufträge gegenüber einer FIFO-Reihenfolge beschleunigt werden (Lödding & Piontek 2018, S. 4).

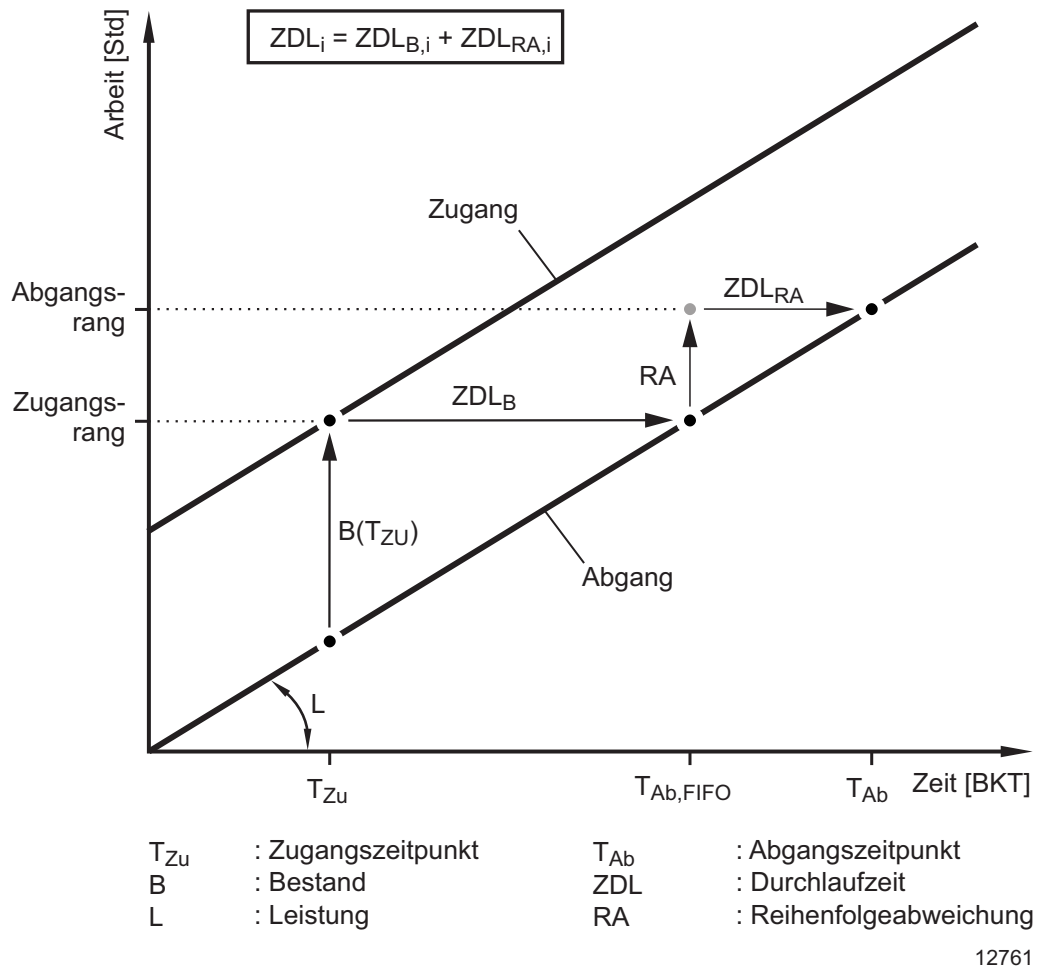


Abbildung 2-14. Aufteilung der Durchlaufzeit in bestands- und reihenfolgebedingte Durchlaufzeit (in Anlehnung an Lödding & Piontek 2018, S. 5)

Bestands- und reihenfolgebedingte Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit eines Auftrags ergibt sich aus der Summe der bestandsbedingten und der reihenfolgebedingten Durchlaufzeit (Lödding & Piontek 2018, S. 4):

$$ZDL_i = ZDL_{B,i} + ZDL_{RA,i} \quad (2-33)$$

- ZDL_i : Durchlaufzeit von Auftrag i [BKT]
- ZDL_{B,i} : bestandsbedingte Durchlaufzeit von Auftrag i [BKT]
- ZDL_{RA,i} : reihenfolge(abweichungs)bedingte Durchlaufzeit von Auftrag i [BKT]

Abbildung 2-14 stellt die Berechnung der einzelnen Bestandteile dar und wie diese zusammen die Durchlaufzeit eines Auftrags ergeben.

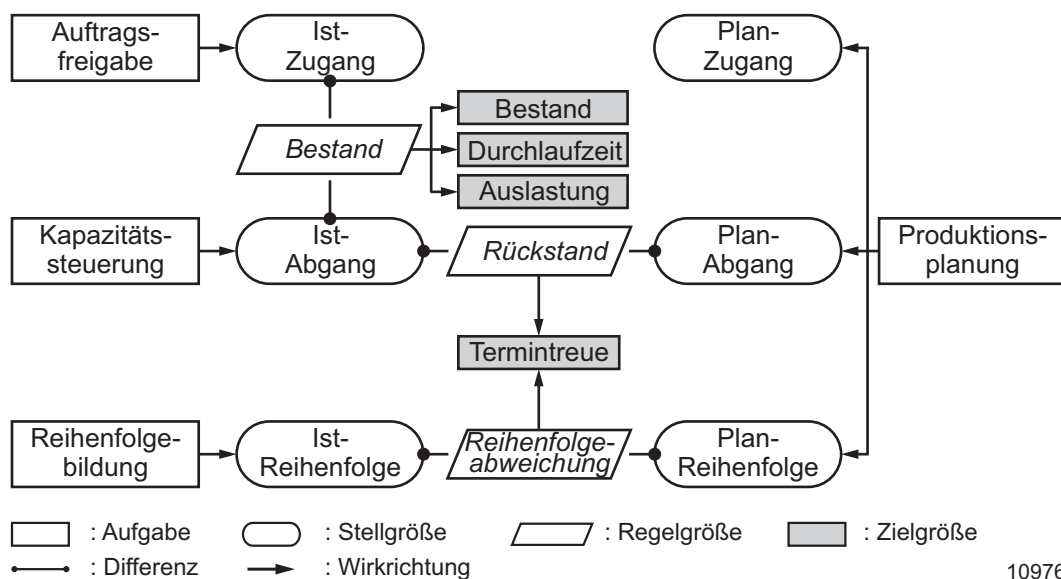
Die Zerlegung der Durchlaufzeit in ihre Bestandteile hilft, Einflüsse von Bestandschwankungen und Einflüsse von Reihenfolgeentscheidungen separat zu untersuchen (Lödding & Piontek 2018, S. 5-7).

2.3 Fertigungssteuerung

Ist der Produktionsplan erstellt, so können Unternehmen nur noch über eine effektive Fertigungssteuerung eine möglichst hohe logistische Zielerreichung erlangen. Im Folgenden wird daher zunächst ein Modell vorgestellt, das die Einflussmöglichkeiten der Fertigungssteuerung auf die logistischen Zielgrößen erläutert. Daraufhin werden die Aufgaben der Fertigungssteuerung und einige ausgewählte Verfahren vorgestellt.

2.3.1 Ein Modell der Fertigungssteuerung

Abbildung 2-15 zeigt, wie die Fertigungssteuerung und die Produktionsplanung zusammenhängen und die logistischen Zielgrößen beeinflussen. Dabei wird zwischen Aufgaben, Stell-, Regel- und Zielgrößen unterschieden (Lödding 2016, S. 8).



10976

Abbildung 2-15. Ein Modell zur Fertigungssteuerung (Lödding 2016, S. 8)

Aufgaben sind die Produktionsplanung, die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung sowie die Reihenfolgebildung. Dabei sind die letzten drei Aufgaben der Fertigungssteuerung zuzuordnen. Die Aufgaben beeinflussen direkt die *Stellgrößen*. Die Produktionsplanung legt Plan-Zugang, Plan-Abgang sowie Plan-Reihenfolge fest. Die Auftragsfreigabe bestimmt den Ist-Zugang, die Kapazitätssteuerung den Ist-Abgang und die Reihenfolgebildung die Ist-Reihenfolge. *Regelgrößen* ergeben sich aus der Differenz zwischen zwei Stellgrößen und lassen sich nur indirekt über die Stellgrößen beeinflussen. Die Differenz zwischen Ist-Zugang und Ist-Abgang ist der Bestand. Der

Rückstand ist die Differenz zwischen Ist- und Plan-Abgang. Eine Abweichung der Ist- von der Plan-Reihenfolge führt zu Reihenfolgeabweichungen. Die Stellgrößen beeinflussen wiederum die *Zielgrößen* Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung und Termintreue (Lödding 2016, S. 8-10).

Grundsätzlich ist es das Ziel, Plan-Abgang und Plan-Reihenfolge möglichst gut einzuhalten, da Kunden nur so ihre Aufträge pünktlich erhalten. Es gibt verschiedene Verfahren zur Gestaltung der Aufgaben, deren Eignung von den Merkmalen einer Fertigung abhängt (siehe auch die Ausführungen zu steuerungsrelevanten Fertigungsmerkmalen bei Lödding 2016, S. 123-136). Folgend werden ausgewählte Verfahren der Fertigungssteuerung vorgestellt.

2.3.2 Auftragsfreigabe

Die Auftragsfreigabe entscheidet, wann ein Auftrag der Fertigung zugeht. Dabei klassifiziert Lödding die Verfahren anhand der drei Merkmale *Kriterium*, *Detaillierungsgrad* sowie *Auslösungslogik* der Auftragsfreigabe. Das Kriterium legt dabei fest, welches Merkmal darüber entscheidet, ob ein Auftrag freigegeben wird. Der Detaillierungsgrad bestimmt, ob ein ganzer Auftrag oder nur der Arbeitsvorgang eines Auftrags freigegeben wird. Die Auslösungslogik beschreibt, wann die Entscheidung über die Freigabe getroffen wird. Aufgrund ihrer Relevanz werden folgend die Verfahren *Constant Work in Process* und *Auftragsfreigabe nach Termin* erläutert (Lödding 2016, S. 339).

Constant Work in Process (Conwip)

Die Conwip-Steuerung ist eine bestandsregelnde Auftragsfreigabe. Das Kriterium der Auftragsfreigabe ist dabei der Bestand in der Fertigung, der häufig in Anzahl Aufträgen oder in Fertigungsstunden gemessen wird. Dem Namen nach ist die Grundidee von Conwip, einen konstanten Bestand in der Fertigung zu gewährleisten. Die Conwip-Steuerung gibt erst dann einen Auftrag frei, wenn der Bestand in der Fertigung einen definierten Wert unterschreitet. Hierdurch wird die aktuelle Auslastung der Fertigung berücksichtigt und im Falle eines Fertigungsrückstands ein Bestandsaufbau durch die Freigabe weiterer Aufträge verhindert (Hopp & Spearman 2008, S. 363-365).

Auftragsfreigabe nach Termin

Die Auftragsfreigabe nach Termin ist ein sehr weit verbreitetes Auftragsfreigabeverfahren. Ein Auftrag wird dann freigegeben, wenn der Plan-Starttermin des ersten Arbeitsvorgangs erreicht ist. Voraussetzung zur Anwendung ist, dass ein ERP-System die Plan-Starttermine der Arbeitsvorgänge ermittelt hat (Lödding 2016, S. 357 f.).

2.3.3 Kapazitätssteuerung

Die Kapazitätssteuerung entscheidet über den kurzfristigen Einsatz der Kapazitäten und regelt so den Ist-Abgang der Fertigung. Dabei kann die Kapazität entweder über die Arbeitszeiten oder über die Zuordnung mehrfach qualifizierter Mitarbeiter gesteuert werden. Auch Verfahren der Kapazitätssteuerung können nach den Merkmalen *Kriterium*, *Detaillierungsgrad* und *Auslösungslogik* klassifiziert werden. Die *Rückstandsregelung* sowie die *planorientierte Kapazitätssteuerung* als häufig angewandte Verfahren zur Kapazitätssteuerung werden im Folgenden kurz näher erläutert (Lödding 2016, S. 531).

Rückstandsregelung

Ziel der Rückstandsregelung ist es, über Kapazitätsanpassungen den Plan-Abgang trotz Abweichungen durch Störungen zu erreichen. Dabei ist es zunächst wichtig, den Rückstand der Fertigung oder eines Arbeitssystems zu messen (vgl. Gleichung 2-21). Wird ein definierter Grenzurückstand erreicht, so werden Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung oder -senkung eingeleitet (Lödding 2016, S. 551 f.).

Planorientierte Kapazitätssteuerung

Ziel der planorientierten Kapazitätssteuerung ist es, Abweichungen der Ist-Kapazität von der Plan-Kapazität durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden. Es handelt sich dabei um kein explizit entwickeltes Verfahren, sondern um die täglichen Aufgaben von Fertigungsleitern und Meistern. Diese entscheiden über die kurzfristige Umverteilung von Mitarbeitern, den Einsatz von Springern oder die Verteilung von Arbeitsinhalten auf andere Fertigungsbereiche, um die Plan-Kapazität bereitstellen zu können (Lödding 2016, S. 573 f.).

2.3.4 Reihenfolgebildung

Die Reihenfolgebildung entscheidet darüber, welcher Auftrag aus der Warteschlange als nächstes bearbeitet wird. Ziel der Reihenfolgebildung ist dabei, die Reihenfolgeabweichungen zu verringern und darüber die Termintreue zu verbessern. Es gibt allerdings auch Reihenfolgeregeln, die die Leistung erhöhen sollen, wie beispielsweise die in dieser Arbeit behandelte rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung (Conway et al. 1967, S. 1 f.; Lödding 2016, S. 507-509).

Im Folgenden wird kurz auf die *First in – First Out*, die *Kürzeste-Operationszeit-Regel* sowie die Reihenfolgebildung nach *frühestem Plan-Endtermin* eingegangen, da diese in der Praxis weit verbreitet sind. Bestehende Ansätze zur rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung werden in Abschnitt 3.1 im Detail vorgestellt und diskutiert.

First In – First Out (FIFO)

Bei einer FIFO-Reihenfolgebildung werden Aufträge in der Reihenfolge ihres Zugangs bearbeitet. Vorteil ist, dass hierdurch keine Reihenfolgevertauschungen möglich sind, sodass unnötige Durchlaufzeitstreuungen vermeiden werden. Der Nachteil ist, dass es mit der FIFO-Reihenfolgebildung nicht möglich ist, verspätet eintreffende Aufträge zu beschleunigen (Lödding 2016, S. 509).

Kürzeste-Operationszeit-Regel (KOZ)

Bei der KOZ-Regel wird der Auftrag mit der niedrigsten Auftragszeit priorisiert. Diese Reihenfolgeregel erzielt im Vergleich zu anderen Verfahren kürzere mittlere Durchlaufzeiten und niedrigere Bestände in Anzahl Aufträgen. Nachteil der Reihenfolgeregel ist, dass sie eine hohe Streuung der Durchlaufzeiten verursacht und einzelne Aufträge lange verzögert (Conway et al. 1967, S. 26-30).

Frühester Plan-Endtermin (FPE)

Bei einer Reihenfolgebildung nach FPE erhält der Auftrag mit dem frühesten Plan-Endtermin die höchste Priorität (Lödding 2016, S. 510). Besonders in einer Werkstattfertigung mit komplexen Materialflüssen kann diese Reihenfolgeregel Reihenfolgeabweichungen reduzieren und hierdurch die Termintreue verbessern (Lödding & Piontek 2017).

3 Bestehende Ansätze

Die Reihenfolgebildung am Arbeitssystem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten ist aufgrund der hohen Relevanz sowie der Komplexität seit vielen Jahren Gegenstand von Forschungsarbeiten. Dieser Abschnitt stellt den aktuellen Forschungsstand auf dem Gebiet der rüstzeitoptimierenden Reihenfolgebildung vor. Dabei ist der Abschnitt in zwei Teile aufgeteilt: Abschnitt 3.1 stellt besonders relevante Reihenfolgeregeln mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten vor. Abschnitt 3.2 beschreibt Untersuchungen zum Einfluss dieser Reihenfolgeregeln auf die logistischen Zielgrößen.

3.1 Rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung

In diesem Abschnitt sollen bestehende Ansätze zur Rüstzeitoptimierung vorgestellt werden. Abschnitt 3.1.1 geht dabei zunächst auf die Ziele und Herausforderungen einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung ein. Die Abschnitte 3.1.2 und 3.1.3 stellen anschließend Reihenfolgeregeln zur rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung vor. Aufgrund der Vielzahl an Veröffentlichungen auf diesem Gebiet wird nur auf die Regeln eingegangen, die von der Literatur als besonders wirksam erkannt wurden.

3.1.1 Ziele

Neben dem Zielkonflikt zwischen Bestand und Auslastung können weitere Faktoren einen Konflikt zwischen Zielgrößen verursachen. Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten sind eine in vielen Fertigungen auftretende Herausforderung für die Logistik. In diesem Fall sind Rüstvorgänge für einen Auftrag davon abhängig, welcher Auftrag zuvor auf der Maschine gefertigt wurde (Allahverdi et al. 1999, S. 219; Conway et al. 1967, S. 53).

Aufträge, zwischen denen keine oder nur geringe Rüstzeiten anfallen, gehören dabei einer sogenannten Rüstfamilie an. Zwischen Aufträgen der gleichen Rüstfamilie sind nur kleine oder gar keine Rüstvorgänge nötig, während zwischen Aufträgen unterschiedlicher Rüstfamilien große Rüstvorgänge erforderlich sind. Die Rüstzeiten lassen sich dann in einer sogenannten Rüstzeitmatrix darstellen (siehe Abbildung 1-1). Auf der Diagonalen sind kleine Rüstzeiten, während ober- und unterhalb der Diagonalen große Rüstzeiten stehen (Conway et al. 1967, S. 53 f.).

Die Literatur spricht häufig erst dann von reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten, wenn die Reihenfolge der Rüstfamilien die Rüstzeiten beeinflusst. Allerdings sind Rüstzeiten auch dann reihenfolgeabhängig, wenn die Reihenfolge der Rüstfamilien irrelevant ist (vgl. Pickardt & Branke (2012)). Sind beispielsweise alle Rüstzeiten, abgesehen von den kleinen Rüstzeiten auf der Diagonalen, in der Rüstzeitmatrix identisch, dann beeinflusst die Reihenfolge der Aufträge die Anzahl der großen Rüstvorgänge. Es gibt also zwei Ebenen reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten: 1. Die Reihenfolge der Aufträge

beeinflusst die Anzahl großer Rüstaufwände. Es können also je nach Bearbeitungsreihenfolge große Rüstvorgänge vermieden werden. 2. Die Reihenfolge der Rüstfamilien beeinflusst die Rüstzeiten. Große Rüstzeiten können reduziert werden, indem Rüstfamilien in einer sinnvollen Reihenfolge gefertigt werden. Während die erste Ebene der reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten notwendig ist, um von einer Reihenfolgeabhängigkeit sprechen zu können, ist die zweite Ebene nur optional (Pickardt & Branke 2012, S. 5824).

Unabhängig davon, auf welcher Ebene eine Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten besteht, versuchen Unternehmen über eine rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung den Rüstaufwand und damit die Rüstkosten zu reduzieren. Dies widerspricht dem Ziel der Reihenfolgebildung, Reihenfolgeabweichungen zu verhindern oder zu reduzieren (siehe Abbildung 2-15). Durch eine rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung entsteht also ein Konflikt zwischen einer hohen Leistung und einer hohen Termintreue (Lödding 2016, S. 514 f.).

3.1.2 Kombinierte Reihenfolgeregeln

Die Anwendung von Reihenfolge- oder Prioritätsregeln (englisch: dispatching rules) ist insbesondere bei komplexen Materialflüssen weit verbreitet, da sie einfach sind, einen geringen Rechenaufwand erfordern und aktuelle Informationen über die Warteschlange berücksichtigen (Pickardt & Branke 2012, S. 5823).

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, verursachen reihenfolgeabhängige Rüstzeiten einen Zielkonflikt zwischen der Termintreue und der Leistung. Effektive rüstzeitoptimale Reihenfolgeregeln sollten also Rüstvorgänge vermeiden und gleichzeitig die Dringlichkeit von Aufträgen berücksichtigen. Verschiedene Autoren schlagen daher kombinierte Reihenfolgeregeln vor, die eine Reihenfolgeregel zur Erhöhung der Termintreue um reihenfolgeabhängige Rüstzeiten erweitern. Folgende Regeln gelten dabei als besonders gut im Hinblick auf die logistische Zielerreichung.

Apparent Tardiness Cost with Setups (ATCS)

Die Apparent-Tardiness-Cost-with-Setups-Regel (deutsch: scheinbare Verspätungskosten mit Rüsten) bestimmt die Priorität eines Auftrags mithilfe einer Gleichung, die sowohl den Restschlupf¹ eines Auftrags als auch die Rüstzeit aller Aufträge in der Warteschlange berücksichtigt (Lee et al. 1997, S. 46):

¹ Der Restschlupf ist dabei die verbleibende Zeit bis zum Plan-Endtermin des Arbeitsvorgangs abzüglich der Bearbeitungszeit.

Dabei erhält immer der Auftrag mit dem höchsten Index die Priorität bei der Bearbeitung. Die Regel zielt darauf ab, Verspätungen und Rüstzeiten über die Gewichtung von Restschlupf und Rüstzeit mit zwei Skalierungsfaktoren zu minimieren. Die Effektivität der Reihenfolgeregel hängt dabei allerdings stark von der Dimensionierung der Skalierungsfaktoren ab (Lee et al. 1997; Pickardt & Branke 2012).

Die Dimensionierung der Faktoren steht aufgrund ihrer Komplexität im Fokus vieler Arbeiten. Unter anderem hängen die Faktoren von den Plan-Übergangszeiten, von der Streuung der Zugangsterminabweichung sowie dem Verhältnis aus Rüst- zu Bearbeitungszeiten ab. Lee et al. ermitteln simulativ Gleichungen zur Berechnung der Faktoren, die sie jedoch selbst als nicht allgemeingültig bezeichnen (Lee et al. 1997). Aufgrund der Komplexität der Berechnung wenden andere Autoren Ansätze des maschinellen Lernens zur dynamischen Anpassung der Skalierungsfaktoren an (Heger et al. 2016; Liao 2018). Pickardt und Branke schlagen explizite Werte für die Faktoren vor: $k_1=6,0$ und $k_2=1,0$, wenn das Verhältnis von Rüst- zu Bearbeitungszeiten gering ist und $k_1=2,0$ und $k_2=0,1$ bei einem hohen Verhältnis von Rüst- zu Bearbeitungszeiten (Pickardt & Branke 2012, S. 5840).

Im Vergleich zu anderen Reihenfolgeregeln bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten wird die ATCS-Regel von vielen Autoren als besonders effektiv beurteilt, da sie sowohl den mittleren Rüstaufwand, mittlere Durchlaufzeiten und die mittlere Verspätung reduziert. Allerdings ist die Überlegenheit der Reihenfolgeregel stark von der richtigen Dimensionierung der Skalierungsfaktoren abhängig (Pickardt & Branke 2012, S. 5840; Lee et al. 1997).

Enhanced Critical Ratio (ECR)

Bei der Enhanced-Critical-Ratio-Regel (deutsch: erweitertes kritisches Verhältnis) erhält der Auftrag die höchste Priorität, dessen Bearbeitung die pünktliche Fertigstellung der anderen Aufträge am wenigsten gefährdet. Zur Ermittlung der Priorität wird für jeden Auftrag ein Szenario betrachtet, in dem der betrachtete Auftrag als nächstes und die anderen Aufträge in der Warteschlange danach bearbeitet werden. Für dieses Szenario wird dann der Quotient aus restlicher Auftragszeit und Restschlupf für alle Aufträge berechnet. Der Auftrag, bei dem die Summe der Quotienten aller Aufträge am geringsten ist, erhält die höchste Priorität. So werden Aufträge der gleichen Rüstfamilie oder Aufträge der Rüstfamilie mit der geringsten großen Rüstzeit ausgehend von der aktuellen Rüstfamilie priorisiert (Chiang & Fu 2004).

Das Hauptziel der ECR-Regel ist es, die Anzahl verspäteter Aufträge zu verringern und damit die Termineinhaltung zu erhöhen. Untersuchungen von Pickardt und Branke zeigen, dass sie bei dieser Zielgröße anderen Reihenfolgeregeln überlegen ist. Aufgrund der Logik der Regel werden einige Aufträge jedoch stark verzögert, da sie einen negativen Einfluss auf die pünktliche Fertigstellung anderer Aufträge haben. Dies führt dazu, dass die mittlere Durchlaufzeit, die mittlere Verspätung sowie der mittlere

Rüstaufwand höher sind als bei anderen Reihenfolgeregeln (Pickardt & Branke 2012, S. 5840).

3.1.3 Familienbasierte Reihenfolgeregeln

Im Gegensatz zu den kombinierten Reihenfolgeregeln folgen die familienbasierten Regeln einer Hierarchie zur Ermittlung der Prioritäten (Pickardt & Branke 2012, S. 5828). Nach Sawicki hat es sich etabliert, die Hierarchie der Reihenfolgeregeln in folgenden drei Entscheidungen zu beschreiben (Sawicki 1973):

1. Wie lange wird die aktuelle Rüstfamilie gefertigt?
2. Welche Rüstfamilie wird als nächstes gefertigt?
3. In welcher Reihenfolge werden Aufträge innerhalb einer Rüstfamilie gefertigt?

Bei der ersten Entscheidung kann grundsätzlich zwischen *erschöpfenden* (englisch: exhaustive) und *unterbrechenden* (englisch: truncated) Regeln unterschieden werden. Erschöpfende Regeln fertigen eine Rüstfamilie so lange, bis kein Auftrag dieser Rüstfamilie mehr im Bestand vorliegt. Sie werden also nur über die zweite und dritte Entscheidung definiert. Bei den unterbrechenden Regeln wird eine Logik festgelegt, nach der die Fertigung einer Rüstfamilie abgebrochen und auf die nächste umgerüstet wird. Zur Reihenfolgebildung innerhalb einer Rüstfamilie (dritte Entscheidung) können die üblichen Reihenfolgeregeln angewendet werden (siehe Abschnitt 2.3.4) (Pickardt & Branke 2012, S. 5828).

Folgende familienbasierte Reihenfolgeregeln wurden dabei als besonders gut im Hinblick auf die logistische Zielerreichung bewertet. Die Notation der Reihenfolgeregeln ist dabei über die Logik zur Entscheidung der drei Fragen festgelegt: Erste Entscheidung | Zweite Entscheidung | Dritte Entscheidung.

Class Exhaustion | Minimum Marginal Setup Time | Shortest Processing Time

Diese Reihenfolgeregel sieht eine erschöpfende Fertigung von Rüstfamilien vor. Innerhalb der Rüstfamilie werden Aufträge nach der Kürzesten-Operationszeit-Regel (englisch: shortest processing time) priorisiert. Die nächste Rüstfamilie wird über die Minimum-Marginal-Setup-Time-Regel (deutsch: minimale Grenzüstzeit) festgelegt. Es wird also die Rüstfamilie ausgewählt, für die der folgende Quotient am geringsten ist (Nomden et al. 2008):

$$MMS_i = \frac{ZR_i^+}{AnzAuf_i} \quad (3-1)$$

MMS_i Minimum Marginal Setup Time der Rüstfamilie i [Std]
ZR⁺_i große Rüstzeit der Rüstfamilie i ausgehend vom aktuellen Status des Arbeitssystems [Std]

AnzAuf_i Anzahl Aufträge der Rüstfamilie i in der Warteschlange [-]

Tendenziell wird so immer die Rüstfamilie als nächstes gefertigt, von der am meisten Aufträge in der Warteschlange vorliegen (Mayer 2018, S. 55). Aus diesem Grund eignet sich diese Reihenfolgeregel zur Reduzierung des mittleren Rüstaufwands und der mittleren Durchlaufzeiten. Allerdings haben Untersuchungen ergeben, dass die Termineinhaltung unter Anwendung dieser Reihenfolgeregel schlechter ist als bei kombinierten Regeln wie ATCS oder ECR (Pickardt & Branke 2012, S. 5840).

Class Exhaustion | Fixed Sequence | First In – First Out

Bei dieser ebenfalls erschöpfenden Reihenfolgeregel wird die nächste Rüstfamilie nach einer einmalig festgelegten Reihenfolge festgelegt. Innerhalb der Rüstfamilie werden Aufträge nach FIFO bearbeitet. Die Festlegung einer Reihenfolge der Rüstfamilien bietet den Vorteil, dass diese einmalig optimiert werden kann, falls die Rüstzeiten zwischen den Rüstfamilien auch reihenfolgeabhängig sind. Baker stellt in seinen Untersuchungen fest, dass diese Reihenfolgeregel insbesondere bei hohen Rüstzeiten zu gleichen Ergebnissen wie die KOZ-Regel führt. Sie minimiert also mittlere Durchlaufzeiten. Der Vorteil gegenüber der KOZ-Regel ist jedoch, dass diese Regel auch maximale Durchlaufzeiten minimiert und so ähnliche Ergebnisse wie eine FIFO-Reihenfolge erreicht. Bei Zielgrößen wie der Termineinhaltung führt sie daher bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten zu besseren Ergebnissen als andere Reihenfolgeregeln (Baker 1968). Der Nachteil dieser Reihenfolgeregel ist jedoch, dass die Reihenfolgeregel das Potenzial ungenutzt lässt, verspätete Aufträge zumindest innerhalb der Rüstfamilie zu beschleunigen.

Class Exhaustion | Fixed Sequence | Earliest Due Date

Diese Reihenfolgeregel erweitert die vorherige, indem sie Aufträge innerhalb der Rüstfamilie nach frühestem Plan-Endtermin priorisiert. Dies ermöglicht die Beschleunigung verspäteter Aufträge innerhalb der eigenen Rüstfamilie (Sawicki 1973).

3.2 Quantifizierung des Einflusses rüstzeitoptimaler Reihenfolgeregeln

In diesem Abschnitt sollen Modelle vorgestellt werden, die den Einfluss rüstzeitoptimaler Reihenfolgeregeln auf die logistischen Zielgrößen analytisch beschreiben. Gegliedert sind die Ansätze nach ihren Autoren, beginnend bei den ältesten Arbeiten.

3.2.1 Conway, Maxwell und Miller

In ihrem Grundlagenwerk zur Ablaufplanung untersuchen Conway, Maxwell und Miller (1967) den Einfluss einer Reihenfolgebildung, bei der abwechselnd zwei Rüstfamilien

erschöpfend gefertigt werden, auf die mittlere Durchlaufzeit und Auslastung. In ihrem Modell ist der Erwartungswert der Durchlaufzeit abhängig von den Ankunftsraten der Rüstfamilien, den Bearbeitungs- und Rüstzeiten, der Auflagedauer der Rüstfamilien sowie der Wahrscheinlichkeit von Leerzeiten des Arbeitssystems. Die Auslastung ist von der Ankunftsrate, den Rüstzeiten, der Kapazität und der Auslastung des Arbeitssystems durch die Rüstfamilien abhängig (Conway et al. 1967, S. 201-207).

Dabei untersuchen sie auch den Fall, dass beide Rüstfamilien unterschiedliche Ankunftsraten haben. Sie stellen fest, dass die mittlere Durchlaufzeit der Rüstfamilie mit der geringeren Ankunftsrate höher ist als die der anderen Rüstfamilie. Obwohl die Autoren nur den Fall mit zwei Rüstfamilien untersuchen und somit keine Entscheidung über die Reihenfolge der Rüstfamilie nötig ist, schlagen sie für eine Reihenfolgebildung mit mehr als zwei Rüstfamilien eine zyklische Reihenfolge der Rüstfamilien vor (Conway et al. 1967, S. 200).

Das Modell ist speziell auf den Fall mit zwei Rüstfamilien ausgelegt und beruht auf den Annahmen Poisson-verteilter Ankunftsraten sowie exponentialverteilter Bearbeitungs- und Rüstzeiten. Den Einfluss der rüstopimalen Reihenfolge auf Terminkennzahlen betrachten die Autoren in ihrem Modell nicht.

3.2.2 Kekre

Kekre beschreibt den Einfluss einer erschöpfenden Reihenfolgebildung, bei der sowohl Rüstfamilien als auch Aufträge innerhalb einer Rüstfamilie nach FIFO bearbeitet werden², auf die Länge einer Warteschlange. Er bedient sich dabei Modellen der Warteschlangentheorie und definiert einen Einsparungsfaktor. Dieser Einsparungsfaktor beschreibt, um welchen Faktor eine erschöpfende Reihenfolgebildung durch die Einsparung von Rüstzeiten die Warteschlange verkürzt (Kekre 1987, S. 334):

$$f = \frac{\Delta Z_{R_{ER}}}{Z_{W_{FIFO}}} \quad (3-2)$$

f	Einsparungsfaktor [-]
$\Delta Z_{R_{ER}}$	eingesparte Rüstzeiten durch die erschöpfende Reihenfolgebildung [Std]
$Z_{W_{FIFO}}$	Wartezeit bei einer FIFO-Bearbeitung der Aufträge [Std]

Eingesparte Rüstzeiten bestimmt Kekre über die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten, dass sich gleiche Aufträge in der Warteschlange befinden. Für unterschiedliche Auslastungen stellt er Kennlinien dar, die den Einfluss der Anzahl von Rüstfamilien auf

² Nach eingeführter Notation entspricht dies der familienbasierten Reihenfolgeregel Class Exhaustion | First In – First Out | First In – First Out

die Wahrscheinlichkeit von Rüstvorgängen zeigen. Dabei stellt er fest, dass mit höherer Anzahl von Rüstfamilien die Wahrscheinlichkeit von Rüstvorgängen steigt. Bei höherer Auslastung sinkt wiederum die Wahrscheinlichkeit von Rüstvorgängen (Kekre 1987, S. 334).

In Simulationsversuchen vergleicht Kekre seinen analytisch berechneten Einsparungsfaktor mit tatsächlichen Einsparungen in Simulationen. Berechnete Werte weichen dabei um 10 bis 50% von den simulierten Werten ab. Terminkennzahlen betrachtet Kekre in seinen Untersuchungen nicht (Kekre 1987, S. 335).

3.2.3 Missbauer

Missbauer analysiert den Einfluss einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung, wie sie bei Kekre angewendet wird, auf die Leistung. Dabei leitet er eine Gleichung zur Berechnung des Verhältnisses von Rüstzeit zur Bearbeitungszeit unter Anwendung von Modellen der Warteschlangentheorie her (Missbauer 1997, S. 138):

$$RB_{\text{opt}} = \frac{ZR^+ \cdot p_{\text{rüst,opt}}}{ZAU - ZR^+} \quad (3-3)$$

RB_{opt}	Verhältnis von Rüstzeit zu Bearbeitungszeit bei rüstzeitoptimaler Reihenfolgebildung [-]
ZR^+	(große) Rüstzeit [Std]
$p_{\text{rüst,opt}}$	Wahrscheinlichkeit für einen Rüstvorgang bei rüstzeitoptimaler Reihenfolgebildung [%]
ZAU	Auftragszeit [Std]

Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für Rüstvorgänge ist dabei relativ komplex, da die Wahrscheinlichkeit für einen Rüstvorgang von der Auslastung abhängt und die Auslastung aber wiederum auch von der Wahrscheinlichkeit für Rüstvorgänge. Eine Lösung ist daher nicht analytisch, sondern nur numerisch möglich. Missbauer entwickelt dabei mehrere Kennlinien, die die Zielgrößen Rüst- zu Bearbeitungszeit und Leistung über dem Bestand darstellen. Im Vergleich zu seinen Simulationsergebnissen unterschätzt Missbauers Modell die Leistung. Terminkennzahlen betrachtet er in seinem Modell nicht (Missbauer 1997).

3.2.4 Mayer

Mayer entwickelt ein Modell, bei dem erstmalig sowohl die Einflüsse rüstzeitoptimaler Reihenfolgen auf die Leistung als auch die Einflüsse auf die Terminabweichung abgebildet werden. Als Grundlage des Modells wird dabei eine erschöpfende Reihenfolgeregel angewendet, bei der die nächste Rüstfamilie über die Minimum-Marginal-Setup-

Time-Regel ausgewählt wird und innerhalb der Rüstfamilien die Aufträge nach frühestem Plan-Endtermin bearbeitet werden (Mayer 2018, S. 46).³

Produktivitätssteigerung durch rüstopoptimale Auftragsreihenfolgen

Mayer unterscheidet bei der Berechnung des Einflusses einer Rüstzeitoptimierung zwischen zwei Grenzfällen für die Anzahl der Rüstfamilien (N) und erstellt hierfür unterschiedliche Modelle. Für den Grenzfall $N \rightarrow 1$ ist seine Annahme, dass die Leistung nur durch *Rüstzeitersparnis* bei Auftragsbündelung gesteigert werden kann. Es werden also große Rüstvorgänge durch die Bündelung vermieden. Die Reduzierung großer Rüstzeiten durch die Optimierung der Reihenfolge der Rüstfamilien wird in diesem Fall nicht betrachtet. Für den Grenzfall $N \rightarrow \infty$ wird sowohl die *Rüstzeitersparnis* als auch die *Rüstzeitreduzierung* durch eine optimierte Reihenfolge der Rüstfamilien betrachtet (Mayer 2018, S. 46-48).

Produktivitätssteigerung für den Grenzfall $N \rightarrow 1$. Im Grenzfall $N \rightarrow 1$ betrachtet Mayer nur die Produktivitätssteigerungen durch Einsparung von Rüstvorgängen. Er entwickelt eine Gleichung für die Anzahl nacheinander gefertigter Aufträge einer Rüstfamilie i (Mayer 2018, S. 74):

$$k_i = \frac{2 \cdot BA_m \cdot p_i}{1 - p_i} \quad (3-4)$$

- k_i Anzahl aufeinanderfolgend bearbeiteter Aufträge der Rüstfamilie i [-]
 BA_m mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträgen) [-]
 p_i Auftretenswahrscheinlichkeit der Rüstfamilie i in einer Warteschlange [-]

Aus der Anzahl aufeinanderfolgend bearbeiteter Aufträge berechnet er einen Gesamtproduktivitätsgewinn. Dabei werden bei jeder Rüstfamilie gegenüber einer nichtoptimierten Reihenfolge $k_i - 1$ Rüstvorgänge eingespart. Es ergibt sich dann ein rüstzeitbezogener Gesamtproduktivitätsgewinn, der in Mayers Modell unabhängig von der Auftretenswahrscheinlichkeit der Rüstfamilien ist (Mayer 2018, S. 75):

$$\Delta P_{N \rightarrow 1, total}(BA_m) = 100 - \frac{N}{2 \cdot BA_m} \cdot 100 \quad (3-5)$$

- $\Delta P_{N \rightarrow 1, total}(BA_m)$ rüstzeitbezogener Gesamtproduktivitätsgewinn des Grenzfalles $N \rightarrow 1$ [%]
N Anzahl Rüstfamilien in Warteschlange [-]

³ Nach eingeführter Notation entspricht dies der familienbasierten Reihenfolgeregel Class Exhaustion | Minimum Marginal Setup Time | Earliest Operation Due Date

BA_m mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträgen) [-]

Mithilfe des berechneten Produktivitätsgewinns wird dann eine mittlere Rüstzeit bestimmt, aus der sich dann die Auftragszeit (ZAU) der Aufträge ergibt (Mayer 2018, S. 78 f.):

$$t_{rm,rüstopt,N \rightarrow 1}(BA_m) = t_{rm,nonopt} \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_{N \rightarrow 1, total}(BA_m)}{100} \right) \quad (3-6)$$

$t_{rm,rüstopt,N \rightarrow 1}(BA_m)$ mittlere Rüstzeit des Grenzfalls $N \rightarrow 1$ bei Bildung rüstoptimaler Auftragsreihenfolgen [Min]
 $t_{rm,nonopt}$ mittlere Rüstzeit bei Bildung nicht-rüstoptimaler Auftragsreihenfolgen [Min]
 $\Delta P_{N \rightarrow 1, total}(BA_m)$ rüstzeitbezogener Gesamtproduktivitätsgewinn des Grenzfalls $N \rightarrow 1$ [%]

Die mittlere Rüstzeit bei nicht-rüstoptimalen Auftragsreihenfolgen berechnet Mayer über die Wahrscheinlichkeit, dass zufällig zwei Aufträge der gleichen Rüstfamilie nacheinander gefertigt werden (Mayer 2018, S. 74 f.).

Produktivitätssteigerung für den Grenzfall $N \rightarrow \infty$. Zur Berechnung der Rüstzeiterparnis für den Grenzfall $N \rightarrow \infty$ bestimmt Mayer die Wahrscheinlichkeit, dass mehrere Aufträge einer Rüstfamilie in der Warteschlange auftreten. Wenn dies der Fall ist, wird ein Rüstvorgang eingespart. Die Produktivitätssteigerung durch Rüstzeiterparnis ergibt sich für den Grenzfall $N \rightarrow \infty$ daher als (Mayer 2018, S. 76):

$$\Delta P_{RE, N \rightarrow \infty}(BA_m) = \sum_{i=1}^n \left(100 - (1 - p_i)^{BA_m - 1} \cdot 100 \right) \cdot p_i \quad (3-7)$$

$\Delta P_{RE, N \rightarrow \infty}(BA_m)$ rüstzeitbezogener Produktivitätsgewinn des Grenzfalls $N \rightarrow \infty$ durch Rüstzeiterparnis [%]
 p_i Auftretenswahrscheinlichkeit der Rüstfamilie i in einer Warteschlange [-]
 BA_m mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträgen) [-]

Die Produktivitätssteuerung durch Rüstzeitreduzierung ergibt sich über die Optimierung der Reihenfolge der Rüstfamilien. Dafür teilt Mayer Rüstzeiten in Rüstzeitklassen auf. Jeder Rüstzeitklasse ordnet er eine Wahrscheinlichkeit zu, dass diese in der Warteschlange auftritt und eine Wahrscheinlichkeit, dass diese Rüstzeitklasse ausgewählt wird. Aus der Gewichtung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Rüstfamilie mit der Wahrscheinlichkeit, dass diese in der Warteschlange auftritt, ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Auswahlhäufigkeiten. Die Gewichtung der Rüstzeiten mit der Auswahlwahrscheinlichkeit ergibt dann eine mittlere Rüstzeit durch Rüstzeitreduzierung (Mayer 2018, S. 66-69).

Bestehende Ansätze

Die Produktivitätssteigerung durch Rüstzeitreduzierung beträgt dann (Mayer 2018, S. 69):

$$\Delta P_{RR,N \rightarrow \infty}(BA_m) = \frac{t_{rm,nonopt} - t_{rm,N \rightarrow \infty}(BA_m)}{t_{rm,nonopt}} \cdot 100 \quad (3-8)$$

$\Delta P_{RR,N \rightarrow \infty}(BA_m)$	rüstzeitbezogener Produktivitätsgewinn des Grenzfalles $N \rightarrow \infty$ durch Rüstzeitreduzierung [%]
$t_{rm,nonopt}$	mittlere Rüstzeit bei Bildung nicht-rüstoptimaler Auftragsreihenfolgen [Min]
$t_{rm,N \rightarrow \infty}(BA_m)$	mittlere Rüstzeit des Grenzfalles $N \rightarrow \infty$ durch Rüstzeitreduzierung [Min]
BA_m	mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträgen) [-]

Die Gesamtproduktivitätssteigerung ergibt sich für den Fall $N \rightarrow \infty$ dann als Summe der Produktivitätssteigerungen. Dabei reduziert sich der Anteil der Rüstzeitreduzierung um den Anteil der Rüstzeitersparnis (Mayer 2018, S. 69 f.):

$$\Delta P_{N \rightarrow \infty, total}(BA_m) = \Delta P_{RE,N \rightarrow \infty}(BA_m) + \frac{100 - \Delta P_{RE,N \rightarrow \infty}(BA_m)}{100} \cdot \Delta P_{RR,N \rightarrow \infty}(BA_m) \quad (3-9)$$

$\Delta P_{N \rightarrow \infty, total}(BA_m)$	rüstzeitbezogener Gesamtproduktivitätsgewinn des Grenzfalles $N \rightarrow \infty$ [%]
$\Delta P_{RE,N \rightarrow \infty}(BA_m)$	rüstzeitbezogener Produktivitätsgewinn des Grenzfalles $N \rightarrow \infty$ durch Rüstzeitersparnis [%]
$\Delta P_{RR,N \rightarrow \infty}(BA_m)$	rüstzeitbezogener Produktivitätsgewinn des Grenzfalles $N \rightarrow \infty$ durch Rüstzeitreduzierung [%]

Analog zum Grenzfall $N \rightarrow 1$ bestimmt Mayer eine Rüstzeit mithilfe des berechneten Produktivitätsgewinns, aus der sich dann die Auftragszeit (ZAU) der Aufträge ergibt (Mayer 2018, S. 79):

$$t_{rm,rüstopt,N \rightarrow \infty}(BA_m) = t_{rm,nonopt} \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_{N \rightarrow \infty, total}(BA_m)}{100} \right) \quad (3-10)$$

$t_{rm,rüstopt,N \rightarrow \infty}(BA_m)$	mittlere Rüstzeit des Grenzfalles $N \rightarrow \infty$ bei Bildung rüstoptimaler Auftragsreihenfolgen [Min]
$t_{rm,nonopt}$	mittlere Rüstzeit bei Bildung nicht-rüstoptimaler Auftragsreihenfolgen [Min]
$\Delta P_{N \rightarrow \infty, total}(BA_m)$	rüstzeitbezogener Gesamtproduktivitätsgewinn des Grenzfalles $N \rightarrow \infty$ [%]

Terminabweichungsverhalten durch rüstoptimale Auftragsreihenfolgen

Mayer unterscheidet auch beim Terminabweichungsverhalten in seinem Modell zwischen den zwei Grenzfällen $N \rightarrow 1$ und $N \rightarrow \infty$. Dabei modelliert er jeweils den Einfluss

der Rüstoptimierung auf die reihenfolgebedingte Abgangsterminabweichung (vgl. Abschnitt 2.2.6). Da jede Beschleunigung eines Auftrags die Verzögerung eines anderen Auftrags verursacht, ist der Mittelwert der reihenfolgebedingten Abgangsterminabweichung in Anzahl Aufträgen null. Um ihre Streuung zu bewerten, untersucht Mayer die Standardabweichung der reihenfolgebedingten Abgangsterminabweichung (Mayer 2018, S. 87 f.).

Terminabweichungsverhalten für den Grenzfall $N \rightarrow 1$. Im Grenzfall mit nur einer Rüstfamilie werden keine Vertauschungen zur Rüstzeitoptimierung vorgenommen. Es ergibt sich damit der Fall mit einer FIFO-Bearbeitung, sodass die Abgangsterminabweichung der Zugangsterminabweichung entspricht:

$$TAA_{rf,s,N \rightarrow 1} = TAZ_{rf,s} \quad (3-11)$$

$TAA_{rf,s,N \rightarrow 1}$ Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Abgang für den Grenzfall $N \rightarrow 1$ [BKT]
 $TAZ_{rf,s}$ Standardabweichung der reihenfolgebedingten Terminabweichung im Zugang [BKT]

Terminabweichungsverhalten für den Grenzfall $N \rightarrow \infty$. Das Modell für den Grenzfall $N \rightarrow \infty$ basiert im Wesentlichen auf dem Modell von Bertsch et al. (2014). Die Grundannahme ist dabei, dass die Bildung rüstoptimaler Auftragsreihenfolgen den gleichen Einfluss auf das Terminabweichungsverhalten hat wie eine zufällige Reihenfolgebildung und somit einer geometrischen Verteilung folgt (Bertsch et al. 2014, S. 431).

Bei einer zufälligen Reihenfolgebildung beträgt die Wahrscheinlichkeit (p), dass ein Auftrag aus dem Bestand (BA_m) ausgewählt wird $p = 1/BA_m$, sodass sich folgende Gleichung für die Standardabweichung der relativen Terminabweichung ergibt (Mayer 2018, S. 92):

$$TAR_{rf,s} = \frac{BA_m}{LA_m} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{BA_m}} \quad (3-12)$$

$TAR_{rf,s}$ Standardabweichung der reihenfolgebedingten relativen Terminabweichung [BKT]
 BA_m mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträgen) [-]
 LA_m mittlere Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [-/BKT]

Die Standardabweichung der Abgangsterminabweichung ergibt sich aus der Wurzel der Summe der Varianzen (quadrierte Standardabweichung) der Zugangsterminabweichung und der relativen Terminabweichung (Mayer 2018, S. 93):

$$TAA_{rf,s} = \sqrt{(TAZ_{rf,s})^2 + \left(\frac{BA_m}{LA_m} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{BA_m}}\right)^2} \quad (3-13)$$

$TAA_{rf,s}$	Standardabweichung
$TAR_{rf,s}$	Standardabweichung der reihenfolgebedingten relativen Terminabweichung [BKT]
BA_m	mittlerer Bestand (in Anzahl Aufträgen) [-]
LA_m	mittlere Leistung (in Anzahl Aufträgen pro BKT) [-/BKT]

Mayer beschreibt mit seinem Modell den Zielkonflikt zwischen der Leistungssteigerung durch rüstoptimale Reihenfolgen sowie deren Einfluss auf die relative Terminabweichung. Das Modell liefert für den Grenzfall $N \rightarrow 1$ nach seinen Untersuchungen bis zu einer Anzahl von 5 Rüstfamilien verlässliche Ergebnisse. Für den Grenzfall $N \rightarrow \infty$ ist das Modell ab 15 Rüstfamilien valide. Im Intervall von 6 bis 14 Rüstfamilien weicht das Modell signifikant von den Simulationsergebnissen ab. Kleine Rüstzeiten, die zwischen Aufträgen der gleichen Rüstfamilie anfallen, betrachtet Mayer in seinem Modell nicht. Bei hohen Beständen weist Mayers Modellierung der reihenfolgebedingten Abgangsterminabweichungsstreuung abhängig von der Anzahl der Rüstfamilien zum Teil relevante Abweichungen von den Simulationsergebnissen auf (Mayer 2018).

3.3 Fazit zum bestehenden Forschungsbedarf

Zuvor beschriebene Ansätze leisten auf unterschiedliche Arten einen Beitrag zur Theorie. Ein Teil der Autoren entwickelt Verfahren zur rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung und untersucht ihren Einfluss auf die logistischen Zielgrößen in Simulationsstudien (vgl. Abschnitt 3.1). Andere Autoren entwickeln Modelle zur analytischen Beschreibung des Einflusses rüstzeitoptimaler Reihenfolgeregeln auf logistische Zielgrößen (vgl. Abschnitt 3.2).

Simulationsstudien können die Überlegenheit einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgeregeln nur im Vergleich zu anderen, in der gleichen Studie untersuchten Reihenfolgeregeln feststellen. Diese Studien helfen zwar dabei, eine tendenziell sinnvolle rüstzeitoptimale Reihenfolgeregeln zu identifizieren. Sie sind jedoch nicht allgemeingültig, da es vom simulierten Produktionsszenario abhängt, wie gut eine Reihenfolgeregeln die Ziele der Reihenfolgebildung erfüllt. Allen Simulationsstudien ist gemein, dass sie keine Möglichkeit zur Prognose der Zielgrößen geben, da ihre Ergebnisse auf ex-post-Analysen beruhen. Sie eignen sich daher nicht für eine systematische Produktionsplanung und -steuerung, da weder der Kapazitätsbedarf noch die Durchlaufzeiten quantifiziert werden können. Unternehmen können sich also weder im Zielkonflikt positionieren, noch können sie eine verlässliche Terminierung durchführen.

Bestehende mathematische Modelle, die den Einfluss rüstzeitoptimaler Reihenfolgeregeln auf logistische Zielgrößen beschreiben, bieten erste Ansätze für eine systematische Produktionsplanung und -steuerung mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten.

Modelle von Conway et al. (1967), Kekre (1987) und Missbauer (1997) betrachten dabei nur den Einfluss einer Rüstzeitoptimierung auf die Produktivität bzw. Auslastung, sodass die Betrachtung des Zielkonflikts mit der Termintreue ausbleibt. Die Modelle gehen zudem von konstanten Rüstzeiten aus und betrachten keine Reihenfolgeabhängigkeit zwischen Rüstfamilien, sodass sie nicht allgemeingültig sind. Allen zuvor genannten Modellen ist gemein, dass sie Poisson-verteilte Ankunftsraten und exponentialverteilte Bearbeitungszeiten annehmen, was das Verhalten einer Fertigung in der Regel nicht realistisch abbildet. Das Modell von Mayer (2018) beschreibt erstmals den Zielkonflikt zwischen Leistung bzw. Produktivität und Termintreue, der durch eine rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung verursacht wird. Für ein Arbeitssystem, das zwischen 6 und 14 Rüstfamilien fertigt, liefert das Modell allerdings keine validen Ergebnisse für die Produktivitätssteigerungen. Abhängig von der Anzahl der Rüstfamilien weist das Modell für hohe Bestandsniveaus zum Teil relevante Abweichungen für die Streuung der reihenfolgebedingten Terminabweichung auf. Somit fehlt auch diesem Modell die Allgemeingültigkeit.

Neben der fehlenden Allgemeingültigkeit berücksichtigt keines der bestehenden Modelle eine Rüstzeitmatrix mit deterministischen großen und kleinen Rüstzeiten. Dadurch fehlt auch die Möglichkeit, die Reihenfolge der Rüstfamilien zu optimieren. Die mathematischen Modelle sind zudem relativ komplex, was den Transfer in die Praxis erschwert. Die Berechnung könnte zwar automatisiert erfolgen, um die Fehleranfälligkeit zu reduzieren. Jedoch vertrauen die Praktiker den Modellen weniger, wenn sie diese nicht nachvollziehen können.

Bislang existieren keine Leitlinien zur Auslegung einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung. Unternehmen stehen also weiterhin vor der Herausforderung, sich im Zielkonflikt zwischen einer hohen Leistung und hoher Termintreue zu positionieren.

4 Modellierung

Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten sind eine Herausforderung für die Produktionsplanung und -steuerung. Neben dem bereits bestehenden Dilemma der Ablaufplanung verursachen sie einen weiteren Zielkonflikt zwischen einer hohen Leistung und einer hohen Termintreue. Bestehenden Ansätzen fehlt es bislang insbesondere an Allgemeingültigkeit. Dieses Kapitel stellt ein Modell vor, das den Einfluss rüstzeitoptimaler Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen Leistung und Durchlaufzeit beschreibt.

Abschnitt 4.1 leitet dafür zunächst die Anforderungen an das Modell aus den identifizierten Forschungsdefiziten her. Der Einfluss einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen ist stark von der angewandten Reihenfolgeregel abhängig. Abschnitt 4.2 führt daher die dem Modell zugrundeliegende Rüstzyklusbildung ein. Das Modell zur Beschreibung des Einflusses der Rüstzyklusbildung auf die Leistung und Durchlaufzeit wird in den darauf folgenden Abschnitten 4.3 und 4.4 vorgestellt. Abschnitt 4.5 zeigt den Einfluss einer Reihenfolgebildung, die eine Erweiterung der Rüstzyklusbildung ist, auf die logistischen Zielgrößen. Das Kapitel schließt mit einem Fazit.

4.1 Anforderungen an die Modellierung

Die Anforderungen an die Modellierung leiten sich aus den in Abschnitt 3.3 vorgestellten Defiziten bestehender Ansätze sowie aus den von Oertli-Cajacob und Wiendahl vorgestellten Anforderungen an Systeme des Produktionscontrollings her (Oertli-Cajacob 1977, S. 17 f.; Wiendahl 1996, S. 18/33). In Kapitel 8 wird geprüft, ob und wie weit das in dieser Arbeit entwickelte Konzept diese Anforderungen erfüllt.

Allgemeingültigkeit. Die Gültigkeit des Modells sollte nicht durch Annahmen eingeschränkt werden. Dies kann z. B. Annahmen über den Ankunfts- und Abarbeitungsprozess am Arbeitssystem betreffen sowie Annahmen über die Auftragszeitstruktur oder die Rüstzeiten. Je weniger Annahmen zur Gültigkeit des Modells getroffen werden müssen, desto robuster ist die Modellierung.

Die Allgemeingültigkeit setzt auch die Vollständigkeit des Modells voraus. Das Modell soll alle relevanten Einflussgrößen berücksichtigen, um deren Einfluss auf die logistischen Zielgrößen abzubilden.

Prozess- und Ressourcenorientierung. Das Modell soll sowohl den Einfluss rüstzeitoptimaler Reihenfolgebildung auf das Arbeitssystem als auch den Einfluss auf die Aufträge beschreiben. Für das Arbeitssystem ist es wichtig, den Zusammenhang zwischen Bestand und Leistung zu beschreiben. Aus Auftragsicht muss das Modell den Zusammenhang zwischen Bestand und Durchlaufzeit abbilden können.

Datenverfügbarkeit. Eingangsgrößen des Modells sollten nur Daten sein, die üblicherweise zur Produktionsplanung und -steuerung verfügbar sind.

Möglichkeit zur hierarchischen Verdichtung. Das Modell soll eine Verdichtung der Daten aus Prozess- und Ressourcensicht ermöglichen. Aus Ressourcensicht soll es möglich sein, das Modell auf Ebene des Arbeitsplatzes, des Arbeitssystems, des Fertigungsbereichs und der gesamten Fertigung zu betrachten. Aus Prozesssicht soll die Möglichkeit bestehen, Arbeitsvorgänge, Fertigungsaufträge, Beschaffungsaufträge und Kundenaufträge abzubilden.

Quantifizierbarkeit. Das Modell soll die logistischen Zusammenhänge quantifizieren können. Der Einfluss einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die Leistung und die Durchlaufzeit soll mithilfe von Gleichungen berechnet werden können.

Visualisierbarkeit. Die Modellierungsergebnisse sollen mithilfe von Grafiken visualisiert werden können.

Zielorientierung. Der Fokus des Modells soll darauf liegen, die logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit, Leistung und Termintreue zu beschreiben.

Klarheit und Verständlichkeit. Das Modell soll ohne tiefergehendes Vorwissen verständlich und nachvollziehbar sein. Eine hohe Verständlichkeit fördert eine hohe Akzeptanz und Verbreitung des Modells in Theorie und Praxis.

Relevanz. Das Modell soll eine praktische Relevanz haben. Es ist daher wichtig, dass die dem Modell zugrundeliegende rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung einerseits eine hohe logistische Zielerreichung gewährleistet und andererseits praktisch umsetzbar ist.

Genauigkeit. Das Modell soll den Einfluss einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen möglichst genau prognostizieren können.⁴

4.2 Rüstzyklusbildung

Grundsätzlich ist der Einfluss reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten stark davon abhängig, welche rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung angewendet wird. Es ist daher essenziell, zunächst eine sinnvolle Reihenfolgebildung zu definieren, die das entwickelte Modell

⁴ Die Anforderung an die Genauigkeit wird von den Autoren nicht explizit erwähnt, leitet sich jedoch aus der Quantifizierbarkeit ab.

abbildet. Dieser Abschnitt führt daher die angewandte Reihenfolgebildung ein (Abschnitt 4.2.1) und definiert ihre relevanten Parameter (Abschnitt 4.2.2).

4.2.1 Einführung

Grundlage des Modells ist eine familienbasierte Reihenfolgeregel mit erschöpfender Fertigung der Rüstfamilien, einer festgelegten Reihenfolge der Rüstfamilien (Rüstzyklus) und einer Priorisierung der Aufträge innerhalb der Rüstfamilien nach frühestem Plan-Endtermin des Arbeitsvorgangs. Liegt kein Auftrag der nächsten Rüstfamilie vor, wird diese übersprungen. Nach eingeführter Notation entspricht dies folgender Logik: Erschöpfend | Rüstzyklus | Frühester Plan-Endtermin des Arbeitsvorgangs. Im Folgenden wird diese Reihenfolgeregel kurz als Rüstzyklusbildung bezeichnet. Folgende Gründe unterstützen dieses Vorgehen:

1. Eine erschöpfende Fertigung der Rüstfamilien kann die maximale Anzahl an großen Rüstvorgängen einsparen.
2. Der Rüstzyklus ermöglicht es zum einen, analog zum Traveling-Salesman-Problem eine optimale Reihenfolge der Rüstfamilien zu bestimmen. Zum anderen sind zur Reihenfolgebildung an der Maschine keine weiteren Algorithmen erforderlich.
3. Die maximale Terminabweichung, die Rüstzyklen verursachen, kann leicht modelliert werden (siehe Abschnitt 4.4).
4. Die Priorisierung der Aufträge innerhalb einer Rüstfamilie nach Plan-Endtermin des Arbeitsvorgangs verhindert, dass die Rüstzyklusbildung Aufträge stärker verzögert als nötig.
5. Die Vorgehensweise ist einfach und in der Werkstatt leicht anwendbar.

4.2.2 Parameter

Abbildung 4-1 zeigt ein charakteristisches Durchlaufdiagramm bei Rüstzyklusbildung an einem Arbeitssystem mit drei Rüstfamilien. An diesem Durchlaufdiagramm lassen sich für das Modell wichtige Größen erklären.

In dem dargestellten Beispiel ist die Reihenfolge der Rüstfamilien A-B-C. Die Parameter der Rüstzyklusbildung können dabei entweder in Zeiteinheiten (X-Achse) oder aber in der Einheit Anzahl Aufträge (Y-Achse) beschrieben werden.

Die *Auflagemenge* entspricht der Anzahl Aufträge einer Rüstfamilie, die nacheinander gefertigt werden. Die *Rüstzykluslänge* ergibt sich aus der Summe aller Aufmengen innerhalb eines Rüstzyklus und beschreibt damit, wie viele Aufträge in einem Rüstzyklus bearbeitet werden. Die *Auflagedauer* ist definiert als die Zeit, die benötigt wird, um eine Rüstfamilie zu fertigen. Die Summe der Auflagedauern ergibt die *Rüstzyklusbearbeitungsdauer* in Betriebskalendertagen.

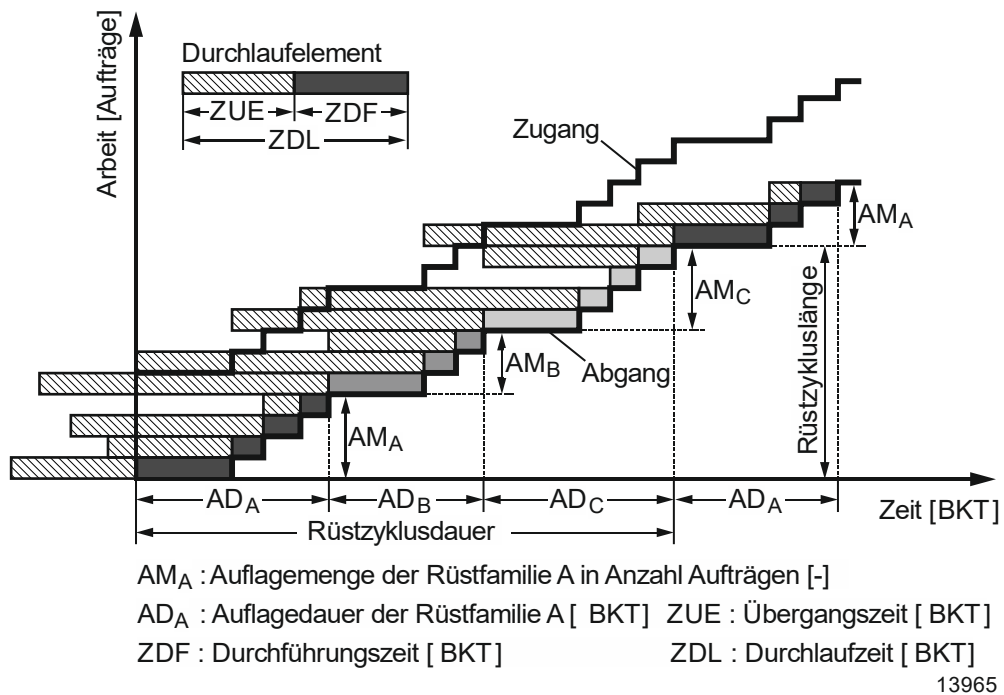


Abbildung 4-1. Charakteristisches Durchlaufdiagramm bei Rüstzyklusbildung

An diesem Durchlaufdiagramm lassen sich bereits einige grundlegende Effekte der Rüstzyklusbildung erkennen, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden sollen:

1. Die Auflagedauer steigt nicht proportional mit der Anzahl nacheinander gefertigter Aufträge. Die Durchführungszeit des ersten Auftrags ist signifikant höher als die der folgenden Aufträge.
2. Die Durchlaufzeiten der Aufträge unterscheiden sich stark. Einige Aufträge werden direkt nach ihrer Ankunft bearbeitet. Andere warten lange auf ihre Bearbeitung.
3. Die Auflagemengen und -dauern unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Rüstfamilien.
4. Die Auflagemengen und -dauern unterscheiden sich für ein und dieselbe Rüstfamilie zwischen den Rüstzyklen (siehe Rüstfamilie A).

4.3 Modellierung der Leistung

Die Rüstzyklusbildung steigert die Leistung durch die Vermeidung von Rüstvorgängen und durch die Bildung einer sinnvollen Reihenfolge der Rüstfamilien. Um die Leistung genau quantifizieren zu können, muss allerdings bekannt sein, wie viele Rüstvorgänge

vermieden werden. Dieser Abschnitt stellt einen Ansatz vor, der die Prognose der eingesparten Rüstaufwände und somit der Leistung einfach ermöglicht.⁵ Das Vorgehen gliedert sich dabei in vier Schritte: Im ersten Schritt wird untersucht, wie groß das Potenzial der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung ist, die Leistung zu steigern (Abschnitt 4.3.1). Im zweiten Schritt wird ein Modell vorgestellt, das prognostiziert, wie viele Aufträge bei der Rüstzyklusbildung gebündelt werden können (Abschnitt 4.3.2). Der dritte Schritt zeigt, wie sich aus der Anzahl gebündelter Aufträge die Leistungssteigerung berechnen lässt (Abschnitt 4.3.3). Der vierte Schritt stellt dar, wie das Modell in die Kennlinientheorie integriert wird (Abschnitt 4.3.4). Ein durchgängiges Beispiel mit einem Arbeitssystem, das drei Rüstfamilien fertigt, veranschaulicht das Vorgehen. Abschnitt 4.3.5 erläutert Effekte, die zu einer Abweichung der Realität von der Modellierung führen können.

4.3.1 Bestimmung des Leistungssteigerungspotenzials

Ausgangspunkt für die Untersuchung von reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten ist die Rüstzeitmatrix. Abbildung 4-2 zeigt die Rüstzeitmatrix für ein Beispiel mit drei Rüstfamilien.

Wechsel von nach	A	B	C
A	0,3	2,0	3,7
B	2,6	0,2	1,7
C	3,0	2,5	0,1

13966

Abbildung 4-2. Rüstzeitmatrix (Rüstzeiten in Stunden)

Eine optimale Bearbeitungsreihenfolge der Familien (Rüstzyklus) ist in diesem Fall A-B-C. Die Summe der großen Rüstzeiten im Rüstzyklus beträgt somit $2,0+1,7+3,0=6,7$ Stunden.

Die Rüstzyklusbildung erhöht die Produktivität bzw. Leistung eines Arbeitssystems durch die Vermeidung großer Rüstvorgänge. Zur Ermittlung der prozentualen Leistungssteigerung wird zunächst berechnet, wie lange die Bearbeitung der Aufträge im

⁵ Teile des Abschnitts zur Bestimmung des Leistungssteigerungspotenzials wurden bereits in Engehausen & Lödding (2017b) veröffentlicht.

schlechtestmöglichen Fall dauert. In diesem Fall wäre vor jedem Auftrag ein großer Rüstvorgang erforderlich. Die mittlere Auftragszeit eines Auftrags einer Rüstfamilie i entspricht dann:

$$ZAU_{m,i} = ZR_{i-1,i}^+ + ZBA_{m,i} \quad (4-1)$$

$ZAU_{m,i}$	mittlere Auftragszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i bei großem Rüstvorgang [Std]
$ZR_{i-1,i}^+$	große Rüstzeit von der zuvor bearbeiteten Rüstfamilie $(i-1)$ zur Rüstfamilie i gemäß dem Rüstzyklus [Std]
$ZBA_{m,i}$	mittlere Bearbeitungszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i [Std]

Der Unterschied zwischen der schlechtesten und der rüstzeitoptimierten Reihenfolge ergibt sich aus den vermiedenen großen Rüstvorgängen. Die Anzahl vermiedener großer Rüstvorgänge hängt davon ab, wie viele Aufträge einer Rüstfamilie direkt nacheinander gefertigt werden. Diese Anzahl gebündelter Aufträge wird als Auflagemenge (AM) bezeichnet (vgl. Abschnitt 4.2.2). Es fallen also je Rüstfamilie ein großer Rüstvorgang und $AM-1$ kleine Rüstvorgänge an. Im Vergleich zum schlechtestmöglichen Fall, bei dem jeder Auftrag einen großen Rüstvorgang erfordert, entsprechen die eingesparten Rüstaufwände einer Rüstfamilie i also:

$$\Delta Rüst_i = (AM_i - 1) \cdot (ZR_{i-1,i}^+ - ZR_i^-) = (AM_i - 1) \cdot \Delta ZR_i \quad (4-2)$$

$\Delta Rüst_i$	eingesparte Rüstaufwände der Rüstfamilie i [Std]
AM_i	Auflagemenge der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
$ZR_{i-1,i}^+$	große Rüstzeit von der zuvor bearbeiteten Rüstfamilie $(i-1)$ zur Rüstfamilie i gemäß dem Rüstzyklus [Std]
ZR_i^-	kleine Rüstzeit der Rüstfamilie i [Std]
ΔZR_i	Rüstzeitdifferenz der Rüstfamilie i [Std]

Das Verhältnis der Auftragszeiten des schlechtestmöglichen Falls zu den Auftragszeiten für den rüstzeitoptimierten Fall definiert die Leistungssteigerung. Die folgende Gleichung beschreibt das Leistungssteigerungspotenzial je Rüstfamilie:

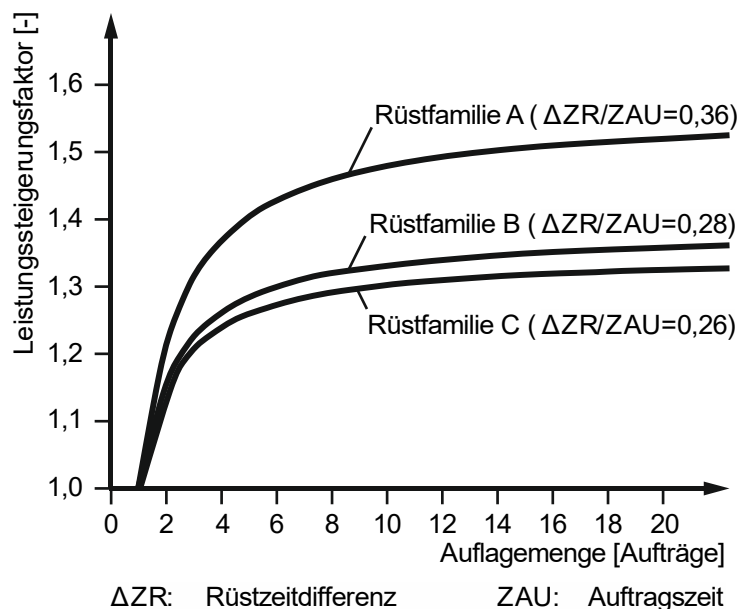
$$LSF_i = \frac{ZAU_{m,i} \cdot AM_i}{ZAU_{m,i} \cdot AM_i - \Delta Rüst_i} \quad (4-3)$$

LSF_i	Leistungssteigerungsfaktor der Rüstfamilie i [-]
$ZAU_{m,i}$	mittlere Auftragszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i bei großem Rüstvorgang [Std]
AM_i	Auflagemenge der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
$\Delta Rüst_i$	eingesparte Rüstaufwände der Rüstfamilie i [Std]

Zwei Parameter beeinflussen nach dieser Definition die Leistungssteigerung: die Auflagemenge und das Verhältnis aus Rüstzeitdifferenz zur Auftragszeit. Die Rüstzeitdif-

ferenz beschreibt dabei die Differenz zwischen großer und kleiner Rüstzeit. Die Auftragszeit wird mit großen Rüstzeiten gemäß Gleichung 4-1 festgelegt. Abbildung 4-3 zeigt, wie die Auftragsmenge und der Quotient aus Rüstzeitdifferenz und Auftragszeit den Leistungssteigerungsfaktor beeinflussen.

Unter der Annahme einer mittleren Bearbeitungszeit von $ZBA_m = 4,5$ Stunden für alle drei Rüstfamilien und den Rüstzeiten gemäß obiger Rüstzeitmatrix (Abbildung 4-2) ergibt sich für Rüstfamilie A ein Quotient von 0,36, für Familie B von 0,28 und für Rüstfamilie C von 0,26. Wird ein Leistungssteigerungsfaktor von 1,5 erreicht, ist es möglich, die Leistung um 50% zu steigern. Bei einer Kapazität von 8 Stunden pro Betriebskalendertag kann ein Arbeitssystem also Aufträge mit einer Auftragszeit von 12 Stunden produzieren. Grundsätzlich gilt: Je höher der Unterschied zwischen großen und kleinen Rüstzeiten im Vergleich zur Auftragszeit ist, desto höher ist auch das Potenzial einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung.



13967

Abbildung 4-3. Leistungssteigerungsfaktor je Rüstfamilie in Abhängigkeit der Auftragsmengen

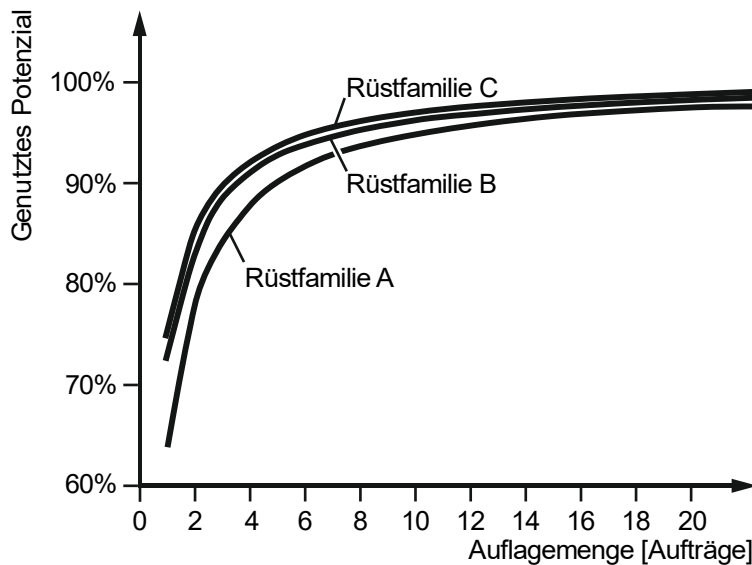
Abbildung 4-3 zeigt jedoch auch, dass die Leistungssteigerung unabhängig vom Potenzial degressiv verläuft und sich einem Maximalwert annähert. Dieser Wert ist durch einen Prozess ohne große Rüstvorgänge bestimmt:

$$LSF_{\max} = \lim_{AM_i \rightarrow \infty} LSF(AM_i) = \frac{ZAU_{m,i}}{ZAU_{m,i} - \Delta ZR_i} \quad (4-4)$$

LSF_{\max}	maximaler Leistungssteigerungsfaktor [-]
LSF	Leistungssteigerungsfaktor [-]
AM_i	Auftragsmenge der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]

$ZAU_{m,i}$	mittlere Auftragszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i bei großem Rüstvorgang [Std]
ΔZR_i	Rüstzeitdifferenz der Rüstfamilie i [Std]

Das Verhältnis des tatsächlich erreichten Leistungssteigerungsfaktors zum Maximalwert entspricht dem genutzten Potenzial einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung. Abbildung 4-4 stellt den Verlauf des Potenzials über der Auflagemenge für die drei Rüstfamilien dar.



13968

Abbildung 4-4. Genutztes Potenzial der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung

Im Beispiel werden die größten Effekte im Bereich bis zu einer Auflagemenge von 10 Aufträgen erreicht. Mit Hilfe obiger Gleichungen können Unternehmen das Potenzial einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung anhand von Produktionsparametern bewerten.

Die Auflagemenge einer Rüstfamilie ist dabei jedoch nicht direkt steuerbar. Sie ergibt sich aus der Länge und der Zusammensetzung der Warteschlange vor dem Arbeitssystem. So kann eine Rüstfamilie ein hohes Potenzial zur Leistungssteigerung aufweisen. Wird sie nur selten gefertigt, so kann dieses Potenzial nicht genutzt werden. Das folgende Modell erklärt daher, bei welchem Bestand welche Auflagemenge zu erwarten ist.

4.3.2 Bestimmung der Auflagemenge

Die Leistung hängt im Wesentlichen davon ab, wie viele Rüstvorgänge eine rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung vermeiden kann. Um ein angemessenes Bestandsniveau für Arbeitssysteme mit Rüstzyklen festzulegen zu können, muss daher der Zusam-

menhang zwischen Bestand und Auflagemenge bekannt sein. Das im Folgenden eingeführte Modell soll diesen Zusammenhang verdeutlichen. Dabei liegt dem Modell eine wesentliche Annahme zugrunde: Jede Rüstfamilie wird genau einmal pro Rüstzyklus aufgelegt.

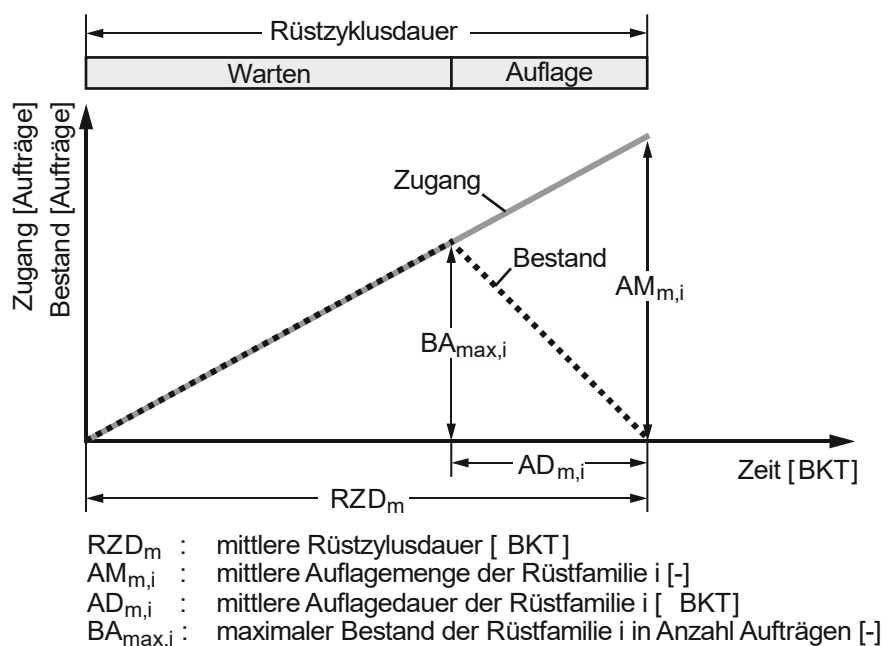
Unter dieser Annahme ist die mittlere Auflagemenge einer Rüstfamilie proportional zur mittleren Länge des Rüstzyklus:

$$AM_{m,i} = p_i \cdot RZL_m \quad (4-5)$$

$AM_{m,i}$ mittlere Auflagemenge der Rüstfamilie i [-]
 p_i Anteil der Rüstfamilie i [-]
 RZL_m mittlere Rüstzykluslänge [-]

Dieser Zusammenhang gilt aufgrund des Gesetzes der großen Zahlen (Khintchine 1927). Nach diesem Gesetz können zwar die einzelnen Rüstzykluslängen nicht genau vorhergesagt werden. Allerdings konvergiert der Mittelwert über einen langen Zeitraum gegen den mit der Gleichung 4-5 berechneten Wert.

Das Modell ermöglicht es, den Zusammenhang zwischen der Auflagemenge und dem Bestand zu beschreiben. Abbildung 4-5 zeigt dazu den idealisierten Bestandsverlauf einer Rüstfamilie über einen Rüstzyklus.



13969

Abbildung 4-5. Bestandsverlauf einer Rüstfamilie (in Anlehnung an Nyhuis & Mayer (2017, S. 423))

Grundsätzlich lassen sich für jede Rüstfamilie zwei Zeitabschnitten unterscheiden: Warten und Auflage. Während des Wartens sammeln sich Aufträge einer Rüstfamilie im Bestand an. Zum Zeitpunkt der Auflage erreicht die Anzahl an Aufträgen dieser

Rüstfamilie ihr Maximum. Bei der erschöpfenden Fertigung werden Aufträge einer Rüstfamilie dann solange gefertigt, bis der Bestand Null ist. Anschließend beginnt erneut der Zeitabschnitt „Warten“. Die Auflagemenge entspricht der Summe aus dem Bestand zu Beginn der Auflage und den Aufträgen, die während der Auflage der Rüstfamilie dem Arbeitssystem zugehen.

Während die Rüstzykluslänge beschreibt, wie viele Aufträge während eines durchschnittlichen Rüstzyklus bearbeitet werden, bezeichnet die Rüstzyklusdauer die Zeit, die zur Bearbeitung dieser Aufträge nötig ist. Analog dazu ist die mittlere Auflagedauer die Bearbeitungszeit einer Rüstfamilie, sodass $p_{AD,i}$ den Anteil der Bearbeitungszeit einer Rüstfamilie an der Rüstzyklusdauer beschreibt:

$$p_{AD,i} = \frac{AD_{m,i}}{RZD_m} \Leftrightarrow AD_{m,i} = p_{AD,i} \cdot RZD_m \quad (4-6)$$

$p_{AD,i}$ Anteil der Auflagedauer der Rüstfamilie i an der Rüstzyklusdauer [-]
 RZD_m mittlere Rüstzyklusdauer [BKT]
 $AD_{m,i}$ mittlere Auflagedauer der Rüstfamilie i [BKT]

Aus der idealisierten Darstellung des Bestandsverlaufs aus Abbildung 4-5 ergibt sich mit dem 2. Strahlensatz der Zusammenhang zwischen der mittleren Auflagemenge und dem maximalen Bestand:

$$\frac{BA_{max,i}}{AM_{m,i}} = \frac{RZD_m - AD_{m,i}}{RZD_m} \Leftrightarrow BA_{max,i} = \frac{RZD_m - AD_{m,i}}{RZD_m} \cdot AM_{m,i} \quad (4-7)$$

$BA_{max,i}$ maximaler Bestand der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
 $AM_{m,i}$ mittlere Auflagemenge der Rüstfamilie i [-]
 RZD_m mittlere Rüstzyklusdauer [BKT]
 $AD_{m,i}$ mittlere Auflagedauer der Rüstfamilie i [BKT]

Diese Gleichung kann durch Ersetzen der Auflagemenge (Gleichung 4-5) und der Auflagedauer (Gleichung 4-6) wie folgt vereinfacht werden:

$$BA_{max,i} = \frac{RZD_m - p_{AD,i} \cdot RZD_m}{RZD_m} \cdot p_i \cdot RZL_m = (1 - p_{AD,i}) \cdot p_i \cdot RZL_m \quad (4-8)$$

$BA_{max,i}$ maximaler Bestand der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
 $p_{AD,i}$ Anteil der Auflagedauer der Rüstfamilie i an der Rüstzyklusdauer [-]
 RZD_m mittlere Rüstzyklusdauer [BKT]
 p_i Anteil der Rüstfamilie i [-]
 RZL_m mittlere Rüstzykluslänge [-]

Annahme ist, dass der mittlere Bestand einer Rüstfamilie dem halben maximalen Bestand entspricht, also gilt für den mittleren Bestand (Nyhuis & Mayer 2017, S. 423):

$$BA_{m,i} = \frac{1}{2} \cdot BA_{\max,i} = \frac{1}{2} \cdot (1 - p_{AD,i}) \cdot p_i \cdot RZL_m \quad (4-9)$$

$BA_{\max,i}$	maximaler Bestand der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
$BA_{m,i}$	mittlerer Bestand der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
$p_{AD,i}$	Anteil der Auflagedauer der Rüstfamilie i an der Rüstzyklusdauer [-]
p_i	Anteil der Rüstfamilie i [-]
RZL_m	mittlere Rüstzykluslänge [-]

Der Bestand am Arbeitssystem entspricht der Summe der Bestände aller Rüstfamilien. Für den Zusammenhang zwischen dem mittleren Bestand und der mittleren Rüstzykluslänge am Arbeitssystem ergibt sich also:

$$BA_m = \sum_{i=1}^n BA_{m,i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot (1 - p_{AD,i}) \cdot p_i \cdot RZL_m \quad (4-10)$$

BA_m	mittlerer Bestand in Anzahl Aufträgen [-]
$BA_{m,i}$	mittlerer Bestand der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
$p_{AD,i}$	Anteil der Auflagedauer der Rüstfamilie i an der Rüstzyklusdauer [-]
p_i	Anteil der Rüstfamilie i [-]
RZL_m	mittlere Rüstzykluslänge [-]
n	Anzahl Rüstfamilien [-]

Durch Auflösen dieser Gleichung nach der Rüstzykluslänge ergibt sich die Gleichung für die bestandsbedingte Rüstzykluslänge:

$$RZL_m(BA_m) = BA_m \cdot \frac{2}{\sum_{i=1}^n (1 - p_{AD,i}) \cdot p_i} \quad (4-11)$$

$RZL_m(BA_m)$	mittlere Rüstzykluslänge in Abhängigkeit des Bestands [-]
$BA_{m,i}$	mittlerer Bestand der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
$p_{AD,i}$	Anteil der Auflagedauer der Rüstfamilie i an der Rüstzyklusdauer [-]
p_i	Anteil der Rüstfamilie i [-]
RZL_m	mittlere Rüstzykluslänge [-]
n	Anzahl Rüstfamilien [-]

Die Berechnung des Zeitanteils einer Rüstfamilie an der Rüstzyklusdauer ($p_{AD,i}$) ist nicht ganz einfach, weil der Zeitanteil einer Rüstfamilie von den tatsächlichen Rüstzeiten während eines Rüstzyklus abhängig ist. Die Rüstzeiten schwanken wiederum mit der Auflagemenge und konsequenterweise mit dem Bestandsniveau. In vielen Fällen

kann die Gleichung jedoch vereinfacht werden, weil der Zeitanteil ($p_{AD,i}$) durch den Volumenanteil (p_i) angenähert werden kann⁶:

$$p_{AD,i} \approx p_i \quad (4-12)$$

Unter dieser Prämisse vereinfacht sich Gleichung 4-11 zu:

$$RZL_m(BA_m) = BA_m \cdot \frac{2}{\sum_{i=1}^n (1 - p_i) \cdot p_i} \quad (4-13)$$

$RZL_m(BA_m)$	mittlere Rüstzykluslänge in Abhängigkeit des Bestands [-]
BA_m	mittlerer Bestand in Anzahl Aufträgen [-]
p_i	Anteil der Rüstfamilie i [-]
n	Anzahl Rüstfamilien [-]

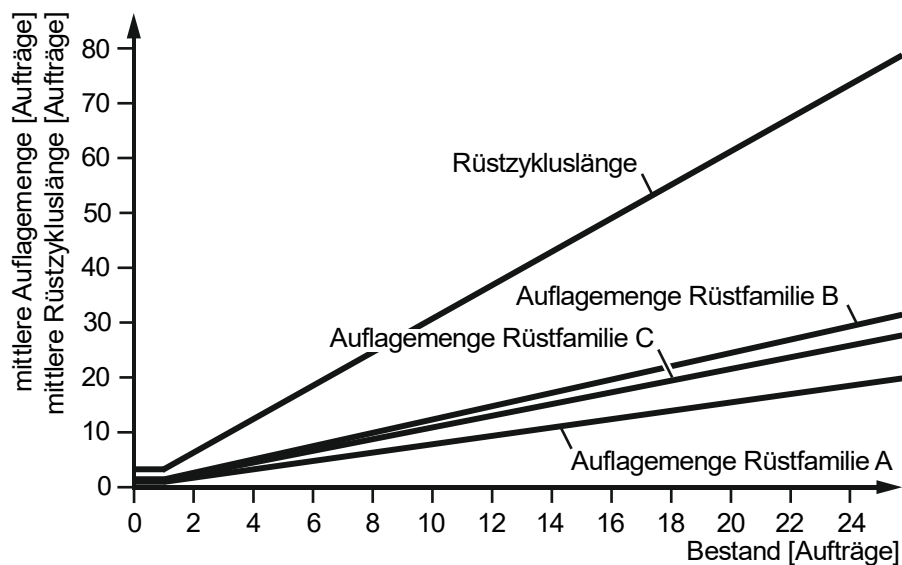
Liegt ein konstantes Bestandsniveau vor, muss Gleichung 4-13 angewendet werden, da der Zugang einer Rüstfamilie während der Bearbeitung durch den Abgangsprozess ausgelöst wird. Hierdurch ergibt sich ein gleicher Zeit- und Volumenanteil der Rüstfamilien.

Da der Anteil einer Rüstfamilie p_i unabhängig vom Bestandsniveau ist, sind die Rüstzykluslänge nach Gleichung 4-13 und damit auch die Auflagemengen der Rüstfamilien direkt proportional zum Bestand. Für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien und den Anteilen $p_A=0,25$, $p_B=0,4$ und $p_C=0,35$ ergibt sich für die mittlere Rüstzykluslänge der Zusammenhang:

$$RZL_m(BA_m) = BA_m \cdot \frac{2}{(1 - 0,25) \cdot 0,25 + (1 - 0,40) \cdot 0,40 + (1 - 0,35) \cdot 0,35} = BA_m \cdot 3,05$$

Abbildung 4-6 zeigt die Rüstzykluslänge und die Auflagemengen für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien in Abhängigkeit des Bestands. Dabei gilt für einen mittleren Bestand unter einem Auftrag die gleiche Rüstzykluslänge wie bei einem Bestand von einem Auftrag. In beiden Fällen werden nur dann große Rüstvorgänge eingespart, wenn zufällig zwei Aufträge der gleichen Rüstfamilie nacheinander am Arbeitssystem eintreffen.

⁶ In Abschnitt 4.3.5 wird diese Prämisse aufgelöst und die Berechnung von $p_{AD,i}$ erläutert.



13970

Abbildung 4-6. Mittlere Rüstzykluslänge und Auflagemengen in Abhängigkeit des Bestands

4.3.3 Bestimmung des Leistungssteigerungsfaktors

Die Gleichung für den Leistungssteigerungsfaktor aus Abschnitt 4.3.1 (Gleichung 4-3) bildet die Leistungssteigerung je Rüstfamilie ab. Dieser Abschnitt erweitert die Gleichungen auf die Leistungssteigerung je Rüstzyklus bzw. Arbeitssystem.

Der eingesparte Rüstaufwand ergibt sich aus der Summe eingesparter Rüstaufwände je Rüstfamilie. Dabei gilt, dass nur dann Rüstaufwände eingespart werden, wenn die mittlere Auflagemenge größer als eins ist. Wird im Durchschnitt weniger als ein Auftrag gebündelt, so beträgt der eingesparte Rüstaufwand null. Eine Auflagemenge von weniger 1 bedeutet, dass eine Rüstfamilie nicht in jedem Rüstzyklus aufgelegt wird:

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{Rüst},m,i}(BA_m) &= (AM_{m,i}(BA_m) - 1) \cdot (ZR_{i-1,i}^+ - ZR_i^-) \\ &= (AM_{m,i}(BA_m) - 1) \cdot \Delta ZR_i \quad , \text{ falls } AM_{m,i}(BA_m) > 1 \end{aligned} \quad (4-14)$$

$$\Delta R_{\text{Rüst},m,i}(BA_m) = 0 \quad , \text{ falls } AM_{m,i}(BA_m) \leq 1 \quad (4-15)$$

$\Delta R_{\text{Rüst},m,i}(BA_m)$ mittlere, eingesparte Rüstaufwände der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands [Std]

$AM_{m,i}(BA_m)$ mittlere Auflagemenge der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-]

$ZR_{i-1,i}^+$ große Rüstzeit von der zuvor bearbeiteten Rüstfamilie (i-1) zur Rüstfamilie i gemäß dem Rüstzyklus [Std]

ZR_i^- kleine Rüstzeit der Rüstfamilie i [Std]

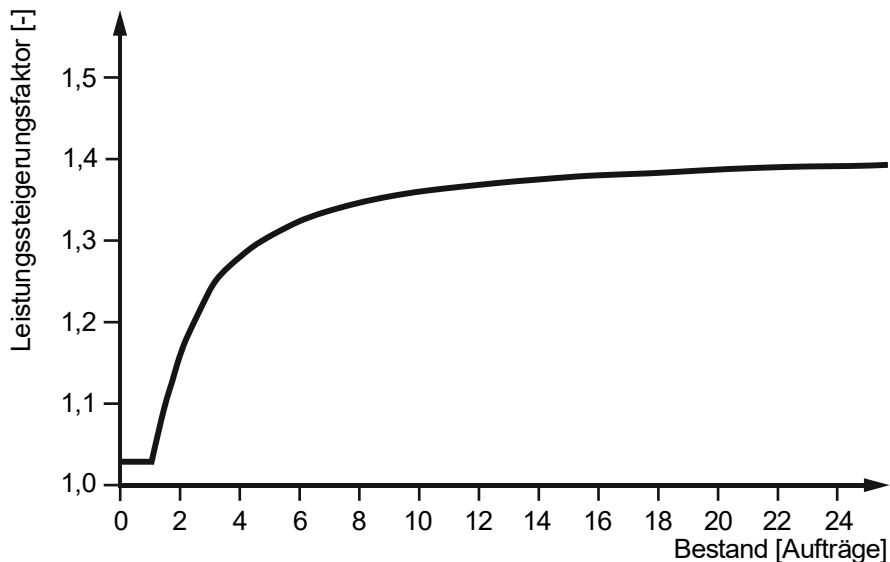
ΔZR_i Rüstzeitdifferenz der Rüstfamilie i [Std]

Folgende Gleichung erweitert die Prognose der Leistungssteigerung auf das gesamte Arbeitssystem:

$$LSF_{m,AS}(BA_m) = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_{m,i} \cdot AM_{m,i}(BA_m)}{\sum_{i=1}^n ZAU_{m,i} \cdot AM_{m,i}(BA_m) - \sum_{i=1}^n \Delta Rüst_{m,i}(BA_m)} \quad (4-16)$$

$LSF_{m,AS}(BA_m)$	mittlerer Leistungssteigerungsfaktor des Arbeitssystems in Abhängigkeit des Bestands [-]
$ZAU_{m,i}$	mittlere Auftragszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i bei großem Rüstvorgang [Std]
$AM_{m,i}(BA_m)$	mittlere Auflagemenge der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-]
$\Delta Rüst_{m,i}(BA_m)$	mittlere, eingesparte Rüstaufwände der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands [Std]
n	Anzahl Rüstfamilien

Der Zähler beschreibt die Länge eines Rüstzyklus, wenn zwischen jedem Auftrag groß gerüstet wird. Der Nenner beschreibt wiederum die tatsächliche Länge eines Rüstzyklus unter Berücksichtigung eingesparter großer Rüstvorgänge. Die Leistungssteigerung bezieht sich also auf den schlechtestmöglichen Fall. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da auch bei einer FIFO-Reihenfolge Rüstaufwände eingespart werden, wenn zufällig zwei Aufträge der gleichen Rüstfamilie nacheinander am Arbeitssystem eintreffen (vgl. Kekre (1987) und Missbauer (1997)). Abbildung 4-7 zeigt den Leistungssteigerungsfaktor für das Arbeitssystem mit den drei Rüstfamilien.



13971

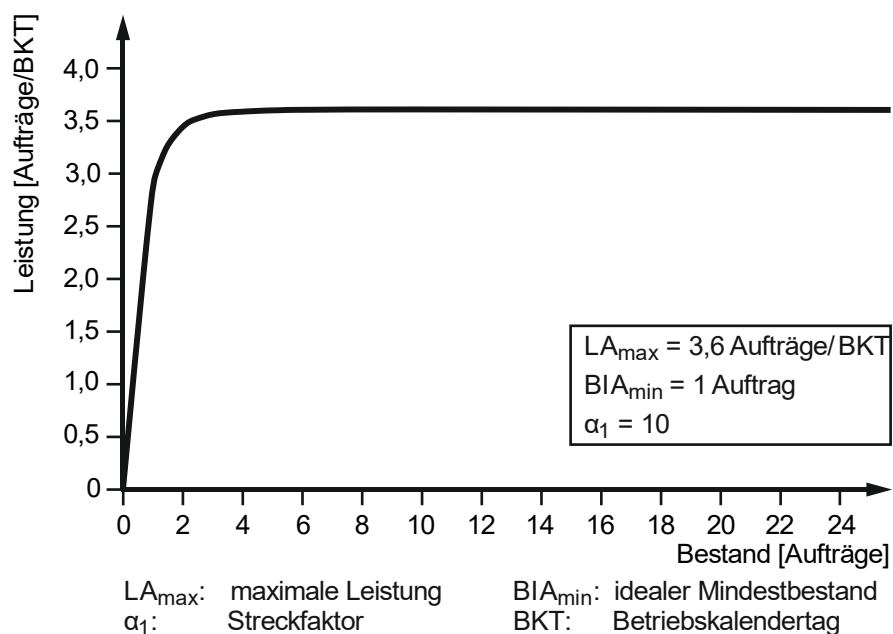
Abbildung 4-7. Leistungssteigerungsfaktor in Abhängigkeit des Bestands

Die Leistungssteigerung bei einem Bestand von einem Auftrag entspricht der bei einer FIFO-Reihenfolge. Sollte die Rüstzyklusbildung also mit einer FIFO-Reihenfolge verglichen werden, so kann sie auf diesen Wert normiert werden.

Die Leistungssteigerung auf das Worst-Case-Szenario zu beziehen, hat den Vorteil, dass zur Berechnung der Auftragszeiten zunächst nicht bekannt sein muss, welche Rüstzeiteinsparung tatsächlich erreicht wird. Zum Planungszeitpunkt ist zudem noch nicht bekannt, welcher Auftrag der erste einer Rüstfamilie sein wird und somit einen großen Rüstvorgang erfordert. Die Berechnung der Auftragszeiten mit den großen Rüstzeiten führt allerdings auch dazu, dass die Leistung in Stunden pro Tag die tatsächlich benötigte Zeit zur Bearbeitung der Aufträge übersteigt. Wie man die Kapazität mit den berechneten Werten der Leistungssteigerung planen kann, wird daher in Kapitel 6 erläutert.

4.3.4 Leistungskennlinie

Auslastungsverluste treten bei Arbeitssystemen mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten aus den gleichen Gründen auf wie bei konventionellen Arbeitssystemen. Liegt ausreichend Bestand vor, so wartet das Arbeitssystem nie auf den nächsten Auftrag. Im Folgenden wird auf die Aspekte eingegangen, die zur Berechnung der Kennlinie bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten zu beachten sind.



13972

Abbildung 4-8. Auslastungsbedingte Leistung

Abschnitt 2.2.4 diskutiert verschiedene Theorien, die den Zusammenhang zwischen Bestand und Leistung beschreiben. Für das hier vorgestellte Vorgehen ist es unerheb-

lich, welche Theorie den Ansatz zur Berechnung der bestandsbedingten Leistung liefert. Beispielhaft wird die Theorie der Produktionskennlinien von Nyhuis und Wiendahl (2012, S. 61-134) verwendet. Üblicherweise werden die Zielgrößen dabei in Stunden bzw. Stunden pro Betriebskalendertag angegeben. Die Leistungssteigerung durch Rüstzyklusbildung ist jedoch abhängig von der Anzahl der Aufträge, die am Arbeitssystem vorliegen. Daher ist es sinnvoll, auch bei der Berechnung der Leistungskennlinie die Zielgrößen in Anzahl Aufträgen anzugeben. Abbildung 4-8 stellt die Kennlinie für das Arbeitssystem mit drei Rüstfamilien dar.

Die maximale Leistung wird hierbei basierend auf dem in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Worst-Case-Szenario mit großen Rüstzeiten berechnet. Die mittlere Auftragszeit für das Arbeitssystem ergibt sich dabei aus den mit den Anteilen der Rüstfamilien gewichteten, mittleren Auftragszeiten der Rüstfamilien:

$$ZAU_m = \sum_{i=1}^n ZAU_{m,i} \cdot p_i \quad (4-17)$$

ZAU_m	mittlere Auftragszeit [Std]
$ZAU_{m,i}$	mittlere Auftragszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i bei großem Rüstvorgang [Std]
p_i	Anteil der Rüstfamilie i [-]
n	Anzahl Rüstfamilien [-]

Die maximale Leistung, die in die Gleichung zur Berechnung der auslastungsbedingten Leistung (Gleichung 2-15) eingeht, ergibt sich dann aus dem Quotienten der Kapazität und der mittleren Auftragszeit:

$$LA_{max} = \frac{KAP}{ZAU_m} \quad (4-18)$$

LA_{max}	maximale Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]
KAP	Kapazität des Arbeitssystems [Std/BKT]
ZAU_m	mittlere Auftragszeit [Std]

Im Beispiel mit den drei Rüstfamilien ergibt sich eine mittlere Auftragszeit von 6,7 Stunden je Auftrag. Bei einer Kapazität von 24 Stunden pro Tag kann das Arbeitssystem also maximal 3,6 Aufträge pro Betriebskalendertag bearbeiten. Teilt man die Leistung in Stunden pro Tag durch die mittlere Auftragszeit ergibt sich die Leistung in Anzahl Aufträgen pro Tag.

Für eine realistische Kapazitätsplanung ist es wichtig, die Leistung möglichst genau bestimmen zu können. Dabei ist zum einen die auslastungsbedingte Leistung zu berücksichtigen, wie sie durch die Produktionskennlinien nach Nyhuis und Wiendahl beschrieben wird (vgl. Abbildung 4-8). Zum anderen ist der Einfluss der zyklischen Reihenfolgebildung einzubeziehen, der durch den Leistungssteigerungsfaktor abgebildet

wird (Gleichung 4-16). Im Folgenden wird gezeigt, wie beide Einflüsse in einer Kennlinie zusammengeführt werden.

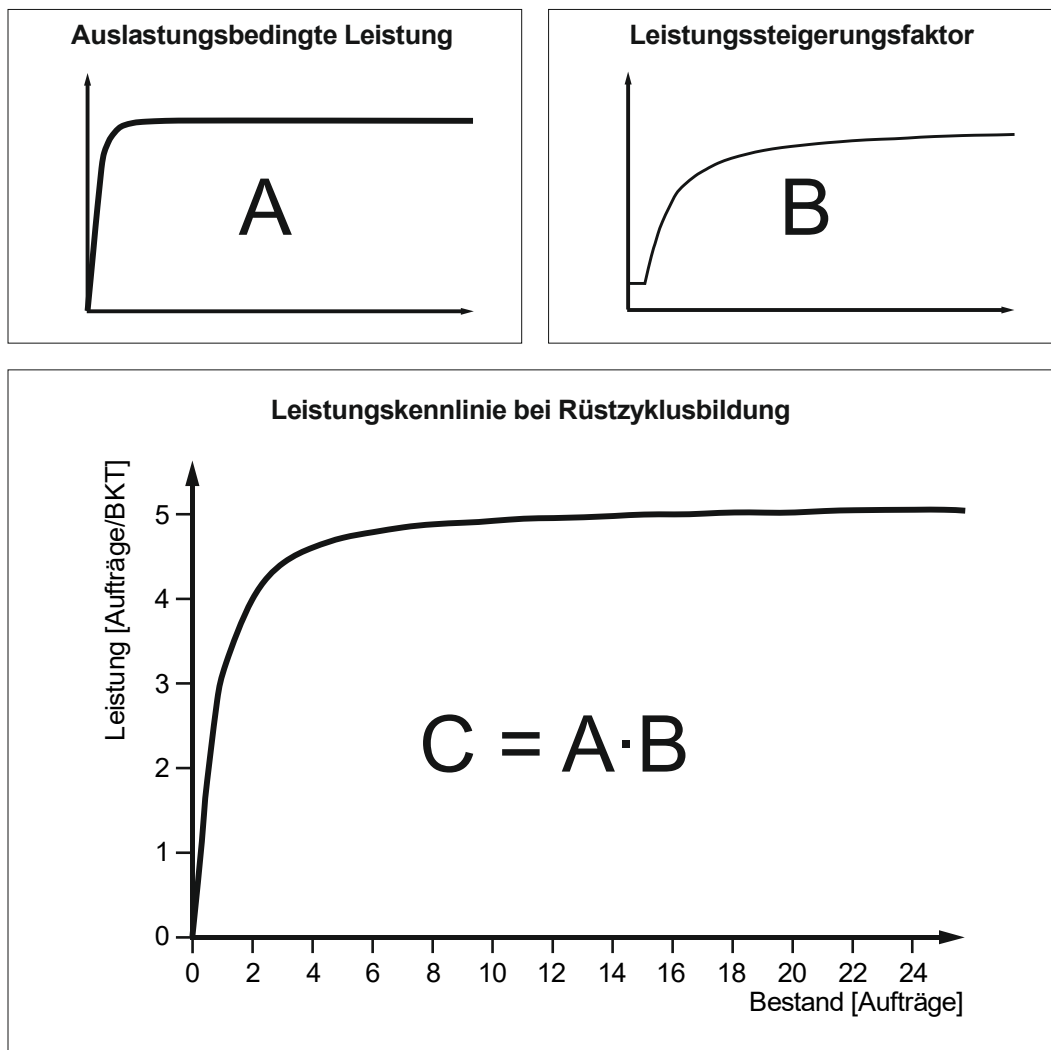
Zur Bestimmung der Leistung wird für jeden Betriebspunkt die auslastungsbedingte Leistung mit dem Leistungssteigerungsfaktor multipliziert. Ein Betriebspunkt entspricht einem Bestandsniveau, sodass gilt:

$$LA_{m,RZB}(BA_m) = LA_{m,A}(BA_m) \cdot LSF_{m,AS}(BA_m) \quad (4-19)$$

$LA_{m,RZB}(BA_m)$ mittlere Leistung bei Rüstzyklusbildung in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

$LA_{m,A}(BA_m)$ mittlere auslastungsbedingte Leistung in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

$LSF_{m,AS}(BA_m)$ mittlerer Leistungssteigerungsfaktor des Arbeitssystems in Abhängigkeit des Bestands [-]



13973

Abbildung 4-9. Leistungskennlinie bei Rüstzyklusbildung

Für das Beispiel ergibt sich hieraus die untere, in Abbildung 4-9 dargestellte Kennlinie. Im Gegensatz zur Leistungskennlinie für Arbeitssysteme ohne reihenfolgeabhängige Rüstzeiten ist das Maximum der Kennlinie bei rüstzeitoptimaler Reihenfolgebildung nicht durch eine Auslastung von 100% bestimmt. Die Bündelung von Aufträgen und damit verbundene Rüstzeiteinsparungen führen auch bei Bestandserhöhungen weit über den idealen Mindestbestand hinaus zu weiteren Leistungssteigerungen. Dies verdeutlicht, warum die konventionelle Kennlinientheorie im Falle reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten nicht angewendet werden kann.

4.3.5 Weitere Effekte

Während die zuvor vorgestellten Modelle grundsätzlich gelten, existieren Effekte, die zu einer Abweichung führen. Diese Effekte sollen im Folgenden vorgestellt und ihr Einfluss auf die Modellierung soweit möglich mathematisch beschrieben werden.

Leere Rüstfamilien

Die Auflagemengen wurden bislang unter der Prämisse berechnet, dass diese in jedem Rüstzyklus genau einmal gefertigt werden. Es kann jedoch erforderlich sein, eine Rüstfamilie im Rüstzyklus zu überspringen, da keine Aufträge der Rüstfamilie in der Warteschlange vorliegen. In einer Werkstattfertigung mit komplexen Materialflüssen kann dieser Fall grundsätzlich jederzeit eintreten. Zwei Gründe erhöhen jedoch die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Rüstfamilie übersprungen wird:

1. Der Bestand am Arbeitssystem ist gering.
2. Der Anteil einer Rüstfamilie ist gering.

Je höher die Anzahl der Rüstfamilien ist, desto geringer sind die Anteile der Rüstfamilien. Entsprechend gilt: Je höher die Anzahl der Rüstfamilien und je geringer der Bestand ist, desto häufiger wird der Rüstzyklus nicht eingehalten.

Dass in einem Rüstzyklus kein Auftrag einer Rüstfamilie im Bestand vorliegt, ist gleichbedeutend damit, dass über den Rüstzyklus kein Auftrag dieser Rüstfamilie zugegangen ist. Bei einer Rüstzykluslänge von RZL Aufträgen sind also RZL Aufträge anderer Rüstfamilien zugegangen, so dass sich die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Rüstfamilie i leer bleibt, zu $(1-p_i)^{RZL}$ berechnet. Die Gegenwahrscheinlichkeit hierzu entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass eine Rüstfamilie im Rüstzyklus aufgelegt wird:

$$p_{i,p} = 1 - (1 - p_i)^{RZL_m} \quad (4-20)$$

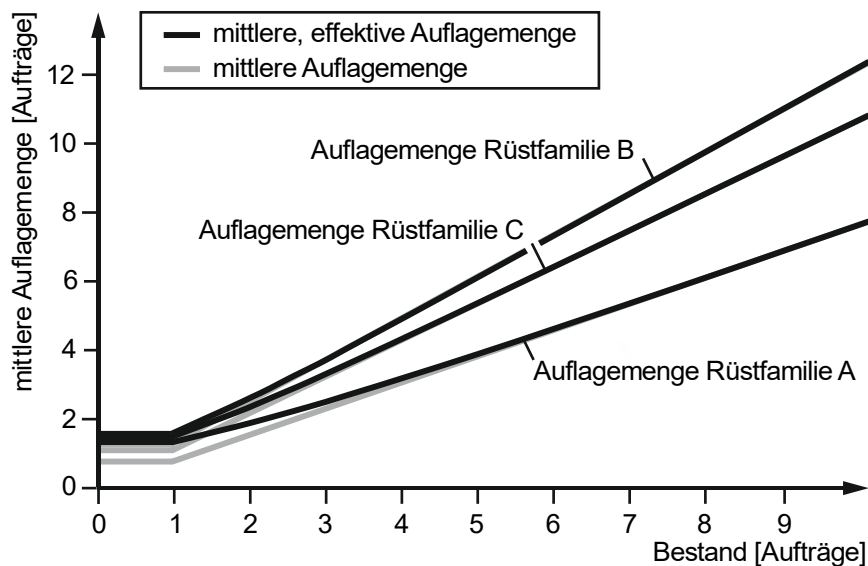
$p_{i,p}$	Wahrscheinlichkeit dafür, dass Rüstfamilie i im Rüstzyklus gefertigt wird [-]
p_i	Anteil der Rüstfamilie i [-]
RZL_m	mittlere Rüstzykluslänge in Anzahl Aufträgen [-]

Sollte eine Rüstfamilie übersprungen werden, so erhöht dies die Auflagemenge in den folgenden Rüstzyklen, weil sich die Aufträge der Rüstfamilie auf weniger Rüstzyklen verteilen. Die mit Gleichung 4-5 berechnete Auflagemenge ist zwar im Mittel korrekt, berücksichtigt jedoch auch die Rüstzyklen, in denen die Auflagemenge null ist. Werden die Auflagemengen auf Basis von Rückmeldedaten berechnet, so werden nur die Auflagen (mindestens ein Auftrag der Rüstfamilie wird gefertigt) in die Berechnung des Mittelwerts einbezogen. Gleichung 4-5 wird daher um die Division durch die Wahrscheinlichkeit der Auflage erweitert, was die mittlere, effektive Auflagemenge ergibt:

$$AM_{m,eff,i}(BA_m) = \frac{p_i \cdot RZL_m(BA_m)}{p_{i,p}} \quad (4-21)$$

$AM_{m,eff,i}(BA_m)$	mittlere, effektive Auflagemenge der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-]
p_i	Anteil der Rüstfamilie i [-]
$RZL_m(BA_m)$	mittlere Rüstzykluslänge in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-]
$p_{i,p}$	Wahrscheinlichkeit dafür, dass Rüstfamilie i im Rüstzyklus gefertigt wird [-]

Abbildung 4-10 zeigt die effektive Auflagemenge für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien.



13974

Abbildung 4-10. Auflagemenge der Rüstfamilien unter Berücksichtigung von leeren Rüstfamilien

In grau sind die Ergebnisse für die mittlere Auflagemenge gemäß Gleichung 4-5 dargestellt. Dabei ist der Unterschied in diesem Beispiel nur bei geringen Beständen sichtbar. Außerdem ist der Effekt größer für Rüstfamilie A, die mit einem Anteil von 0,25 auch die Rüstfamilie mit dem geringsten Anteil ist.

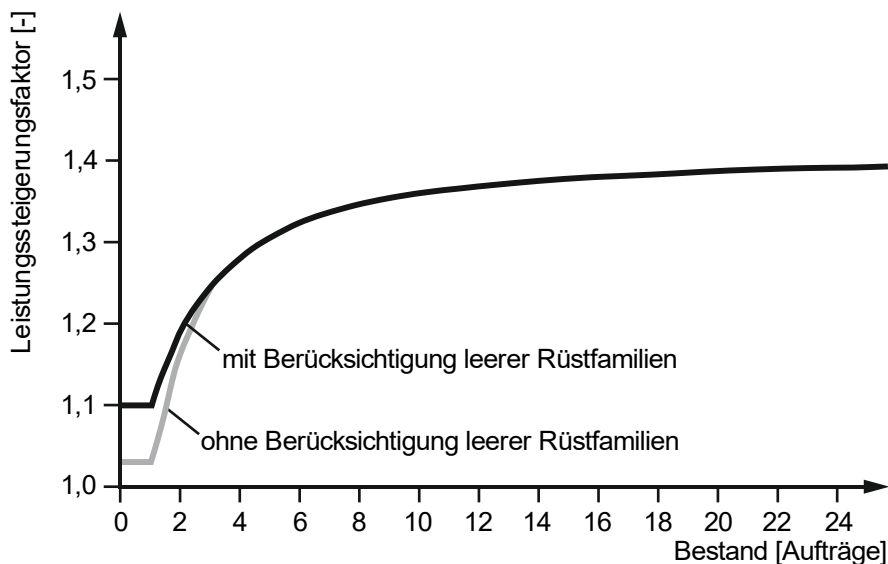
Das Überspringen von Rüstfamilien führt dazu, dass nicht in jedem Rüstzyklus Rüstaufwände eingespart werden. Nur wenn die Rüstfamilie aufgelegt wird, können Rüstzeiten eingespart werden. Demnach muss die Rüstzeiteinsparung mit der Wahrscheinlichkeit gewichtet werden, mit der eine Rüstfamilie gefertigt wird:

$$\Delta R_{\text{Rüst},i}(BA_m) = p_{i,p} \cdot (AM_{m,\text{eff},i}(BA_m) - 1) \cdot \Delta ZR_i \quad , \text{ falls } AM_{m,\text{eff},i}(BA_m) > 1 \quad (4-22)$$

$$\Delta R_{\text{Rüst},i}(BA_m) = 0 \quad , \text{ falls } AM_{m,\text{eff},i}(BA_m) \leq 1 \quad (4-23)$$

- $\Delta R_{\text{Rüst},i}(BA_m)$ mittlere, eingesparte Rüstaufwände der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands [Std]
- $p_{i,p}$ Wahrscheinlichkeit dafür, dass Rüstfamilie i im Rüstzyklus gefertigt wird [-]
- $AM_{m,\text{eff},i}(BA_m)$ mittlere, effektive Auflagemenge der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-]
- ΔZR_i Rüstzeitdifferenz der Rüstfamilie i [Std]

Die Gleichung für den Leistungssteigerungsfaktor (4-16) bleibt gleich. Abbildung 4-11 zeigt, wie sich der Leistungssteigerungsfaktor ändert, wenn leere Rüstfamilien berücksichtigt werden.



13975

Abbildung 4-11. Leistungssteigerungsfaktor unter Berücksichtigung von leeren Rüstfamilien

Der Leistungssteigerung verschiebt sich aufgrund der angepassten Berechnung des Rüstaufwands für niedrige Bestände nach oben. In grau dargestellt ist der Leistungssteigerungsfaktor ohne die Anpassung.

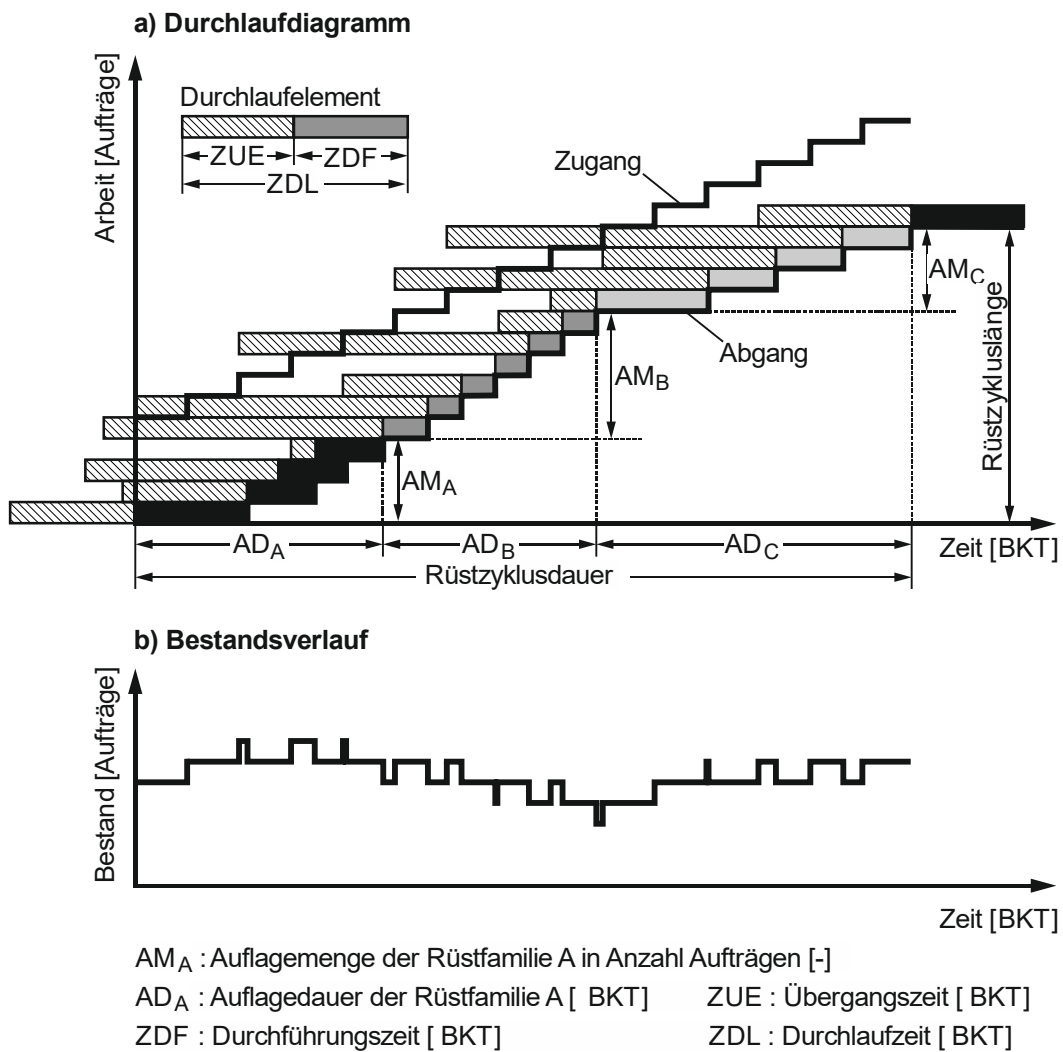
Schwankende Bestände

Konstante Bestände sind in einer Werkstattfertigung mit komplexem Materialfluss schwer zu realisieren. Der folgende Abschnitt diskutiert daher zwei Effekte, die Bestandsschwankungen verursachen.

Rüstkfamilien mit unterschiedlichen Auftragszeiten. Auf der Ebene eines Arbeitssystems ist es selten möglich, den Zugang direkt an den Abgang beispielsweise über eine Auftragsfreigabe nach Conwip zu koppeln. Selbst bei einer konstanten Zugangsrate wie in Abbildung 4-12 dargestellt, kann es durch die Rüstzyklusbildung dann zu systematischen und wiederkehrenden Bestandsschwankungen während eines Rüstzyklus kommen.

Sind die großen Rüstzeiten einer Rüstfamilie hoch, treffen während der Bearbeitung eines Auftrags mehrere Aufträge am Arbeitssystem ein. Unterscheiden sich dann auch noch die mittleren Bearbeitungszeiten der Rüstfamilien stark, so gehen während der Auflage einer „langsamen“ Rüstfamilie überdurchschnittlich viele Aufträge zu und während der Bearbeitung einer „schnellen“ Rüstfamilie überdurchschnittlich wenige Aufträge. Es kommt also zu einem Bestandsaufbau und -abbau innerhalb eines Rüstzyklus. In Abbildung 4-12 ist dieser Effekt besonders gut an den Rüstfamilien B und C zu beobachten: Während der Bearbeitung von 6 Aufträgen der Rüstfamilie B gehen nur 4 Aufträge dem Arbeitssystem zu. Der Bestand sinkt also um 2 Aufträge. Während der Bearbeitung von 4 Aufträgen der Rüstfamilie C gehen wiederum 6 Aufträge zu. Der Bestand wächst um 2 Aufträge.

Für die Berechnung der Auflagemengen ist es also relevant, dass der Anteil der Auf-lagedauer an der Rüstzyklusdauer nicht dem Anteil der Auflagemenge einer Rüstfam-ilie an der Rüstzykluslänge entspricht. Es gilt also $p_i \neq p_{AD,i}$. Die Herleitung des Zusam-menhangs zwischen Bestand und Rüstzykluslänge unterscheidet sich in diesem Fall.



13976

Abbildung 4-12. Durchlaufdiagramm (a) und Bestandsverlauf (b) mit schwankenden Beständen

Während sich p_i über den Anteil einer Rüstfamilie in Bezug auf das gesamte Auftragspektrum beispielsweise aus Rückmeldedaten ermitteln lässt, ist die Bestimmung des Anteils der Aufagedauer $p_{AD,i}$ komplexer. Hierfür muss zunächst die mittlere Aufagedauer einer Rüstfamilie ermittelt werden. Sie ergibt sich aus der Dauer der Bearbeitung inklusive großer und kleiner Rüstvorgänge bei Auflage einer Rüstfamilie. Da die Aufagedauer in Betriebskalendertagen angegeben wird, werden die Bearbeitungs- und Rüstzeiten durch die maximale Leistung dividiert:

$$AD_{m,i} = \frac{ZR_{i-1,i}^+ + ZBA_{m,i} + (AM_{m,i} - 1) \cdot (ZR_i^- + ZBA_{m,i})}{L_{max}} \quad (4-24)$$

$AD_{m,i}$ mittlere Aufagedauer der Rüstfamilie i [BKT]
 $ZR_{i-1,i}^+$ große Rüstzeit von der zuvor bearbeiteten Rüstfamilie (i-1) zur Rüstfamilie i gemäß dem Rüstzyklus [Std]

$ZBA_{m,i}$	mittlere Bearbeitungszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i [Std]
$AM_{m,i}$	mittlere Auflagemenge der Rüstfamilie i [-]
ZR_i^-	kleine Rüstzeit der Rüstfamilie i [Std]
L_{max}	maximale Leistung [Std/BKT]

Der erste Auftrag erfordert einen großen Rüstvorgang, alle folgenden Aufträge nur noch einen kleinen Rüstvorgang. Die maximale Leistung ist bislang noch unbekannt. Da die Berechnung der Auflagendauer ein Zwischenschritt zur Bestimmung der Anteile ist, ist dies zu diesem Zeitpunkt unkritisch. Die Rüstzyklusdauer ergibt sich aus der Summe der Auflagendauern der einzelnen Rüstfamilien:

$$RZD_m = \sum_{i=1}^n AD_{m,i} \quad (4-25)$$

RZD_m	mittlere Rüstzyklusdauer [BKT]
$AD_{m,i}$	mittlere Auflagendauer der Rüstfamilie i [BKT]
n	Anzahl Rüstfamilien [-]

Der Anteil der Auflagendauer einer Rüstfamilie ergibt sich aus dem Verhältnis der Auflagendauer zur Rüstzyklusdauer. Dabei lässt sich die Leistung kürzen, sodass gilt:

$$p_{AD,i} = \frac{AD_{m,i}}{RZD_m} = \frac{ZR_{i-1,i}^+ + ZBA_{m,i} + (AM_{m,i} - 1) \cdot (ZR_i^- + ZBA_{m,i})}{\sum_{i=1}^n (ZR_{i-1,i}^+ + ZBA_{m,i} + (AM_{m,i} - 1) \cdot (ZR_i^- + ZBA_{m,i}))} \quad (4-26)$$

$p_{AD,i}$	Anteil der Auflagendauer der Rüstfamilie i an der Rüstzyklusdauer [-]
RZD_m	mittlere Rüstzyklusdauer [BKT]
$AD_{m,i}$	mittlere Auflagendauer der Rüstfamilie i [BKT]
$ZR_{i-1,i}^+$	große Rüstzeit von der zuvor bearbeiteten Rüstfamilie (i-1) zur Rüstfamilie i gemäß dem Rüstzyklus [Std]
$ZBA_{m,i}$	mittlere Bearbeitungszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i [Std]
$AM_{m,i}$	mittlere Auflagemenge der Rüstfamilie i [-]
ZR_i^-	kleine Rüstzeit der Rüstfamilie i [Std]
n	Anzahl Rüstfamilien [-]

Da p_i gegeben ist und $p_{AD,i}$ mithilfe Gleichung 4-26 berechnet werden kann, lässt sich der mittlere Bestand bestimmen:

$$BA_m = \sum_{i=1}^n BA_{m,i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot (1 - p_{AD,i}) \cdot p_i \cdot RZL_m \quad (4-27)$$

BA_m	mittlerer Bestand in Anzahl Aufträgen [-]
$BA_{m,i}$	mittlerer Bestand der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
$p_{AD,i}$	Anteil der Auflagendauer der Rüstfamilie i an der Rüstzyklusdauer [-]
p_i	Anteil der Rüstfamilie i [-]
RZL_m	mittlere Rüstzykluslänge [-]

n Anzahl Rüstfamilien [-]

Übergewicht kleiner Auflagemengen. Die Auflagemenge steigt direkt proportional zum Bestand. In Phasen mit niedrigen Beständen werden daher kleinere Auflagemengen erreicht als bei hohen Beständen. Infolgedessen wird bei niedrigen Beständen auch häufiger umgerüstet. Jeder Rüstvorgang ist dabei ein Messpunkt für eine Auflagemenge. Die Anzahl kleiner Auflagemengen ist daher höher als die Anzahl großer Auflagemengen. Der Mittelwert der Auflagemengen tendiert daher bei schwankenden Beständen zu kleineren Auflagemengen, da hierfür mehr Messpunkte vorliegen.

Auch wenn der Mittelwert gemessener Auflagemengen vom prognostizierten Mittelwert abweicht, wird die mittlere Leistung jedoch auch bei schwankenden Beständen korrekt prognostiziert. Für die Leistung ist nämlich nicht die Anzahl der Auflagen entscheidend, sondern die Anzahl der Aufträge, die in dieser Zeit bearbeitet werden.

Weil lange Rüstzyklen bei hohen Beständen mehr Aufträge enthalten als kurze Rüstzyklen bei niedrigen Beständen, sind sie für die Berechnung der Leistung höher zu gewichten, was die höhere Anzahl kleiner Auflagemengen ausgleicht.

4.4 Modellierung der Durchlaufzeit

Um die Leistung bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten steigern zu können, sind Reihenfolgevertauschungen der Aufträge in der Warteschlange nötig. Dies wirkt dem Ziel konstanter und damit planbarer Durchlaufzeiten entgegen.

Dieser Abschnitt stellt ein Modell zur Prognose der Durchlaufzeit bei Rüstzyklusbildung vor. Der Einfluss der Reihenfolgebildung und der Einfluss des Bestands werden getrennt untersucht. Die Grundlagen hierfür liefert Abschnitt 2.2.7. Der Bestand beeinflusst demnach den Mittelwert der Durchlaufzeit und die Reihenfolgebildung die Streuung der Durchlaufzeit. Abschnitt 4.4.1 beschreibt daher, welchen Einfluss die Rüstzyklusbildung auf die Streuung der Durchlaufzeit hat.⁷ Der darauf folgende Abschnitt 4.4.2 stellt den Einfluss des Bestands auf die mittlere Durchlaufzeit dar. Abschnitt 4.4.3 zeigt die Integration beider Einflüsse in die Kennlinientheorie.

4.4.1 Einfluss der Reihenfolgebildung

Die reihenfolgebedingte Durchlaufzeit eines Auftrags ist nach Lödding und Piontek (2018, S. 4) definiert als das Verhältnis von Reihenfolgeabweichung zu Leistung:

$$ZDL_{RA,j} = \frac{RAA_j}{LA} \quad (4-28)$$

⁷ Teile des Abschnitts zum Einfluss der Rüstzyklusbildung auf Reihenfolgeabweichungen wurden bereits in Engehausen & Lödding (2017a) veröffentlicht.

ZDL _{RA,j}	Reihenfolge(-abweichungs-)bedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
RAA _j	Reihenfolgeabweichung von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
LA	Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Ein Modell zur Bestimmung der Leistung bei Rüstzyklusbildung war Gegenstand des vorherigen Abschnitts. Welchen Einfluss die Rüstzyklusbildung auf die Reihenfolgeabweichung von Aufträgen hat, wird im Folgenden gezeigt.

Bestimmung der Reihenfolgeabweichungen

Reihenfolgeregeln beeinflussen per Definition die Reihenfolgeabweichungen an einem Arbeitssystem. Um Reihenfolgeabweichungen zu ermitteln, werden Aufträgen in aufsteigender Reihenfolge ihrer Zugangszeitpunkte (Abgangszeitpunkte) Zugangsränge (Abgangsränge) zugewiesen. Die Reihenfolgeabweichung resultiert dann aus der Abweichung von Abgangs- und Zugangsrängen (Lödding & Piontek 2018, S. 3):

$$RAA_j = RgAAB_j - RgAZU_j \quad (4-29)$$

RAA _j	Reihenfolgeabweichung von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
RgAAB _j	Abgangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
RgAZU _j	Zugangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Tabelle 4-1 zeigt die Reihenfolgeabweichungen für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien aus Abbildung 4-2. Die Aufträge 3 und 5 der Rüstfamilie A werden um 1 bzw. 2 Ränge vorgezogen. Im Beispiel verzögert sich durch die zyklische Reihenfolgebildung dafür Auftrag 2 der Rüstfamilie C um 3 Ränge.

Tabelle 4-1. Bestimmung von Reihenfolgeabweichungen

(1) Auftrag j	(2) Rüstfamilie	(4) BA(TZU _j)	(3) RgAZU _j	(4) RgAAB _j	(5) RAA _j
1	A	6	6	6	0
2	C	6	7	10	3
3	A	6	8	7	-1
4	B	6	9	9	0
5	A	6	10	8	-2
6	C	6	11	11	0
					Σ 0

BA(TZU _j)	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
RgAZU _j	Zugangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
RgAAV _j	Abgangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
RAA _j	Reihenfolgeabweichung von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Der Einfluss der Rüstzyklusbildung wird anhand der Extremfälle quantifiziert. Trifft ein Auftrag als letzter Auftrag seiner Rüstfamilie während der Bearbeitung seiner Rüstfamilie am Arbeitssystem ein, wird er maximal beschleunigt. Er überholt somit die gesamte Länge der Warteschlange und wird dann als nächster Auftrag bearbeitet. Die Länge der Warteschlange entspricht dabei dem Bestand, der zu seiner Ankunftszeit am Arbeitssystem vorliegt. Der minimale Abgangsrang beträgt somit:

$$RgAAB_{min,j} = RgAZU_j - BA(TZU_j) + 1 \quad (4-30)$$

$RgAAB_{min,j}$ minimaler Abgangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
 $RgAZU_j$ Zugangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
 $BA(TZU_j)$ Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Nach Gleichung 4-29 resultiert hieraus für die minimale Reihenfolgeabweichung durch Rüstzyklusbildung:

$$RAA_{min,j} = RgAAB_{min,j} - RgAZU_j = 1 - BA(TZU_j) \quad (4-31)$$

$RAA_{min,j}$ minimale Reihenfolgeabweichung von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
 $RgAAB_{min,j}$ minimaler Abgangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
 $RgAZU_j$ Zugangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
 $BA(TZU_j)$ Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Somit ist die minimale Reihenfolgeabweichung lediglich abhängig von dem Bestand zum Zugangszeitpunkt des Auftrags, aber unabhängig von der Rüstzyklusbildung.

Zur Modellierung der maximalen Reihenfolgeabweichung wird der schlechteste Fall betrachtet. Im Beispiel von Abbildung 4-13 trifft ein Auftrag der Rüstfamilie B genau dann am Arbeitssystem ein, wenn das Arbeitssystem gerade auf die im Rüstzyklus folgende Rüstfamilie umgerüstet wurde.

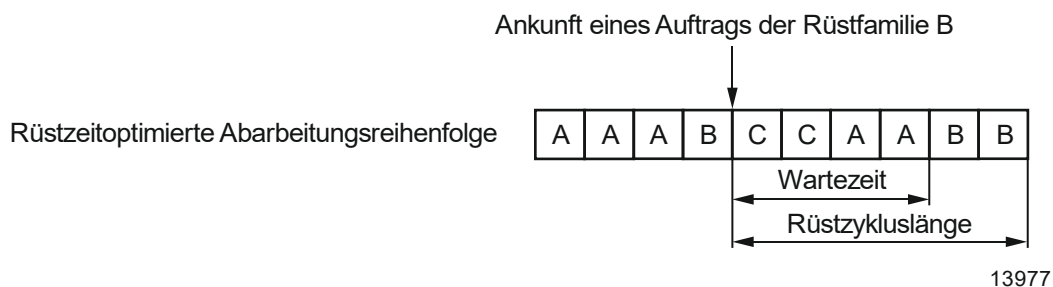


Abbildung 4-13. Maximale Reihenfolgeabweichung durch Rüstzyklusbildung

Der Auftrag der Rüstfamilie B wartet also, während Aufträge aller anderen Rüstfamilien bearbeitet werden. Der maximale Abgangsrang dieses Auftrags entspricht daher dem Abgangsrank des Auftrags, der zum Zugangszeitpunkt bearbeitet wird, plus der Auflagemenge aller anderen Rüstfamilien. Dies entspricht der Rüstzykluslänge abzüglich der Auflagemenge der eigenen Rüstfamilie. Der Abgangsrank erhöht sich zusätzlich

um 1, da der jeweilige Auftrag als nächstes bearbeitet wird, nachdem er auf seine Rüstfamilie gewartet hat. Da der Abgangsrang zu jedem Zeitpunkt dem Zugangsrang abzüglich des Bestands zum Zugangszeitpunkt entspricht, beträgt der maximale Abgangsrang:

$$RgAAB_{\max,j} = RgAZU_j - BA(TZU_j) + RZL(TZU_j) - AM_{i,j} + 1 \quad (4-32)$$

$RgAAB_{\max,j}$	maximaler Abgangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$RgAZU_j$	Zugangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$BA(TZU_j)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$RZL(TZU_j)$	Länge des Rüstzyklus, der zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j beginnt, in Anzahl Aufträgen [-]
$AM_{i,j}$	Auflagemenge der Rüstfamilie i von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Für die maximale Reihenfolgeabweichung durch Rüstzyklusbildung ergibt sich nach Gleichung 4-29:

$$RAA_{\max,j} = RgAAB_{\max,j} - RgAZU_j = 1 - BA(TZU_j) + RZL(TZU_j) - AM_{i,j} \quad \text{für alle } BA(TZU_j) > 1 \quad (4-33)$$

$$RAA_{\max,j} = 0 \quad \text{für alle } BA(TZU_j) = 1 \quad (4-34)$$

$RAA_{\max,j}$	maximale Reihenfolgeabweichung von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$RgAAB_{\max,j}$	maximaler Abgangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$RgAZU_j$	Zugangsrang von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$BA(TZU_j)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$RZL(TZU_j)$	Länge des Rüstzyklus, der zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j beginnt in Anzahl Aufträgen [-]
$AM_{i,j}$	Auflagemenge der Rüstfamilie i von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Die maximale Reihenfolgeabweichung hängt also von der Länge des Rüstzyklus sowie von der Auflagemenge der jeweiligen Rüstfamilie ab. Je länger demnach ein Rüstzyklus ist und je kleiner die Auflagemenge, desto höher ist auch das Potenzial für Reihenfolgeabweichungen. Aufträge von Exotenfamilien erfahren also tendenziell eine höhere Reihenfolgeabweichung als Aufträge von Rennerfamilien. Liegt zum Zugangszeitpunkt eines Auftrags kein weiterer Auftrag im Bestand vor, ist keine Reihenfolgevertauschung möglich und die Reihenfolgeabweichung entspricht null.

Bestimmung der reihenfolgebedingten Durchlaufzeit

Mit Gleichung 4-28 lässt sich aus der Reihenfolgeabweichung nun die minimale und maximale, reihenfolgebedingte Durchlaufzeit bei Rüstzyklusbildung ableiten:

$$ZDL_{RA,\min,j} = \frac{RAA_{\min,j}}{LA} = \frac{1 - BA(TZU_j)}{LA} \quad (4-35)$$

$$ZDL_{RA,max,j} = \frac{RAA_{max,j}}{LA} = \frac{1 - BA(TZU_j) + RZL(TZU_j) - AM_{i,j}}{LA} \quad (4-36)$$

$ZDL_{RA,min,j}$	minimale, reihenfolgebedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
$RAA_{min,j}$	minimale Reihenfolgeabweichung von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
LA	Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]
$BA(TZU_j)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$ZDL_{RA,max,j}$	maximale, reihenfolgebedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
$RAA_{max,j}$	maximale Reihenfolgeabweichung von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$RZL(TZU_j)$	Länge des Rüstzyklus, der zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j beginnt, in Anzahl Aufträgen [-]
$AM_{i,j}$	Auflagemenge der Rüstfamilie i von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

4.4.2 Einfluss des Bestands

Der Bestand beeinflusst die Durchlaufzeit durch die Erhöhung der Wartezeiten vor Bearbeitung. Die bestandsbedingte Durchlaufzeit eines Auftrags ist nach Lödding und Piontek (2018, S. 3) definiert als:

$$ZDL_{B,j} = \frac{BA(TZU_j)}{LA} \quad (4-37)$$

$ZDL_{B,j}$	Bestandsbedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
$BA(TZU_j)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
LA	Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Im Falle einer FIFO-Bearbeitung der Aufträge entspricht die Durchlaufzeit der bestandsbedingten Durchlaufzeit.

4.4.3 Durchlaufzeitkennlinie

Nyhuis und Wiendahl tragen die mittlere Durchlaufzeit und die mittlere Leistung über dem Bestand auf. Dies ermöglicht es Produktionsplanern, sich bewusst im Zielkonflikt zwischen hoher Leistung, niedrigem Bestand und niedrigen Durchlaufzeiten zu positionieren. Im Fall der Rüstzyklusbildung ist es sinnvoll, nicht nur die mittlere Durchlaufzeit als Kennlinie darzustellen, sondern auch die Abweichung vom Mittelwert. Denn gerade die Streuung der Durchlaufzeit erschwert es Unternehmen, den Auftragsdurchlauf an einem Arbeitssystem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten zu planen. Dieser Abschnitt zeigt daher zum einen, wie die mittlere Durchlaufzeit bestimmt wird. Zum anderen stellt er einen Ansatz vor, wie aus den Gleichungen für die minimale und die maximale reihenfolgebedingte Durchlaufzeit die Abweichung von diesem Mittelwert bestimmt werden kann.

Bestimmung der mittleren Durchlaufzeit

Für die mittlere Durchlaufzeit gilt auch an einem Arbeitssystem mit Rüstzyklusbildung der Zusammenhang zwischen Bestand und Leistung im Sinne des Gesetzes von Little (Little 1961, S. 383 ff.). Die mittlere Durchlaufzeit beträgt somit:

$$ZDL_m = \frac{BA_m}{LA_m} \quad (4-38)$$

ZDL _m	mittlere Durchlaufzeit [BKT]
BA _m	mittlerer Bestand in Anzahl Aufträgen [-]
LA _m	mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Nyhuis und Wiendahl (2012, S. 32 ff.) bezeichnen diesen Wert als *virtuelle Durchlaufzeit*, da es sich nicht um das arithmetische Mittel der einzelnen Durchlaufzeiten der Aufträge handelt, sondern lediglich um einen mit Little's Law berechneten Wert. Die so berechnete mittlere Durchlaufzeit ist dennoch eine gute Abschätzung, die für die Planung genutzt werden kann.

Bestimmung der minimalen Durchlaufzeit

Nach der getrennten Untersuchung der minimalen, reihenfolgebedingten und der bestandsbedingten Durchlaufzeit werden diese nun zusammengeführt. Für jeden Auftrag lässt sich so die minimale Durchlaufzeit durch Rüstzyklusbildung bestimmen:

$$ZDL_{\min,j} = ZDL_{RA,\min,j} + ZDL_{B,j} = \frac{1 - BA(TZU_j)}{LA} + \frac{BA(TZU_j)}{LA} = \frac{1}{LA} \quad (4-39)$$

ZDL _{min,j}	minimale Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
ZDL _{RA,min,j}	minimale, reihenfolgebedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
ZDL _{B,j}	Bestandsbedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
BA(TZU _j)	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
LA	Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Die minimal mögliche Durchlaufzeit ergibt sich also aus dem Kehrwert der Leistung in Anzahl Aufträge.

Obige Gleichung gilt dabei für einzelne Aufträge bei spezifischen Werten für die Leistung des Arbeitssystems. Nach dem Modell von Lödding und Piontek gilt, dass die Leistung für den Zeitraum zwischen Zugang und Abgang des Auftrags berechnet wird (Lödding & Piontek 2018, S. 3). Unter der Annahme eines konstanten Abgangs kann die minimale Durchlaufzeit für das Arbeitssystem mit der mittleren Leistung bestimmt werden:

$$ZDL_{\min} = \frac{1}{LA_m} \quad (4-40)$$

ZDL _{min}	minimale Durchlaufzeit [BKT]
LA _m	mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Bestimmung der maximalen Durchlaufzeit

Analog zur minimalen Durchlaufzeit erfolgt die Bestimmung der maximalen Durchlaufzeit, indem die maximale, reihenfolgebedingte Durchlaufzeit und die bestandsbedingte Durchlaufzeit zusammengeführt werden. Die maximale Durchlaufzeit eines Auftrags durch Rüstzyklusbildung beträgt somit:

$$ZDL_{\max,j} = ZDL_{RA,\max,j} + ZDL_{B,j}$$

$$= \frac{1 - BA(TZU_j) + RZL(TZU_j) - AM_{i,j}}{LA} + \frac{BA(TZU_j)}{LA} = \frac{1 + RZL(TZU_j) - AM_{i,j}}{LA} \quad (4-41)$$

ZDL _{max,j}	maximale Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
ZDL _{RA,max,j}	maximale, reihenfolgebedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
ZDL _{B,j}	Bestandsbedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
BA(TZU _j)	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
RZL(TZU _j)	Länge des Rüstzyklus, der zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j beginnt, in Anzahl Aufträgen [-]
AM _{i,j}	Auflagemenge der Rüstfamilie i von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
LA	Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Die maximale Durchlaufzeit hängt also von der Rüstzykluslänge ab. Wie bei den Reihenfolgeabweichungen gilt auch bei der Durchlaufzeit der Zusammenhang: Je länger der Rüstzyklus und je geringer die Auflagemenge einer Rüstfamilie ist, desto höher ist die maximal mögliche Durchlaufzeit. Die Durchlaufzeit von Exotenfamilien ist tendenziell höher als die von Rennerfamilien.

Auch diese Gleichung gilt nur für einzelne Aufträge mit spezifischen Werten für die Rüstzykluslänge, Auflagemenge der Rüstfamilie und Leistung des Arbeitssystems. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um das Modell zur Planung bzw. Prognose der maximalen Durchlaufzeit zu nutzen: Einerseits können Unternehmen für jede Rüstfamilie eine maximale Durchlaufzeit bestimmen. In diesem Fall erfolgt die Berechnung basierend auf einer mittleren Rüstzykluslänge, der mittleren Auflagemenge der jeweiligen Rüstfamilie und der mittleren Leistung:

$$ZDL_{\max,m,i} = \frac{1 + RZL_m - AM_{m,eff,i}}{LA_m} \quad (4-42)$$

ZDL _{max,m,i}	maximale Durchlaufzeit eines Auftrags der Rüstfamilie i im Standardrüstzyklus [BKT]
RZL _m	mittlere Rüstzykluslänge in Anzahl Aufträgen [-]
AM _{m,eff,i}	mittlere, effektive Auflagemenge der Rüstfamilie i in Anzahl Aufträgen [-]
LA _m	mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Andererseits kann arbeitssystemspezifisch die maximale Durchlaufzeit bestimmt werden. Die Berechnung der maximalen Durchlaufzeit erfolgt dann mit der mittleren Rüstzykluslänge, der minimalen Auflagemenge und der mittleren Leistung:

$$ZDL_{\max,m} = \frac{1 + RZL_m - AM_{\min,eff}}{LA_m} \quad (4-43)$$

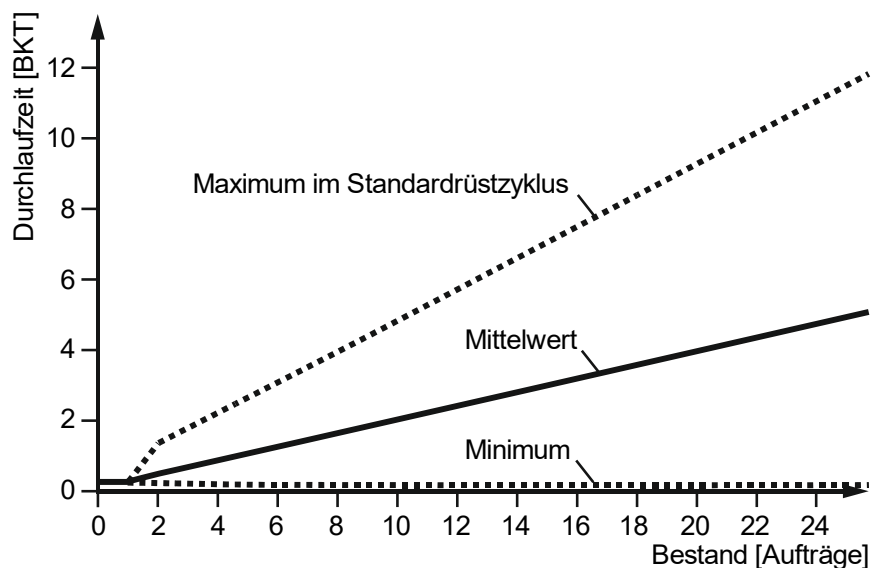
$ZDL_{\max,m}$	maximale Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus [BKT]
RZL_m	mittlere Rüstzykluslänge in Anzahl Aufträgen [-]
$AM_{\min,eff}$	minimale, effektive Auflagemenge in Anzahl Aufträgen [-]
LA_m	mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Die Rüstfamilie mit der geringsten Auflagemenge ist die mit dem geringsten Anteil. Aufträge dieser Rüstfamilie erfahren tendenziell die längste Wartezeit und damit auch die längste Durchlaufzeit.

Die Gleichungen 4-42 und 4-43 beschreiben die maximale Durchlaufzeit in einem Standardrüstzyklus mit einer mittleren Rüstzykluslänge und mittleren Auflagemengen. Die so berechneten Werte entsprechen somit der mittleren maximalen Durchlaufzeit. Inwieweit diese Werte eine gute Abschätzung für die maximale Durchlaufzeit darstellen, hängt davon ab, wie stark die Rüstzyklen in einem speziellen Anwendungsfall von diesem Standard abweichen.

Darstellung der Durchlaufzeitkennzahlen als Kennlinie

Abbildung 4-14 zeigt die Kennzahlen Mittelwert, Minimum und Maximum der Durchlaufzeit in Abhängigkeit des Bestands.



13978

Abbildung 4-14. Durchlaufzeitkennlinien bei Rüstzyklusbildung

Dabei sinkt das Minimum bei höheren Beständen leicht, da die Leistung durch weniger große Rüstvorgänge steigt. Das Maximum der Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus steigt proportional zum Bestand an. Dabei steigt auch die absolute Abweichung vom Mittelwert mit dem Bestand an. Höhere Bestände führen also nicht nur zu einer höheren mittleren Durchlaufzeit, sondern auch zu höheren Abweichungen vom Mittelwert.

4.5 Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange

Mit der zuvor beschriebenen Modellierung lässt sich der Einfluss der Rüstzyklusbildung auf die Leistung und die Streuung der Durchlaufzeiten beschreiben. Der Zielkonflikt besteht allerdings auch weiterhin. Die Rüstzyklusbildung mit erschöpfender Fertigung der Rüstfamilien führt zu besonders stark schwankenden Durchlaufzeiten. Aus diesem Grund stellt dieser Abschnitt eine einfache Abwandlung der Rüstzyklusbildung vor, die auch bei schwankenden Beständen eine systematische logistische Positionierung ermöglichen soll.

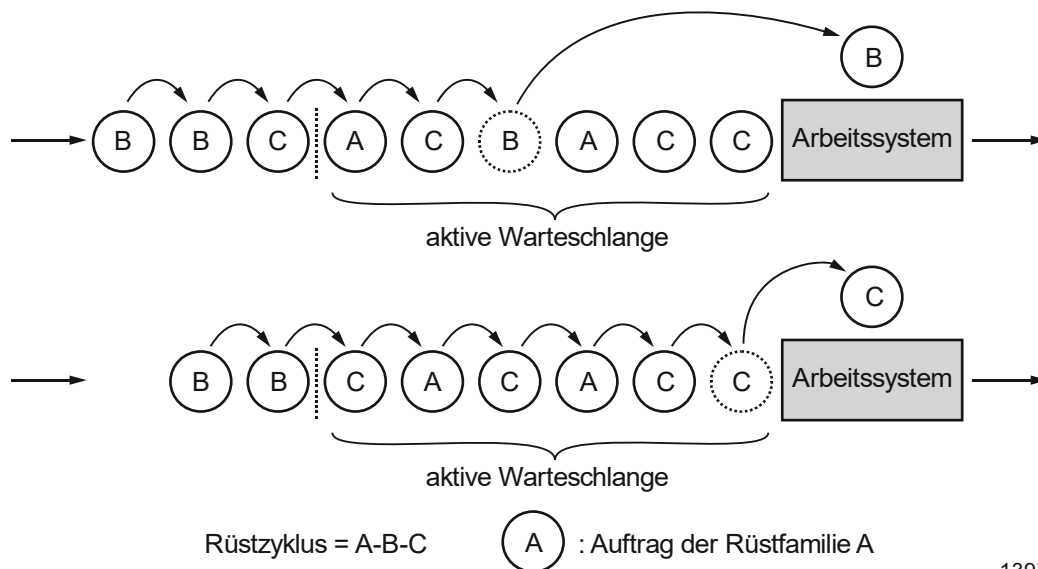
Abschnitt 4.5.1 stellt das alternative Verfahren zur rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung vor. Die darauf folgenden Abschnitte erläutern, wie diese Erweiterung die Leistung (Abschnitt 4.5.2) und die Durchlaufzeit (Abschnitt 4.5.3) beeinflusst.

4.5.1 Einführung

Bei der Rüstzyklusbildung mit erschöpfender Fertigung der Rüstfamilien ist der Bestand die einzige Stellgröße, um die logistischen Zielgrößen zu beeinflussen. Der Bestand am Arbeitssystem regelt dabei nicht nur die Auslastung, sondern auch die Auflagemengen und damit die Leistungssteigerung. Der Bestand beeinflusst zudem nicht nur die mittleren Durchlaufzeiten, sondern auch die Reihenfolgeabweichungen und damit die Streuung der Durchlaufzeiten.

Liegt ein konstantes Bestandsniveau am Arbeitssystem vor, so können die erwartete Leistung sowie die erwarteten Durchlaufzeitstreuungen bei der Rüstzyklusbildung vorhergesagt werden. Häufig kann der Bestand an einem einzelnen Arbeitssystem jedoch nicht konstant gehalten werden. Je nach Höhe der Bestandsschwankungen variieren dann sowohl die Leistung als auch die mittleren und maximalen Durchlaufzeiten. Eine einfache Abwandlung der Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange soll in diesem Fall helfen, den Einfluss der Bestandsschwankungen auf die Rüstzykluslänge einzugrenzen.

Abbildung 4-15 zeigt das Prinzip der Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange. In der Abbildung sind die Aufträge in der Warteschlange vorm Arbeitssystem nach ihrer Dringlichkeit sortiert. Der dringendste Auftrag liegt dabei direkt vor dem Arbeitssystem. Die Länge der aktiven Warteschlange beträgt in dem Beispiel sechs Aufträge. Dies bedeutet, dass nur aus den dringendsten sechs Aufträgen in der Warteschlange rüstzeitoptimal gebündelt wird.



13979

Abbildung 4-15. Prinzip der Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange

Im oberen Bildteil fertigt das Arbeitssystem einen Auftrag der Rüstfamilie B. Die Aufträge in der Warteschlange rücken anschließend jeweils einen Platz in der Dringlichkeit vor, sodass ein weiterer Auftrag der Rüstfamilie C in der aktiven Warteschlange liegt. Es liegen zwar Aufträge der Rüstfamilie B in der Warteschlange vor, diese bleiben jedoch unberücksichtigt, da sie sich nicht unter den sechs dringendsten Aufträgen befinden.

Einerseits rüstet das Arbeitssystem so früher auf die Rüstfamilie C um als bei der erschöpfenden Fertigung aus der gesamten Warteschlange. Aufträge der Rüstfamilie C erreichen so eine geringere Durchlaufzeit. Andererseits fallen mehr Rüstaufwände an, da bereits auf Rüstfamilie C umgerüstet wird, obwohl noch Aufträge der Rüstfamilie B in der Warteschlange vorliegen. Diese Reihenfolgebildung hat somit sowohl Vorteile als auch Nachteile für die logistischen Zielgrößen, die in den folgenden Abschnitten im Detail beschrieben werden.

4.5.2 Modellierung der Leistung

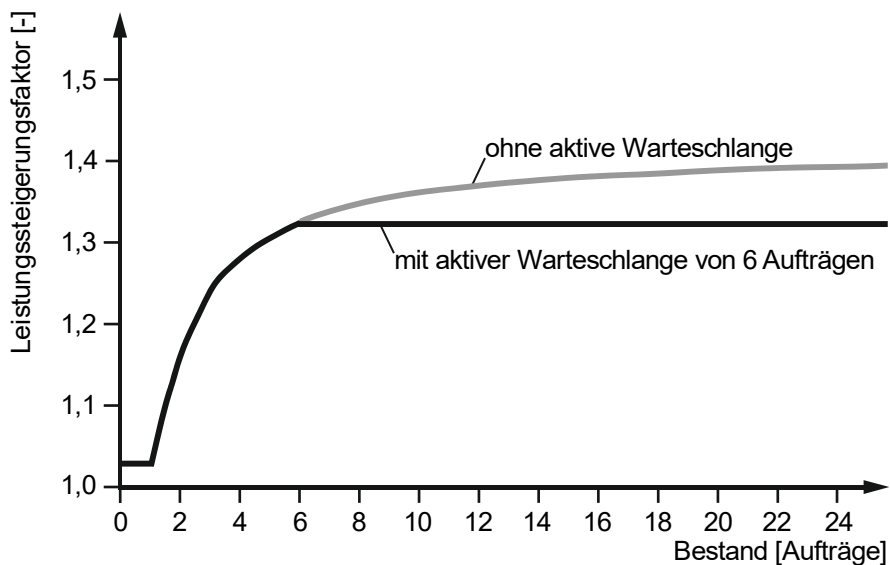
Die Leistungssteigerung des Arbeitssystems verhält sich bei der Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange solange identisch zur klassischen Rüstzyklusbildung, bis die Warteschlange länger als die aktive Warteschlange ist. Ab diesem Punkt steigt die Leistung nicht weiter an und verbleibt auf dem Wert für die aktive Warteschlange. Für den Leistungssteigerungsfaktor bei der Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange gilt somit:

$$LSF_{m,AS}(BA_m) = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_{m,i} \cdot AM_{m,i}(BA_m)}{\sum_{i=1}^n ZAU_{m,i} \cdot AM_{m,i}(BA_m) - \sum_{i=1}^n \Delta Rüst_{m,i}(BA_m)}, \text{ falls } BA_m \leq k \quad (4-44)$$

$$LSF_{m,AS}(BA_m) = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_{m,i} \cdot AM_{m,i}(k)}{\sum_{i=1}^n ZAU_{m,i} \cdot AM_{m,i}(k) - \sum_{i=1}^n \Delta Rüst_{m,i}(k)} \quad , \text{ falls } BA_m > k \quad (4-45)$$

$LSF_{m,AS}(BA_m)$	mittlerer Leistungssteigerungsfaktor des Arbeitssystems in Abhängigkeit des Bestands [-]
$ZAU_{m,i}$	mittlere Auftragszeit eines Auftrags der Rüstfamilie i bei großem Rüstvorgang [Std]
$AM_{m,i}(BA_m)$	mittlere Auflagemenge der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-]
$\Delta Rüst_{m,i}(BA_m)$	mittlere, eingesparte Rüstaufwände der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands [Std]
n	Anzahl Rüstfamilien
k	Länge der aktiven Warteschlange [-]

Abbildung 4-16 stellt dar, wie der Leistungssteigerungsfaktor für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien bei einer aktiven Warteschlange von sechs Aufträgen verläuft. Ab einem Bestand von sechs Aufträgen wird keine Leistungssteigerung mehr erreicht. Der Leistungssteigerungsfaktor beträgt für alle Bestände über sechs Aufträgen 1,32.

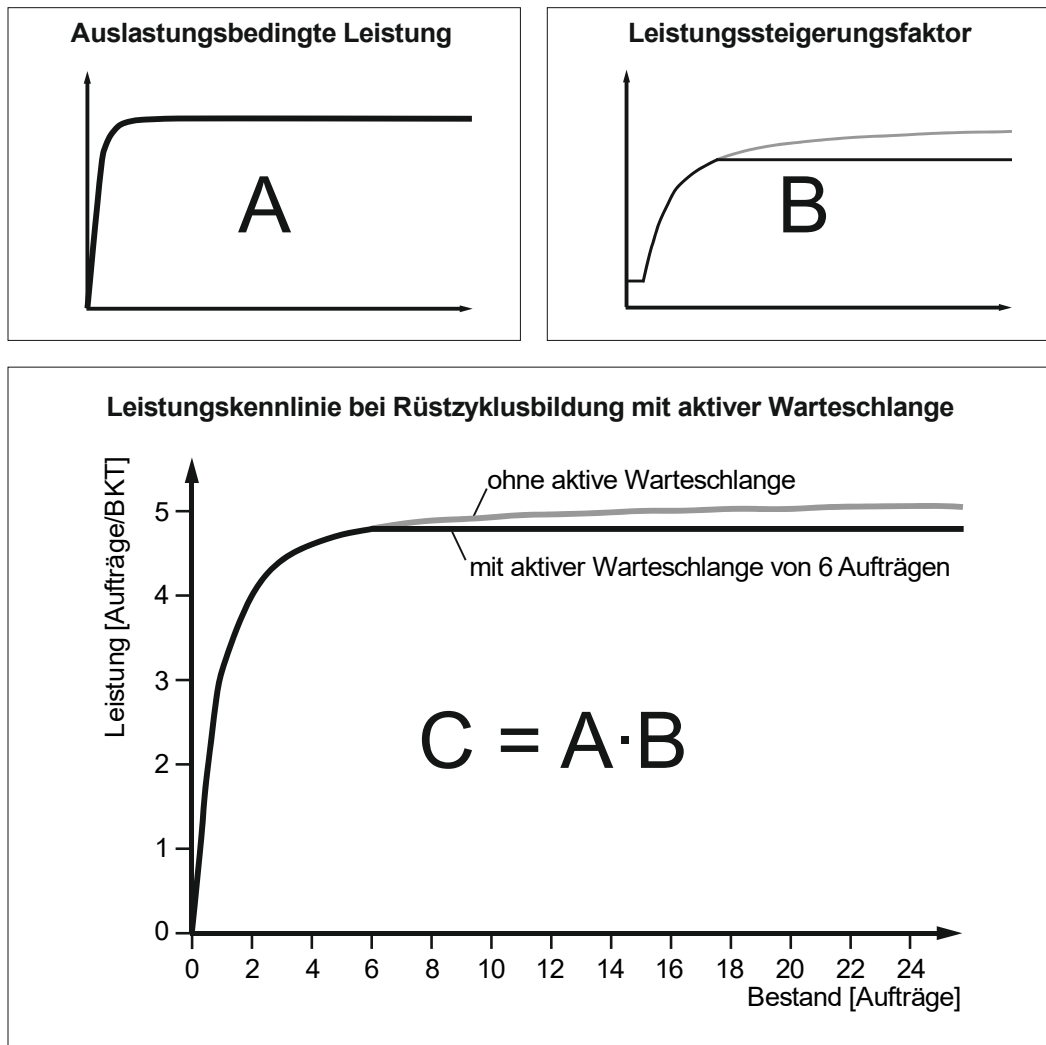


13980

Abbildung 4-16. Leistungssteigerungsfaktor bei Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange

Die Leistungskennlinie wird wie in Abschnitt 4.3.4 bestimmt und unterscheidet sich nicht von der Rüstzyklusbildung ohne aktive Warteschlange. Sie ergibt sich aus dem Produkt der auslastungsbedingten Leistung und dem Leistungssteigerungsfaktor für jeden Bestandspunkt. Abbildung 4-17 zeigt die Kennlinie mit aktiver Warteschlange. Dabei verbleibt die Leistung ab einem Bestand über der Länge der aktiven Warteschlange auf dem Wert der aktiven Warteschlange. Übersteigt der Bestand den Wert

der aktiven Warteschlange, ist die Leistungssteigerung also geringer als bei der Rüstzyklusbildung mit erschöpfender Fertigung aus der gesamten Warteschlange.



13981

Abbildung 4-17. Leistungskennlinie bei Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange

4.5.3 Modellierung der Durchlaufzeit

Der Vorteil der aktiven Warteschlange soll sich aus ihrem Einfluss auf die Streuung der Durchlaufzeit ergeben. Im Vergleich zur erschöpfenden Fertigung ändert sich lediglich die Modellierung des schlechtestmöglichen Falls, also für den maximalen Abgangsrang bzw. die maximale Reihenfolgeabweichung.

Dabei entspricht der Abgangsrang zum Zugangszeitpunkt eines Auftrags dem Zugangsrang abzüglich des Bestands. Im Gegensatz zur erschöpfenden Fertigung rückt der Auftrag zunächst bis in die aktive Warteschlange vor. Bei einem Bestand von 10 Aufträgen mit einer aktiven Warteschlange von 6 Aufträgen, rückt er also 4 Aufträge

vor, um in die aktive Warteschlange zu gelangen (10 Aufträge im Bestand – 6 Aufträge in der aktiven Warteschlange). Im schlechtestmöglichen Fall rückt der Auftrag also genau dann in die aktive Warteschlange vor, wenn gerade auf die im Rüstzyklus folgende Rüstfamilie umgerüstet wurde. Er wartet dann einen Rüstzyklus abzüglich der Auflagemenge der eigenen Rüstfamilie und wird dann als nächstes bearbeitet. Für den maximalen Abgangsrank ergibt sich bei der Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange also:

$$\begin{aligned} RgAAB_{\max,j} &= RgAZU_j - BA(TZU_j) + BA(TZU_j) - k + RZL(TZU_j) - AM_{i,j} + 1 \\ &= RgAZU_j - k + RZL(TZU_j) - AM_{i,j} + 1 \quad \text{für } BA(TZU_j) \geq k \end{aligned} \quad (4-46)$$

$$RgAAB_{\max,j} = RgAZU_j - BA(TZU_j) + RZL(TZU_j) - AM_{i,j} + 1 \quad \text{für } BA(TZU_j) < k \quad (4-47)$$

$RgAAB_{\max,j}$	maximaler Abgangsrank von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$RgAZU_j$	Zugangsrank von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$BA(TZU_j)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
k	Länge der aktiven Warteschlange in Anzahl Aufträgen [-]
$RZL(TZU_j)$	Länge des Rüstzyklus, der zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j beginnt in Anzahl Aufträgen [-]
$AM_{i,j}$	Auflagemenge der Rüstfamilie i von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Nach Gleichung 4-29 resultiert hieraus für die maximale Reihenfolgeabweichung durch Rüstzyklusbildung:

$$RAA_{\max,j} = RZL(TZU_j) - AM_{i,j} + 1 - k \quad \text{für } BA(TZU_j) \geq k \quad (4-48)$$

$$RAA_{\max,j} = 1 - BA(TZU_j) + RZL(TZU_j) - AM_{i,j} \quad \text{für } k > BA(TZU_j) > 2 \quad (4-49)$$

$$RAA_{\max,j} = 0 \quad \text{für } BA(TZU_j) \leq 2 \quad (4-50)$$

$RAA_{\max,j}$	maximale Reihenfolgeabweichung von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
$RZL(TZU_j)$	Länge des Rüstzyklus, der zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j beginnt in Anzahl Aufträge [-]
$AM_{i,j}$	Auflagemenge der Rüstfamilie i von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
k	Länge der aktiven Warteschlange in Anzahl Aufträgen [-]
$BA(TZU_j)$	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Entsprechend Gleichung 4-28 ergibt sich für die maximale, reihenfolgebedingte Durchlaufzeit eines Auftrags also:

$$ZDL_{RA,\max,j} = \frac{RZL(TZU_j) - AM_{i,j} + 1 - k + BA(TZU_j)}{LA} \quad \text{für } BA(TZU_j) \geq k \quad (4-51)$$

$$ZDL_{RA,\max,j} = \frac{1 + RZL(TZU_j) - AM_{i,j}}{LA} \quad \text{für } k > BA(TZU_j) > 2 \quad (4-52)$$

$$ZDL_{RA,\max,j} = 0 \quad \text{für } BA(TZU_j) \leq 2 \quad (4-53)$$

$ZDL_{RA,\max,j}$	maximale, reihenfolgebedingte Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
-------------------	---

RZL(TZU _j)	Länge des Rüstzyklus, der zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j beginnt in Anzahl Aufträgen [-]
AM _{i,j}	Auflagemenge der Rüstfamilie i von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
k	Länge der aktiven Warteschlange in Anzahl Aufträgen [-]
LA	Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]
BA(TZU _j)	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]

Analog zu Gleichung 4-36 ergibt sich die maximale Durchlaufzeit aus der Summe der maximalen, reihenfolgebedingten Durchlaufzeit und der bestandsbedingten Durchlaufzeit. Die maximale Durchlaufzeit eines Auftrags durch Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange beträgt somit:

$$ZDL_{\max,j} = \frac{RZL(TZU_j) - AM_{i,j} + 1 - k + BA(TZU_j)}{LA} \quad \text{für } BA(TZU_j) \geq k \quad (4-54)$$

$$ZDL_{\max,j} = \frac{1 + RZL(TZU_j) - AM_{i,j}}{LA} \quad \text{für } k > BA(TZU_j) > 2 \quad (4-55)$$

$$ZDL_{\max,j} = \frac{BA(TZU_j)}{LA} \quad \text{für } BA(TZU_j) \leq 2 \quad (4-56)$$

ZDL _{max,j}	maximale Durchlaufzeit von Auftrag j [BKT]
BA(TZU _j)	Bestand zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
RZL(TZU _j)	Länge des Rüstzyklus, der zum Zugangszeitpunkt von Auftrag j beginnt in Anzahl Aufträgen [-]
AM _{i,j}	Auflagemenge der Rüstfamilie i von Auftrag j in Anzahl Aufträgen [-]
k	Länge der aktiven Warteschlange in Anzahl Aufträgen [-]
LA	Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]

Analog zu Gleichung 4-43 kann auch für die Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange die maximale Durchlaufzeit für einen Standardrüstzyklus basierend auf mittleren Rüstzykluslängen und mittleren Auflagemengen prognostiziert werden.

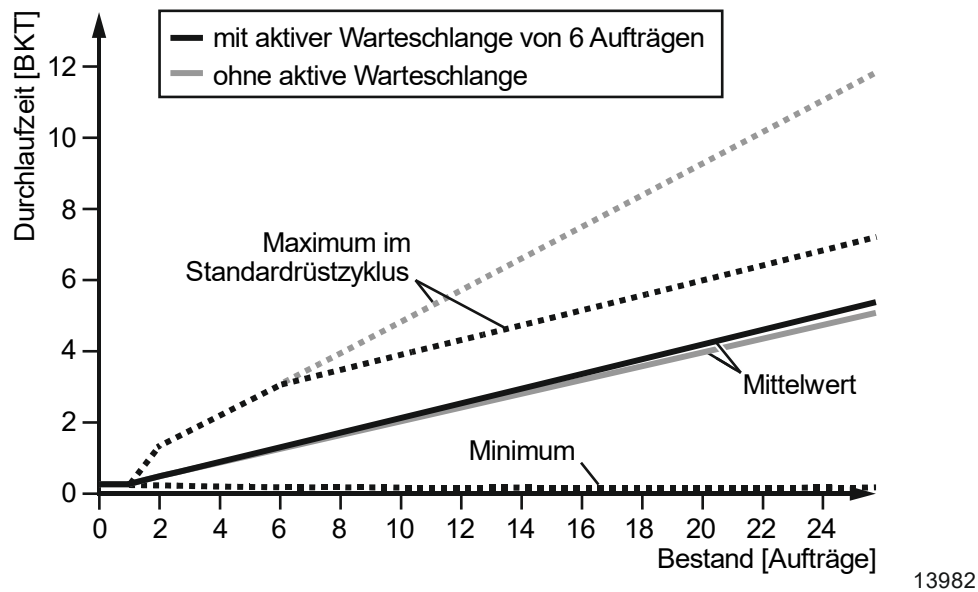


Abbildung 4-18. Durchlaufzeitkennlinien bei Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange

Abbildung 4-18 zeigt die Durchlaufzeitkennlinien für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien und eine aktive Warteschlange von 6 Aufträgen. Dabei erhöht sich die maximale Durchlaufzeit nur noch um die bestandsbedingte Durchlaufzeit. Der Abstand zwischen mittlerer und maximaler Durchlaufzeit bleibt ab einem Bestand von 6 Aufträgen konstant. Aufgrund der leicht geringeren Leistung durch die Begrenzung der Bündelung auf die 6 dringendsten Aufträge (siehe Abbildung 4-17) ist die mittlere Durchlaufzeit leicht höher als für den Fall ohne aktive Warteschlange.

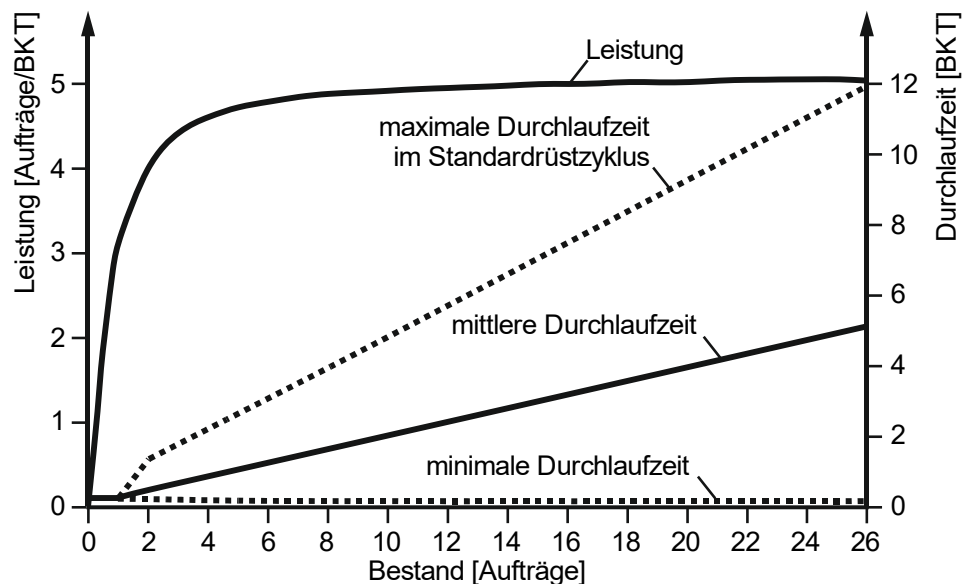
4.6 Fazit zur Modellierung

Die vorgestellte Modellierung beschreibt den Einfluss reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten auf die Durchlaufzeit und die Leistung. Die Grundlage ist eine rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung, die Rüstfamilien erschöpfend fertigt, Aufträge innerhalb der Familien nach Plan-Endtermin priorisiert und die nächste Rüstfamilie über einen festgelegten Rüstzyklus auswählt.

Die Eingangsgrößen des Modells sind der Anteil der Rüstfamilien, die Bearbeitungszeiten sowie eine Rüstzeitmatrix. Die einzige Annahme für die Anwendung ist, dass jede Rüstfamilie genau einmal pro Rüstzyklus aufgelegt wird. Folgende wesentliche Erkenntnisse lassen sich aus der Modellierung ableiten:

1. Das Leistungssteigerungspotenzial hängt von der Differenz zwischen großen und kleinen Rüstzeiten ab.
2. Die Leistungssteigerung verläuft degressiv.
3. Die maximale Durchlaufzeit für den Standardrüstzyklus mit mittleren Rüstzykluslängen und Auftragsmengen ist näherungsweise linear zum Bestand.

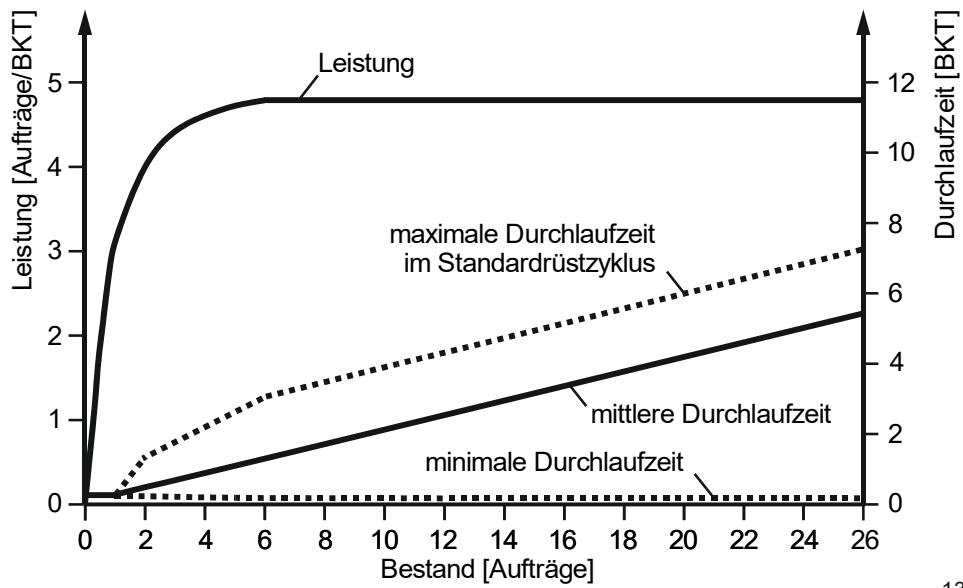
Abbildung 4-19 fasst die Ergebnisse anhand des Beispiels mit den drei Rüstfamilien zusammen. Die Abbildung visualisiert den Zielkonflikt, den die rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung verursacht: Die Leistung verläuft zwar degressiv. Durch die Vermeidung von großen Rüstvorgängen kann jedoch auch bei hohen Beständen die Leistung noch weiter gesteigert werden als dies an Arbeitssystemen ohne reihenfolgeabhängige Rüstzeiten möglich wäre. Die mittlere und auch die maximale Durchlaufzeit erhöhen sich dagegen oberhalb des Übergangsbereichs näherungsweise linear mit dem Bestand. Die minimale Durchlaufzeit bleibt nahezu konstant. Der Abstand zwischen der minimalen und der maximalen Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus erhöht sich mit steigendem Bestand, was auf eine zunehmende Streuung der Durchlaufzeit hinweist. Eine hohe Leistung geht also zu Lasten einer möglichen höheren Abweichung von der mittleren Durchlaufzeit.



13983

Abbildung 4-19. Leistung und Durchlaufzeit bei Rüstzyklusbildung

Eine Erweiterung der Rüstzyklusbildung soll die Streuung der Durchlaufzeit eingrenzen. Dafür wurde eine aktive Warteschlange eingeführt, die die rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung nur auf eine Anzahl der dringendsten Aufträge anwendet. Abbildung 4-20 zeigt den Verlauf der Leistung und der Durchlaufzeit bei Rüstzyklusbildung mit einer aktiven Warteschlange von sechs Aufträgen.



13984

Abbildung 4-20. Leistung und Durchlaufzeit bei Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange

Dabei wird ab einem Bestand von sechs Aufträgen keine weitere Leistungssteigerung erreicht. Die Abweichung von der mittleren Durchlaufzeit verbleibt jedoch auch auf dem Wert bei sechs Aufträgen. Bei einer aktiven Warteschlange ist also ein geringer Leistungsverlust zugunsten einer bedeutend geringeren Streuung der Durchlaufzeit gegenüber der Rüstzyklusbildung ohne aktive Warteschlange in Kauf zu nehmen.

5 Evaluation der Modellierung

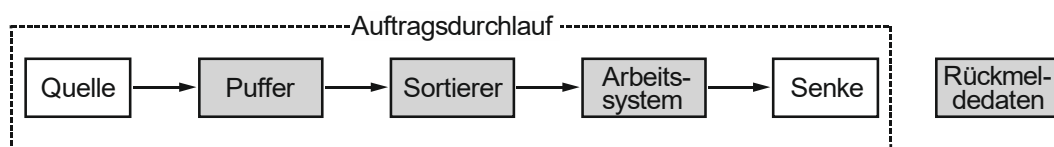
Das mathematische Modell in Kapitel 4 quantifiziert den Einfluss einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen Leistung und Durchlaufzeit. Dabei wurde das Modell zur Vorhersage des Einflusses deduktiv ermittelt. Einen Beitrag zur Wissenschaft leistet das Modell allerdings erst dann, wenn die Vorhersagen in realitätsnahen Untersuchungen bestätigt werden können. Ziel dieses Kapitels ist es daher, die Gültigkeit des Modells für die Praxis anhand geeigneter Untersuchungen nachzuweisen und seine Grenzen aufzuzeigen. Die Evaluation erfolgt hierbei anhand einer Simulation, die unter Beachtung der VDI-Richtlinie 3633 zur „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“ durchgeführt wird.

Abschnitt 5.1 beschreibt das Simulationsmodell, das zur Untersuchung der Modellierung genutzt wird. Die Verifikation und Validierung des Simulationsmodells zeigt der darauf folgende Abschnitt 5.2. Hiermit soll sichergestellt werden, dass die Simulation die Realität in ausreichender Genauigkeit abbildet. Abschnitt 5.3 stellt dar, welche Parameter variiert werden und wie viele Versuche zur Evaluierung der Modelle durchgeführt werden. Die Güte des Modells zur Abbildung des Einflusses der Rüstzyklusbildung auf die Leistung und die Durchlaufzeit diskutieren die Abschnitte 5.4 und 5.5. Das Fazit in Abschnitt 5.6 fasst die Ergebnisse der Evaluation zusammen.

5.1 Beschreibung der Evaluationsumgebung

Die Modellierung wird mithilfe eines ereignisgesteuerten Simulationsmodells evaluiert. Eine Simulation hat dabei den Vorteil, dass keine riskanten sowie zeit- und kostenintensiven Eingriffe in den Betriebsablauf eines Unternehmens erforderlich sind. Zudem ist es einfach, mehrere Varianten mit wenig Arbeitsaufwand und das Systemverhalten über lange Zeiträume zu untersuchen (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 9 f.).

Abbildung 5-1 zeigt die wichtigsten Bausteine des Simulationsmodells. Anhand dieser Bausteine sowie ihrer Eigenschaften und Funktionen soll der Aufbau des Simulationsmodells im Folgenden erläutert werden.



13985

Abbildung 5-1. Aufbau des Simulationsmodells

Quelle. Die Quelle erzeugt Aufträge und simuliert hierdurch den Zugang zum Arbeitssystem. In dem Modell ist der Abstand zwischen den Erzeugungszeitpunkten von zwei

Aufträgen einstellbar. Dieser Abstand entspricht der Zwischenankunftszeit der Aufträge am Arbeitssystem. Die Zwischenankunftszeit kann dabei entweder konstant sein oder über eine Verteilung festgelegt werden.

Bei ihrer Erzeugung erhalten die Aufträge die Attribute *Rüstfamilie*, *Bearbeitungszeit* und *Auftragszeit*. Die *Rüstfamilie* wird dem Auftrag zufällig entsprechend einer vorgegebenen prozentualen Verteilung der Rüstfamilien zugewiesen. Die Aufträge erhalten entsprechend einer definierten Verteilung eine *Bearbeitungszeit*. Die *Auftragszeit* ergibt sich aus der Summe der Bearbeitungszeit und der großen Rüstzeit des Auftrags. Die große Rüstzeit entspricht der Rüstzeit, die für einen großen Rüstvorgang anfallen würde, wenn die Rüstfamilien in der Reihenfolge des Rüstzyklus bearbeitet werden. Sowohl der Rüstzyklus als auch eine Rüstzeitmatrix werden dem Modell vorgegeben, sodass die Zeit für einen großen Rüstvorgang aus der Rüstmatrix entnommen werden kann.

Puffer. Mithilfe des Puffers wird eine bestandsregelnde Auftragsfreigabe nach Conwip simuliert. Er puffert die Aufträge, falls eine definierte Bestandsobergrenze überschritten wird und gibt Aufträge frei, sobald die Bestandsobergrenze unterschritten wird. In den Versuchen ohne bestandsregelnde Auftragsfreigabe überspringen Aufträge den Puffer und werden direkt zum Erzeugungszeitpunkt in den Sortierer umgelagert.

Sortierer. Der Sortierer stellt die Warteschlange vor dem Arbeitssystem dar. Der Zugangszeitpunkt eines Auftrags zum Sortierer entspricht dem Zugangszeitpunkt zum Arbeitssystem (TBEV). Der Sortierer ordnet die Aufträge entsprechend ihrer Rüstfamilie. Ist das Arbeitssystem frei, so wird der Auftrag mit der höchsten Priorität entsprechend der angewendeten Reihenfolgeregel aus dem Sortierer auf das Arbeitssystem umgelagert.

Arbeitssystem. Das Arbeitssystem bearbeitet immer nur einen Auftrag zur gleichen Zeit. Zur Festlegung der Rüstzeit greift der Baustein auf eine Methode zur Bestimmung der Rüstzeit zu. Entsprechend des vorherigen Auftrags gibt diese Methode die Rüstzeit aus der Rüstzeitmatrix zurück. Die Bearbeitungszeit wird dem Attribut *Bearbeitungszeit* des Auftrags entnommen.

Senke. Alle bearbeiteten Aufträge gehen der Senke zu. Der Zugang zur Senke stellt den Zeitpunkt der Fertigstellung des Auftrags dar (TBE).

Rückmeldedaten. Zur Auswertung der Versuche werden Attribute sowie die Zeitpunkte unterschiedlicher Ereignisse eines Auftrags in einer Tabelle im Simulationsmodell aufgenommen. Diese Tabelle kann anschließend exportiert werden, um die Versuche in einer Tabellenkalkulation oder Datenbank detailliert auszuwerten. Folgende Daten werden in die Tabelle aufgenommen:

- ID (eindeutige, laufende Nummer für jeden Auftrag)
- Auftragszeit (Vorgabezeit bestehend aus Bearbeitungs- und großer Rüstzeit in Std)
- Rüstfamilie
- TBEV (Zeitpunkt, zu dem Auftrag dem Sortierer zugeht im Format TT.MM.JJJJ hh:mm)
- TBE (Zeitpunkt, zu dem Auftrag der Senke zugeht im Format TT.MM.JJJJ hh:mm)

5.2 Verifikation und Validierung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wird entsprechend der VDI 3633 verifiziert und validiert. Die Verifikation soll dabei die formale Korrektheit des Modells sicherstellen. Die Validierung überprüft, inwieweit das Modell die Realität korrekt abbildet. Dies soll gewährleisten, dass die Simulation ein Arbeitssystem in einer realen Fertigung möglichst gut abbildet. Besonders wichtig ist dabei, wie Zufallsgrößen im Simulationsmodell abgebildet werden (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 37).

Verifikation

Prüfung der Syntax. Der Compiler des Simulationsprogramms stellt sicher, dass die Syntax des Quellcodes korrekt ist. Syntaxfehler können daher ausgeschlossen werden.

Strukturiertes Durchgehen. Durch strukturiertes Durchgehen des Quellcodes sowie der Funktionsweise der Simulation gemeinsam mit Simulationsexperten konnten Fehler im Simulationsmodell vermieden werden.

Grenzwerttests. Die Simulation wurde mit unterschiedlichen Grenzwerten für Eingabeparameter getestet, da die logistische Zielerreichung für Grenzwerte leichter vorhergesagt werden kann. Hierfür wurde das Modell mit nur einer Rüstfamilie getestet. In diesem Fall verhält es sich wie ein Arbeitssystem ohne reihenfolgeabhängige Rüstzeiten. Dabei wurde ein ideales Szenario mit konstanten Beständen getestet, die mit einer Conwip umgesetzt wurden (vgl. Abbildung 5-2a). Außerdem wurde ein Szenario ohne Conwip mit normalverteilten Zwischenankunftszeiten und einer hohen Bestandsstreuung simuliert (vgl. Abbildung 5-2b).

Dabei zeigt der Vergleich der simulierten Werte mit den Prognosen der Kennlinientheorie, dass sich das Modell erwartungsgemäß verhält: Die Conwip-Steuerung mit konstanten Beständen bildet die ideale Leistungskennlinie ab. Ohne Conwip-Steuerung ergibt sich durch die Bestandsstreuung ein Kennlinienverlauf, bei dem im Überlast- und Übergangsbereich Auslastungsverluste auftreten.

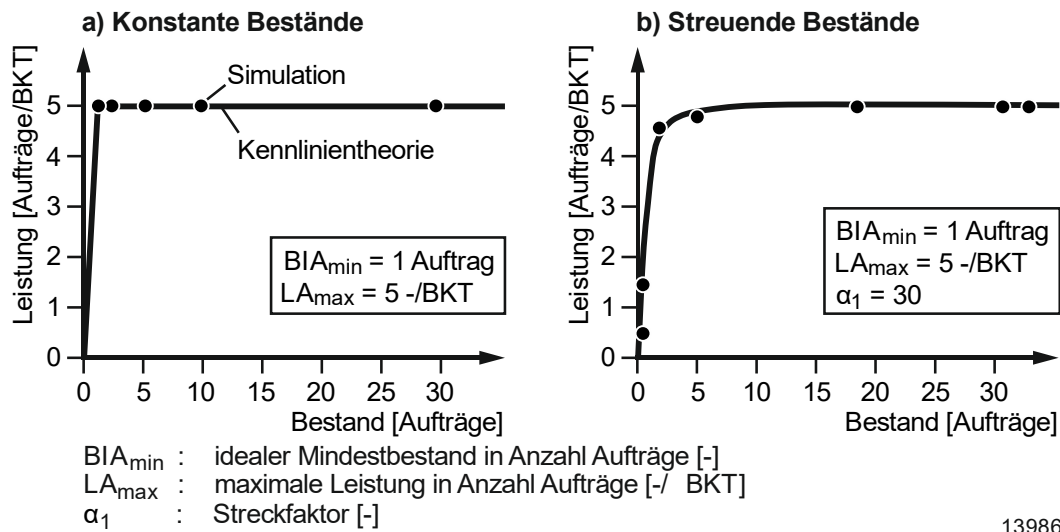


Abbildung 5-2. Grenzwerttest zur Verifikation des Simulationsmodells

Validierung

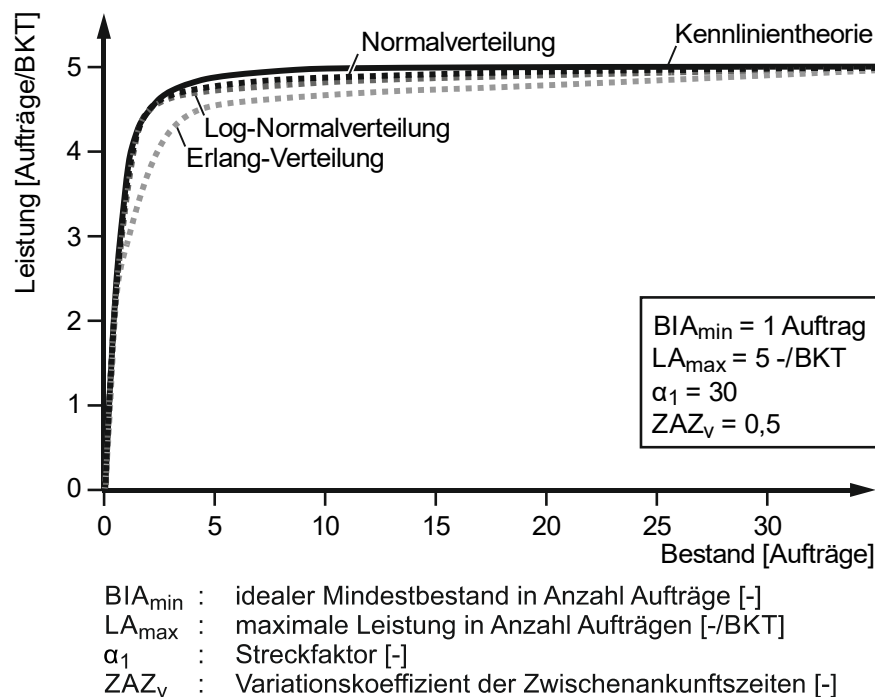
Prüfung der Eingabedaten. Die Eingabedaten des Simulationsmodells sind Zwischenankunftszeiten, Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten und Anteile der Rüstfamilien. Folgend wird kurz beschrieben, wie sichergestellt wird, dass die Eingabedaten die Realität in geeigneter Weise widerspiegeln.

Zur Festlegung einer Verteilung der Zwischenankunftszeiten wurden verschiedene Datensätze aus der Industrie ausgewertet. Ein charakteristischer Verlauf ist eine Normalverteilung mit einem definierten Maximalwert ohne negative Werte. Innerhalb der Simulation wurden unterschiedliche Verteilungen, die diese Charakteristik abbilden, getestet. Das Ergebnis zeigt Abbildung 5-3.

Die Kennlinien stellen die Ergebnisse von Simulationsläufen mit einer Rüstfamilie und logarithmisch normalverteilten, normalverteilten sowie Erlang-verteilten Zwischenankunftszeiten gegenüber. Bei allen Verteilungen wurde in der Simulation ein Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeiten von 0,5 vorgegeben. Die Kennlinie mit normalverteilten Zwischenankunftszeiten weist die geringsten Abweichungen von der modellierten Kennlinie nach Nyhuis und Wiendahl (2012) auf.

Ziel ist es, die Leistungssteigerung durch rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung zu validieren. Normalverteilte Zwischenankunftszeiten lassen sich gut mit der Kennlinientheorie von Nyhuis und Wiendahl abbilden, sodass man sich auf die Abweichungen fokussieren kann, die die neuen Modelle betreffen. In den Evaluationsversuchen gilt daher die Annahme normalverteilter Zwischenankunftszeiten.

Um realistische Annahmen für die Bearbeitungszeit treffen zu können, wurden ebenfalls Datensätze aus der Industrie ausgewertet. Auch die Bearbeitungszeiten folgen einer Normalverteilung mit Maximalwert ohne negative Werte. Es gilt daher die Annahme von normalverteilten Bearbeitungszeiten.



13987

Abbildung 5-3. Einfluss der Verteilung der Zwischenankunftszeiten auf die Leistungskennlinie

Rüstzeiten sind im Simulationsmodell über eine Rüstzeitmatrix festgelegt. Rüstzeiten sind dabei nicht zufällig, sondern von der Reihenfolge der Aufträge abhängig.

Die Anteile der Rüstfamilien werden vorgegeben, jedoch wird jedem Auftrag zufällig eine Rüstfamilie zugewiesen. Auch diese Annahme bildet die Realität ab, da das Simulationsmodell eine Auftragsfertigung im Werkstattprinzip abbildet. Die Aufträge werden also im Wesentlichen in der Reihenfolge der Kundenbestellung in die Fertigung gegeben und nicht entsprechend des Produkttyps gebündelt.

Einstellung des Anfangszustands. In einem realen Arbeitssystem befindet sich zu jedem Zeitpunkt eine gewisse Anzahl an Aufträgen in der Warteschlange bzw. in Bearbeitung. Dieser Zustand wird in den Versuchen durch einen Simulationsvorlauf hergestellt. Der Vorlauf bleibt in der Auswertung später unberücksichtigt. Das Ende des Vorlaufs ist durch das Erreichen eines geplanten Auslastungswerts bestimmt.

Implementierung von Störgrößen. Ein Vorteil der Simulation ist, dass man Störgrößen nach Belieben ein- und ausblenden kann. Bestandsstreuungen stellen in der vorliegenden Modellierung eine Störgröße dar. Diese werden über das Ein- bzw. Ausschalten der Conwip-Steuerung in der Simulation berücksichtigt. Eine weitere Störgröße ist die Schwankung der Anteile der Rüstfamilien in der Warteschlange. Dies wird in allen Versuchen berücksichtigt, indem die Simulation jedem Auftrag zum Zugangszeitpunkt zufällig eine Rüstfamilie zuweist. Auf weitere Störgrößen wird in den Versuchen verzichtet.

Statistische Sicherheit. In jedem Simulationslauf wird der Durchlauf von mindestens 9.000 Aufträgen simuliert. Der Simulationszeitraum liegt je nach Eingabedaten zwischen 4 und 10 Jahren, sodass zwischen 1.460 und 3.650 Betriebskalendertage ausgewertet werden. Bei der Auswertung werden sowohl Mittelwerte als auch Streuungen betrachtet.

5.3 Versuchsplanung

Das Ziel der Versuche ist es, die Modellierung mit unterschiedlichen Parameterkombinationen zu evaluieren. Abbildung 5-4 zeigt die Parameter, die untersucht werden, mit den jeweiligen Ausprägungen.

Parameter	Ausprägung			
Bestandsstreuung	keine	gering	mittel	hoch
Anzahl Rüstfamilien	3		9	
Aufteilung der Rüstfamilien	homogen		inhomogen	
Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten	nur zwischen Aufträgen		zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	
Reihenfolgebildung	Rüstzyklusbildung		Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange	

13988

Abbildung 5-4. Versuchsplan

Die Parameter leiten sich aus den Variablen bzw. Eingangsparametern der Modellierung ab. Der Bestand ist die wesentliche Stellgröße für die Berechnung der Leistungssteigerung und die Streuung der Durchlaufzeit. Die Erwartung ist daher, dass sich eine *Bestandsstreuung* auch auf diese Zielgrößen bzw. auf die Prognosegüte der Modellierung auswirkt. Sowohl die *Anzahl der Rüstfamilien* als auch die *Aufteilung der Rüstfamilien* beeinflussen die Anteile der einzelnen Rüstfamilien (p_i). Die Anteile der Rüstfamilien sind wiederum eine wesentliche Eingangsgröße zur Berechnung der Auftragsmengen und somit eine wesentliche Eingangsgröße zur Berechnung der logistischen Zielgrößen. Je nach *Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten* unterscheidet sich die Rüstzeitmatrix: Sind Rüstzeiten nur zwischen den Aufträgen reihenfolgeabhängig, existiert nur eine große Rüstzeit je Rüstfamilie unabhängig davon, welche Rüstfamilie zuvor gefertigt wurde. Bei Reihenfolgeabhängigkeit zwischen Aufträgen und Rüstfamilien unterscheiden sich die großen Rüstzeiten je nachdem, welche Rüstfamilie zuvor gefertigt wurde. Es werden beide Fälle untersucht, da eine Rüstfamilie im Rüstzyklus übersprungen werden kann, falls von dieser keine Aufträge in der Warteschlange vorliegen. Je nach Rüstzeitmatrix kann dies dann zu anderen Rüstaufwänden führen als

durch das Modell prognostiziert. Zudem werden die zwei unterschiedlichen Verfahren zur rüstzeitoptimalen *Reihenfolgebildung* untersucht, die jeweils in Kapitel 4 modelliert werden.

Bearbeitungszeiten folgen in allen Versuchen der gleichen Verteilung mit einem Mittelwert von 270 Minuten und einem Variationskoeffizienten von 0,1. Rüstzeiten sind deterministisch über Rüstzeitmatrizen festgelegt. Die kleinen Rüstzeiten liegen zwischen 4 und 20 Minuten, die großen Rüstzeiten im Rüstzyklus zwischen 80 und 190 Minuten.⁸

Für jede Kombination dieser Parameter werden 15 Versuche mit unterschiedlichen mittleren Beständen bzw. Auslastungen durchgeführt, sodass die Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinie evaluiert werden kann. In Summe ergeben sich also 96 Faktorstufenkombinationen. Für Versuche mit Bestandssteuerung wird eine Zielauslastung vorgegeben. In Versuchen ohne Bestandssteuerung wird ein Bestandswert vorgegeben. Der Fokus liegt auf Bestandsniveaus im Übergangs- und Überlastbereich, da diese Bereiche für die Praxis besonders relevant sind. In den Simulationsreihen wird entsprechend einer Sensitivitätsanalyse jeweils nur ein Parameter verändert.

5.4 Evaluation des Modells für die Leistung

Dieser Abschnitt zeigt die Ergebnisse der Simulationsversuche und stellt diese den Modellierungsergebnissen gegenüber. Zunächst wird die grundsätzliche Güte des Modells überprüft sowie der Einfluss der Parameter auf die Güte. Um die Modellgüte zu bewerten, wird der Betrag der prozentualen Abweichung berechnet, um den der vom Modell vorhergesagte Wert vom Messwert abweicht, der sich aus den Simulationsversuchen ergibt. Die Betragsbildung verhindert, dass sich positive und negative Abweichungen aufheben. Der Einfluss der Parameter wird jeweils ausgehend von einem Referenzszenario untersucht, das im ersten Abschnitt erläutert wird. In diesem Kapitel werden nur ausgewählte Versuchsreihen diskutiert, die sich besonders zur Analyse der Einflüsse der Parameter eignen. Die Ergebnisse aller 96 Versuchsreihen sind im Anhang aufgeführt.

5.4.1 Referenzszenario

Das Referenzszenario ist definiert durch einen Prozess, bei dem der Einfluss der dynamischen Stellgrößen möglichst gering ist. Abbildung 5-5 zeigt die Ausprägung der Parameter für das Referenzszenario.

⁸ Die Rüstzeitmatrizen aus den Versuchen sind im Anhang in den Abbildungen A-1 bis A-5 abgebildet.

Parameter	Ausprägung			
Bestandsstreuung	keine	gering	mittel	hoch
Anzahl Rüstfamilien	3	9		18
Aufteilung der Rüstfamilien	homogen		inhomogen	
Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten	nur zwischen Aufträgen		zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	
Reihenfolgebildung	Rüstzyklusbildung		Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange	

13989

Abbildung 5-5. Ausprägung der Parameter für das Referenzszenario

Ein Prozess ohne Bestandsstreuung ermöglicht es, den Einfluss schwankender Bestände auszuschließen. In der Simulation wird der Bestand über eine Auftragsfreigabe nach Conwip realisiert. Erst wenn die Bestandsgrenze einen definierten Wert unterschreitet, geht ein neuer Auftrag dem Arbeitssystem zu. In den 15 Simulationsversuchen wird diese Bestandsgrenze schrittweise erhöht. Für Bestände im Bereich von weniger als 15 Aufträgen sind die Schrittweiten kleiner als bei höheren Beständen, da die Leistungsgewinne in diesem Bereich besonders hoch sind. Die Conwip-Steuerung regelt den Bestand an nur einem Arbeitssystem, sodass das Verhalten des simulierten Prozesses analog zum idealen Produktionsprozess ist (siehe Abschnitt 2.2.4). Die Kennlinie zur Modellierung der auslastungsbedingten Leistung entspricht daher der idealen Produktionskennlinie. Ab einem Bestand, der dem idealen Mindestbestand entspricht, liegt also eine Auslastung von 100% vor.

Die Aufträge teilen sich homogen auf die 9 Rüstfamilien auf, sodass jede Rüstfamilie einen Anteil von etwa 11% am Gesamtauftragsspektrum hat. Die Rüstzeitmatrix im ausgewählten Szenario stellt Abbildung 5-6 dar.

Wechsel von nach	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0,3	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
B	2,5	0,2	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
C	2,5	2,0	0,2	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
D	2,5	2,0	1,7	0,3	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
E	2,5	2,0	1,7	2,8	0,1	3,2	2,3	1,3	2,1
F	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	0,3	2,3	1,3	2,1
G	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	0,2	1,3	2,1
H	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	0,1	2,1
I	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	0,2

13990

Abbildung 5-6. Rüstzeitmatrix mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten zwischen Aufträgen

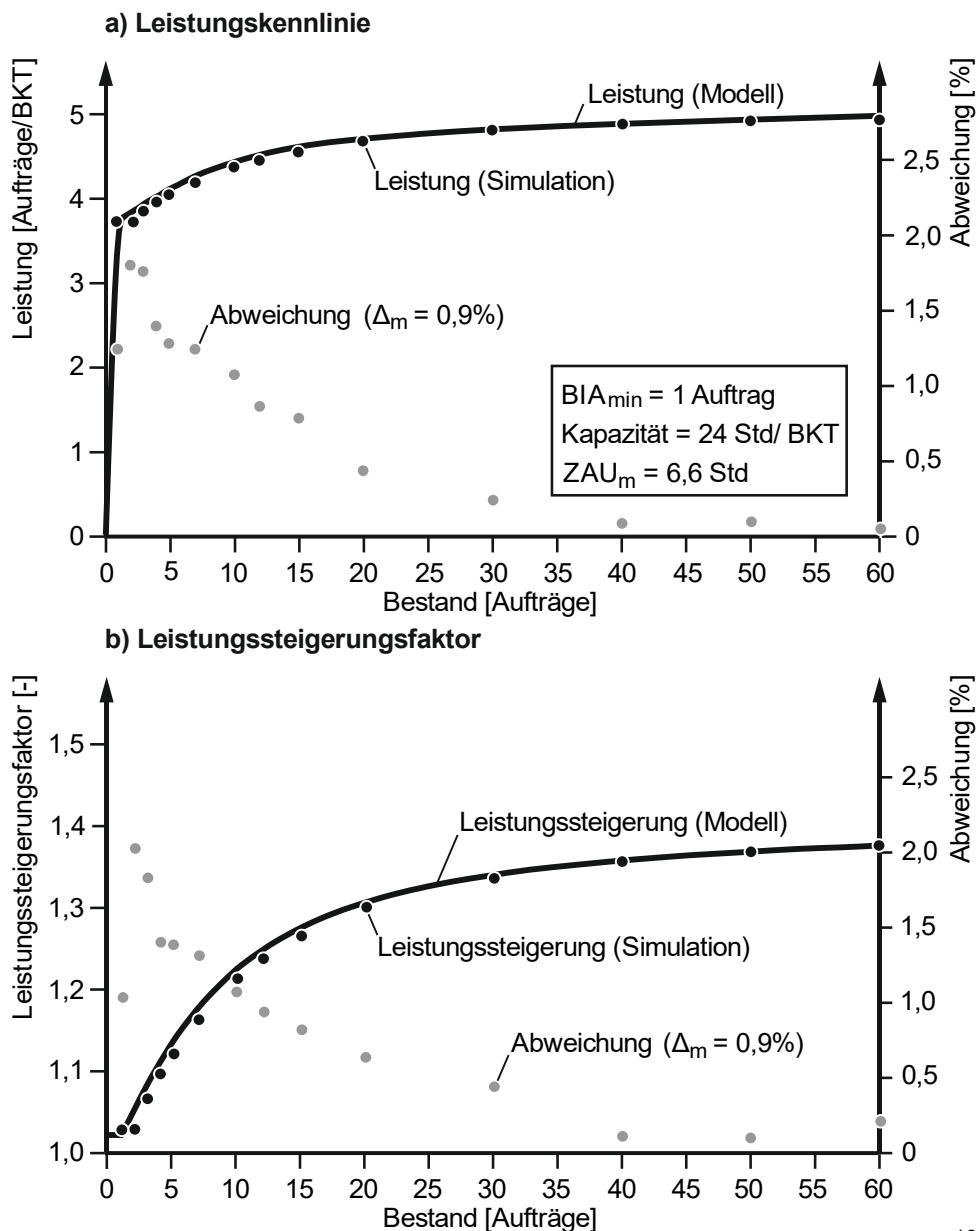
Für das Referenzszenario wird ein Fall gewählt, in dem nur die Reihenfolge der Aufträge die Rüstzeiten beeinflusst, nicht aber die Reihenfolge der Rüstfamilien. Eine Abweichung vom Rüstzyklus verändert also nicht die großen Rüstzeiten. So kann der Einfluss der Auftragsbündelung auf die Leistungssteigerung untersucht werden, ohne dass Rüstverluste durch die Abweichung vom Rüstzyklus betrachtet werden müssen.

Abbildung 5-7 stellt die Ergebnisse der Simulation den Modellierungsergebnissen gegenüber.⁹ Der obere Bildteil zeigt die Evaluation der Leistungskennlinien, der untere Bildteil zeigt den Leistungssteigerungsfaktor. Das Modell berücksichtigt dabei den Effekt von leeren Rüstfamilien (siehe Abschnitt 4.3.5).

Die Leistung weicht im Mittel um 0,9% von der Modellierung ab, mit der höchsten Abweichung von 2,0% für einen Bestand von 2 Aufträgen. Die Abweichungen verursacht die Abweichung des Leistungssteigerungsfaktors (siehe Abbildung 5-7b). Auch dieser weist im Mittel eine Abweichung von etwa 0,9% auf.

Die Abweichungen können größtenteils durch die Konfiguration einer Auftragsfreigabe nach Conwip erklärt werden. Diese führt dazu, dass erst ab einem Bestand von 3 Aufträgen eine Reihenfolgebildung durchgeführt werden kann, da in diesem Fall 2 Aufträge in der Warteschlange und einer in Bearbeitung sind. Dieser Effekt kann auch beim Leistungssteigerungsfaktor beobachtet werden, da dieser für einen Bestand von 1 und 2 Aufträgen konstant ist und erst ab 3 Aufträgen eine Steigerung erkennbar ist.

⁹ Abbildung A-17 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 9 (Referenzszenario) dar.



13991

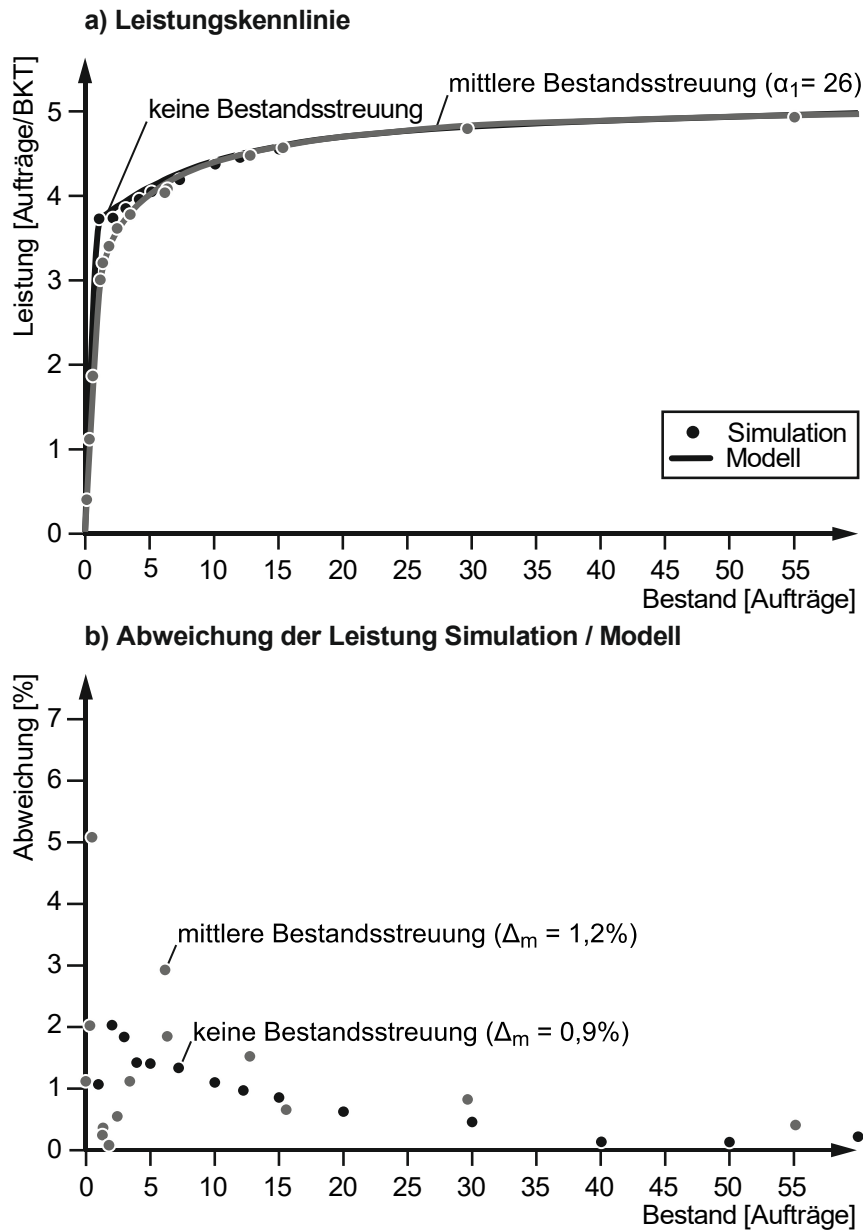
Abbildung 5-7. Evaluation der Leistungsprognose für das Referenzszenario

Insgesamt weicht die simulierte Leistung jedoch kaum von der Modellierung ab. Insbesondere für relevante Bestandsbereiche von mehr als 5 Aufträgen weicht die Simulation nur gering von der Modellierung ab, sodass das Modell als valide beurteilt werden kann.

5.4.2 Einfluss der Bestandssteuerung

Der Einfluss der Bestandssteuerung wird anhand des Beispiels mit den 9 Rüstfamilien aus dem Referenzversuch evaluiert. Dafür ist im Simulationsmodell eine sofortige Auf-

tragsfreigabe implementiert. Aufträge gehen dem Arbeitssystem direkt nach ihrer Erzeugung zu. Der Bestand wird über die Anpassung der mittleren Zwischenankunftszeiten und einen Anfangsbestand im Arbeitssystem geregelt.

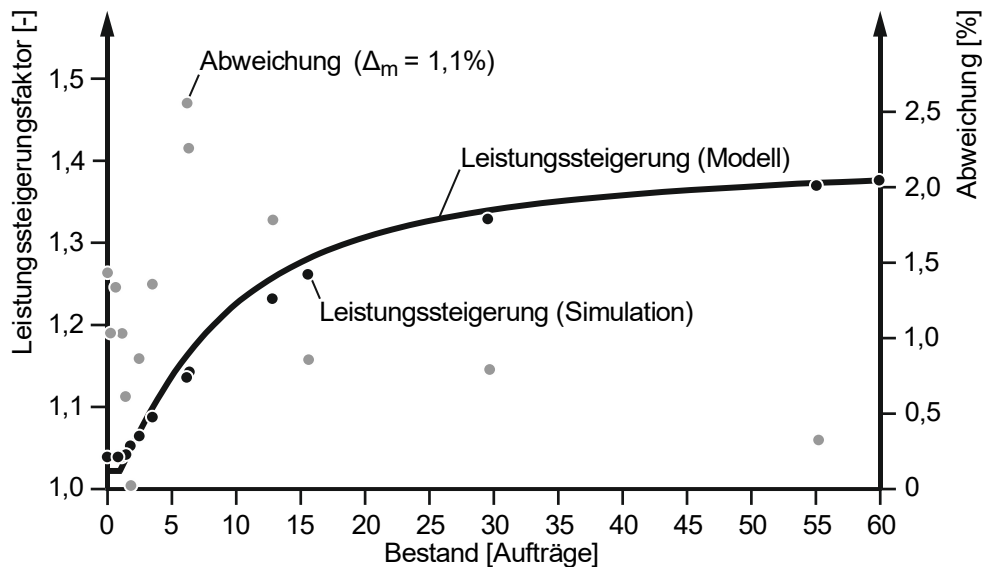


13992

Abbildung 5-8. Einfluss der Bestandsstreuung auf die Leistungsprognose

Abbildung 5-8 zeigt den Einfluss einer mittleren Bestandsstreuung auf die Modellierungsgüte und stellt diesen den Ergebnissen des Referenzversuchs ohne Bestandsstreuung gegenüber. Der Variationskoeffizient des Bestands in Anzahl Aufträge ist hierbei das Maß zur Beurteilung der Bestandsstreuung.¹⁰

Der Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit beträgt 0,5. Infolgedessen schwankt der Bestand in den Simulationsversuchen mit einem Variationskoeffizienten zwischen 0,2 und 0,8 um den Mittelwert. Bei einer mittleren Bestandsstreuung weicht die simulierte Leistung im dargestellten Beispiel durchschnittlich um 1,2% von der Modellierung ab. Bei einer mittleren Leistung von 4,5 Aufträgen pro Tag bedeutet dies, dass die Leistung um 0,05 Aufträge vom modellierten Wert abweicht. Weitere Versuche haben bestätigt, dass die Abweichung sich erhöht, je höher die Bestandsstreuung ist. Die Abweichung liegt im Wesentlichen an der Überschätzung der Leistungssteigerung durch das Modell. Abbildung 5-9 zeigt den Einfluss der Bestandsstreuung auf die Prognose des Leistungssteigerungsfaktors.



13993

Abbildung 5-9. Einfluss der Bestandsstreuung auf die Prognose des Leistungssteigerungsfaktors

Dabei liegen die simulierten Werte leicht unter der Prognose: Streut der Bestand in etwa normalverteilt um den Mittelwert, so sind die Leistungsverluste bei einer negativen Abweichung höher als die Leistungsgewinne bei einer positiven Abweichung. Im Mittel liegt die Leistungssteigerung dann unter der Prognose für den Bestandsmittelwert.

¹⁰ Abbildung A-65 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 57 (mittlere Bestandsstreuung) dar.

Sollte der Bestand hohen Streuungen unterliegen, so ist es sinnvoll, den Simulationszeitraum nicht als einen Betriebspunkt zu betrachten, sondern in kürzere Zeiträume zu unterteilen. Für diese kürzeren Zeiträume kann dann jeweils ein neuer mittlerer Bestand berechnet werden, für den sich eine neue mittlere Leistung auf Basis des Modells ergibt. Bis zu einem Variationskoeffizienten des Bestands von 0,3 hat sich das Modell jedoch als sehr genau erwiesen.

5.4.3 Einfluss der Anzahl der Rüstfamilien

Ausgehend vom Referenzszenario wird nun die Anzahl der Rüstfamilien variiert, um deren Einfluss auf die Validität des Modells zu untersuchen. Hierfür wird das Referenzszenario mit 9 Rüstfamilien den Versuchsergebnissen mit 3 sowie mit 18 Rüstfamilien gegenübergestellt. Abbildung 5-10 stellt die Ergebnisse der Versuche dar.¹¹ Der untere Bildteil zeigt die Abweichungen der Simulation von der Modellierung. Im oberen Bildteil sind die 3 Leistungskennlinien gegenübergestellt.

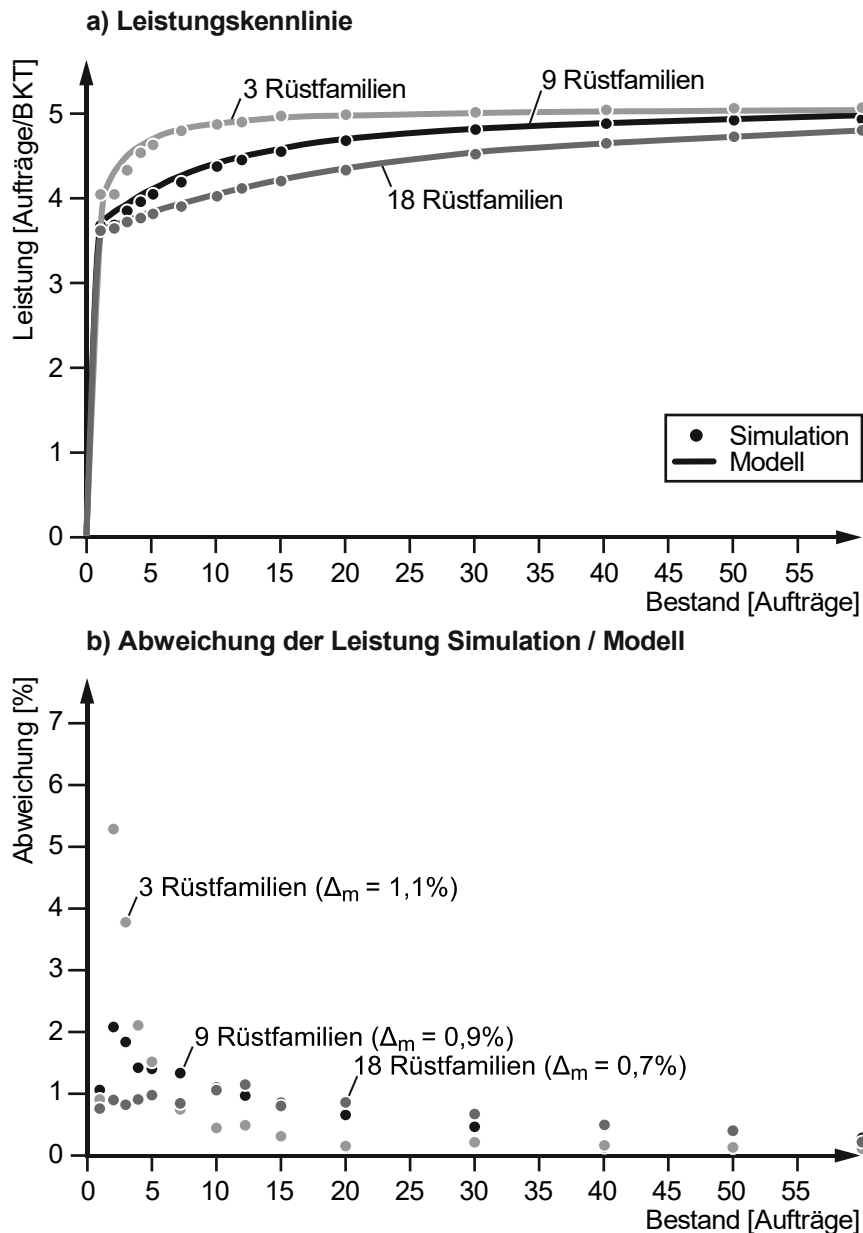
Die Abweichungen sind für ein Arbeitssystem mit 3 Rüstfamilien mit einem Mittelwert von 1,1% am höchsten. Bei einem Szenario mit 18 Rüstfamilien sind die Abweichungen mit einem Mittelwert von 0,7% am geringsten. Mit der Anzahl an Rüstfamilien nimmt also die Modellvalidität zu.

Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass mit einer geringeren Anzahl an Rüstfamilien bereits bei geringen Beständen ein hoher Leistungssteigerungseffekt durch Auftragsbündelung zu erzielen ist. Der bereits beim Referenzszenario beschriebene Effekt, dass bei konstanten Beständen erst ab einem Bestand von 3 Aufträgen Aufträge rüstzeitoptimal gebündelt werden können, hat in diesem Fall daher eine große Auswirkung. In der Simulation wird also bei niedrigen Beständen eine geringere Leistung erzielt als vom Modell prognostiziert. Korrigiert man die Werte um diesen Effekt, indem man die modellierte Kennlinie gedanklich um einen Auftrag nach rechts verschiebt, reduziert sich die mittlere Abweichung bei 3 Rüstfamilien auf 0,6%.

Je höher die Anzahl an Rüstfamilien ist, desto geringer ist die Leistungssteigerung bei niedrigen Bestandsniveaus. Die Abweichung der Simulation von der Modellierung ist daher geringer bei einer höheren Anzahl an Rüstfamilien.

Allgemein ist die Abweichung der Simulation vom Modell mit maximal 5,3% bei einem Szenario mit 3 Rüstfamilien und einem Bestand von 2 Aufträgen jedoch als gering zu bewerten. Besonders in relevanten Bestandsbereichen von mehr als 5 Aufträgen liefert das Modell unabhängig von der Anzahl der Rüstfamilien valide Ergebnisse für die Leistung.

¹¹ Abbildung A-9 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 (3 Rüstfamilien) und Abbildung A-25 die Ergebnisse der Versuchsreihe 17 (18 Rüstfamilien) dar.



13994

Abbildung 5-10. Einfluss der Anzahl Rüstfamilien auf die Leistungsprognose

5.4.4 Einfluss der Aufteilung der Rüstfamilien

Dieser Abschnitt soll zeigen, welchen Einfluss die Aufteilung der Rüstfamilien auf die Güte der Modellierung hat. Dabei teilen sich die Aufträge im Referenzszenario mit je etwa 11% homogen auf die Rüstfamilien auf. Diese Aufteilung wird mit einer inhomogenen Aufteilung verglichen, in der sich die Aufträge wie in Tabelle 5-1 auf die Rüstfamilien aufteilen.

78% der Aufträge gehören den Rennerfamilien A und E an. 22% der Aufträge teilen sich auf die restlichen 7 Rüstfamilien auf. Die Erwartung ist, dass die Leistungsgewinne bei inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien und niedrigen Beständen höher sind als bei homogener Aufteilung. Grund dafür ist, dass bei niedrigen Beständen viele Rüstfamilien leer sind, so dass häufig nur Aufträge der Rennerfamilien im Bestand vorliegen. Der Fall ähnelt also einem Arbeitssystem mit weniger Rüstfamilien.

Tabelle 5-1. Anteile der Rüstfamilien bei inhomogener Aufteilung

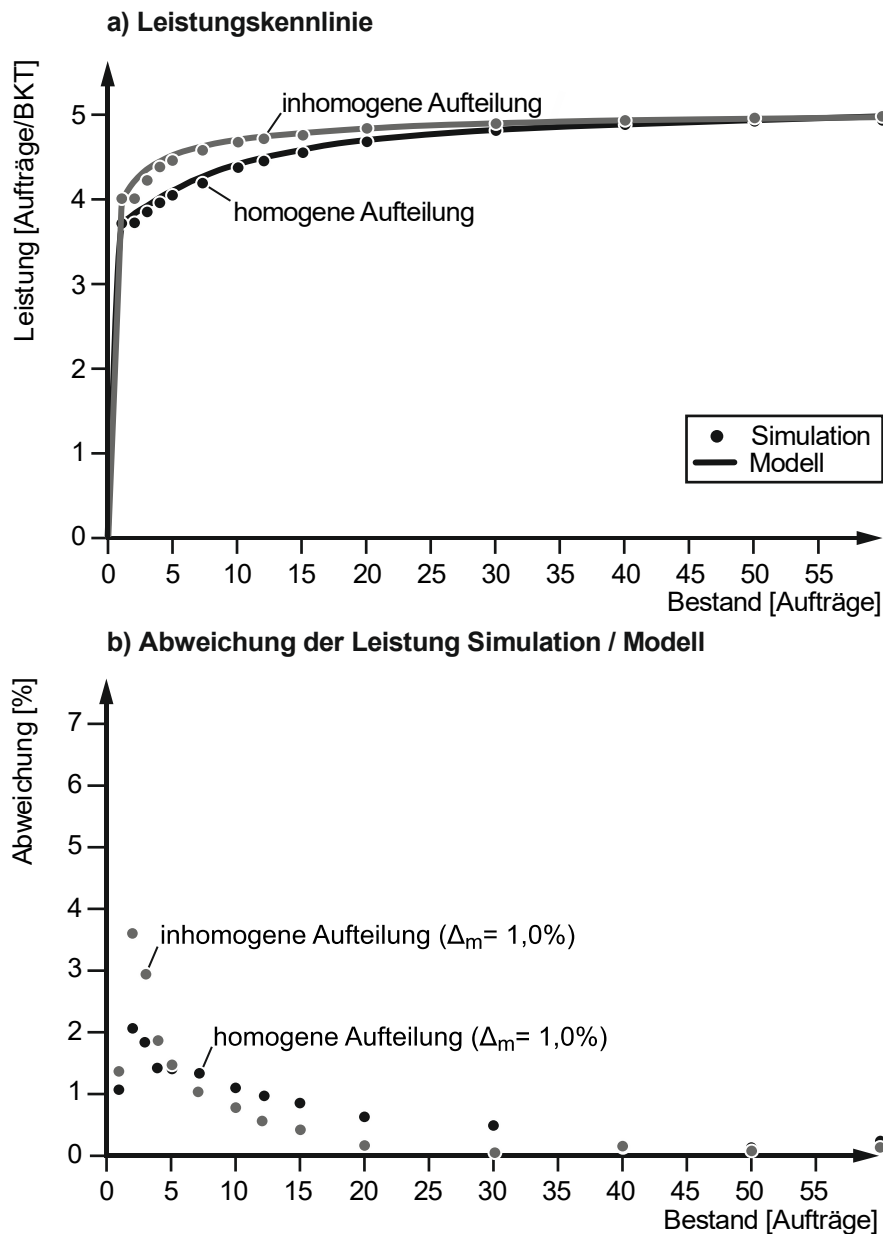
Rüstfamilie	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Anteil [%]	43,0	1,4	5,0	2,5	35,0	5,0	0,5	6,3	1,3

Abbildung 5-11 stellt die Ergebnisse der Simulationsreihe mit inhomogener Aufteilung dem Referenzszenario mit homogener Aufteilung der Rüstfamilien gegenüber.¹² Dabei liegt die mittlere Abweichung der Simulation von der Modellierung bei 1,0% genauso hoch wie bei der Simulation mit homogener Aufteilung. Lediglich bei einem Bestand von 2 Aufträgen liegt die Abweichung in diesem Fall mit 3,6% höher als im Referenzszenario.

Der Effekt, der zu einer Abweichung führt, ist der gleiche wie der bei einer geringen Anzahl von Rüstfamilien. Aufgrund des hohen Anteils der Rüstfamilien A und E können für diese Rüstfamilien bereits bei geringen Beständen viele Aufträge gebündelt und die Leistung stärker gesteigert werden als im Fall mit homogener Aufteilung. Die Leistungssteigerung verläuft daher erwartungsgemäß steiler als im Referenzszenario. Aufgrund der Auftragsfreigabe nach Conwip können in der Simulation jedoch erst ab 3 Aufträgen Reihenfolgevertauschungen vorgenommen werden. Die Abweichungen der Simulation von der Modellierung sind daher für geringe Bestände höher.

Aufgrund des steileren Verlaufs nähert sich die Kennlinie bei inhomogener Aufteilung der Aufträge auf die Rüstfamilien dem Maximalwert bereits bei geringeren Beständen an als im Vergleichsfall einer homogenen Aufteilung. Im Bereich ab 5 bis 20 Aufträgen ist die Abweichung daher sogar geringer als bei homogener Aufteilung. Das Modell liefert also auch bei inhomogener Aufteilung valide Ergebnisse für die Leistung.

¹² Abbildung A-21 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 13 (inhomogene Aufteilung) dar.



13995

Abbildung 5-11. Einfluss der Aufteilung der Rüstfamilien auf die Leistungsprognose

5.4.5 Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten

Ziel dieses Abschnitts ist es, den Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten auf die Modellierungsgüte zu untersuchen. Hierfür werden Versuche mit einer Rüstzeitmatrix wie in Abbildung 5-12 durchgeführt.

Wechsel von nach	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0,3	<u>2,0</u>	3,1	2,8	2,5	2,1	2,7	4,3	2,3
B	2,3	0,2	<u>1,7</u>	3,2	2,0	1,8	2,5	3,0	3,8
C	3,0	2,7	0,2	<u>2,8</u>	3,5	3,2	3,7	2,9	3,7
D	3,3	1,9	2,5	0,3	<u>1,5</u>	3,5	2,0	1,7	2,2
E	4,2	3,3	3,7	3,3	0,1	<u>3,2</u>	3,5	3,8	4,1
F	2,5	3,2	2,7	3,4	3,0	0,3	<u>2,3</u>	3,0	2,8
G	2,2	1,5	1,9	2,1	2,7	3,0	0,2	<u>1,3</u>	2,0
H	2,5	2,2	3,2	2,9	3,3	2,8	3,3	0,1	<u>2,1</u>
I	<u>2,5</u>	3,0	2,7	3,2	2,8	4,2	3,3	2,6	0,2

13996

Abbildung 5-12. Rüstzeitmatrix mit Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten zwischen Aufträgen und Rüstfamilien

Die Rüstzeiten im Rüstzyklus sind in der Matrix unterstrichen. Der Rüstzyklus wurde so ausgewählt, dass die Summe der großen Rüstzeiten minimal ist, so dass jede Abweichung von diesem Rüstzyklus zu höheren Rüstzeiten führt. Abbildung 5-13 stellt die großen Rüstzeiten im Referenzszenario den großen Rüstzeiten gegenüber, die bei Einhaltung des Rüstzyklus im Szenario aus Abbildung 5-12 anfallen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Summe
große Rüstzeiten im Referenzszenario	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	19,4
große Rüstzeiten bei Einhaltung des Rüstzyklus	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	19,4

13997

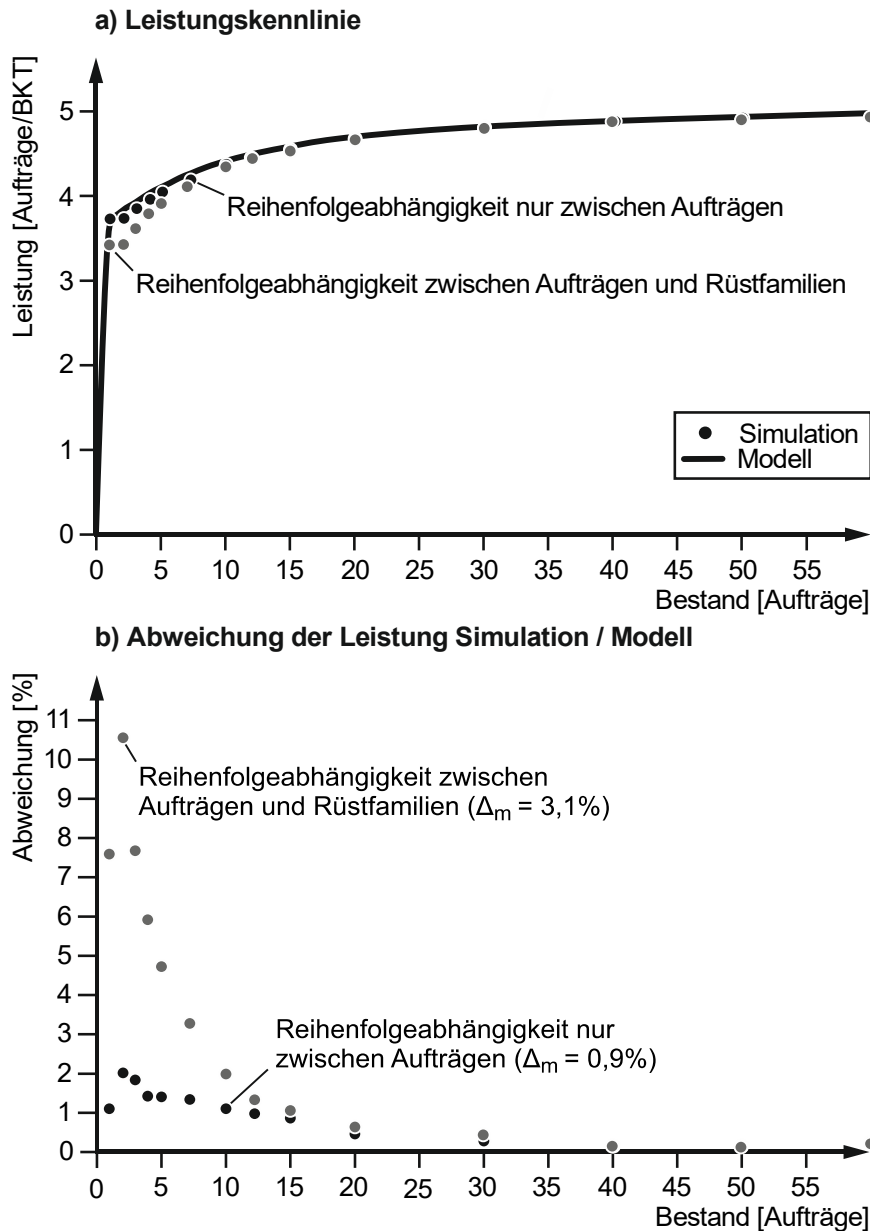
Abbildung 5-13. Große Rüstzeiten im Referenzszenario und große Rüstzeiten bei Einhaltung des Rüstzyklus im Szenario aus Abbildung 5-12

Die große Rüstzeit im vorgesehenen Rüstzyklus entspricht exakt dem Wert aus dem Referenzszenario, so dass sich die modellierten Leistungskennlinien in diesem besonderen Fall nicht vom Referenzszenario unterscheiden (vgl. Abbildung 5-14).

Die Ergebnisse der Versuche stellt Abbildung 5-14 dar.¹³ Der Fall mit Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten nur zwischen den Aufträgen (Referenzszenario) wird mit

¹³ Abbildung A-19 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 11 (Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten zwischen Aufträgen und Rüstfamilien) dar.

dem Fall mit Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten zwischen Aufträgen und Rüstfamilien verglichen. Im unteren Bildteil der Abbildung sind die Abweichungen für beide Fälle gegenübergestellt.



13998

Abbildung 5-14. Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten auf die Leistungsprognose

Die Abweichungen für den Fall mit Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten zwischen den Rüstfamilien sind im Bereich niedriger Bestände höher als im Referenzszenario. Im Mittel liegen die Abweichungen bei 3,1% mit dem höchsten Wert von 10,7% bei einem Bestand von 2 Aufträgen. Ein Teil dieser Abweichung lässt sich erneut durch den Effekt einer Conwip Auftragsfreigabe erklären. Dieser Anteil entspricht allerdings

der Abweichung im Referenzszenario, also etwa 2,0%. Die restlichen 8,7% der Abweichung entstehen durch die Abweichung vom Rüstzyklus bei niedrigen Bestandsniveaus. In der Modellierung wird angenommen, dass im schlechtesten Fall die großen Rüstzeiten entsprechend des Rüstzyklus für jeden Auftrag anfallen. Aufgrund der Abweichung vom Rüstzyklus dauern die Rüstvorgänge allerdings länger, da beispielsweise nicht von Rüstfamilie B auf C umgerüstet wird, sondern von Rüstfamilie B auf D, da kein Auftrag der Rüstfamilie C im Bestand vorliegt. Die große Rüstzeit beträgt dann nicht 1,7 sondern 3,2 Stunden.

Liegen höhere Bestandsniveaus vor, so wird der Rüstzyklus immer häufiger eingehalten, da seltener Rüstfamilien übersprungen werden. Die Abweichung der Simulationsergebnisse von der Modellierung sinkt dann auf das Niveau des Referenzszenarios. Entsprechend ist es bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten zwischen den Rüstfamilien besonders wichtig, den vorgesehenen Rüstzyklus einzuhalten.

Zusammenfassend hängt die Abweichung der Simulation von der Modellierung davon ab, wie hoch die Rüstzeiten abseits des Rüstzyklus sind und wie wahrscheinlich es ist, dass der Rüstzyklus nicht eingehalten wird. Mit höheren Beständen nimmt diese Wahrscheinlichkeit ab, sodass das Modell dann auch bei Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeit zwischen den Rüstfamilien valide Ergebnisse liefert. Mit Gleichung 4-20 kann man abschätzen, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, einen Rüstzyklus zu überspringen. Es ist daher voraussichtlich mit relativ geringem Aufwand möglich, auch diesen Effekt abzuschätzen.

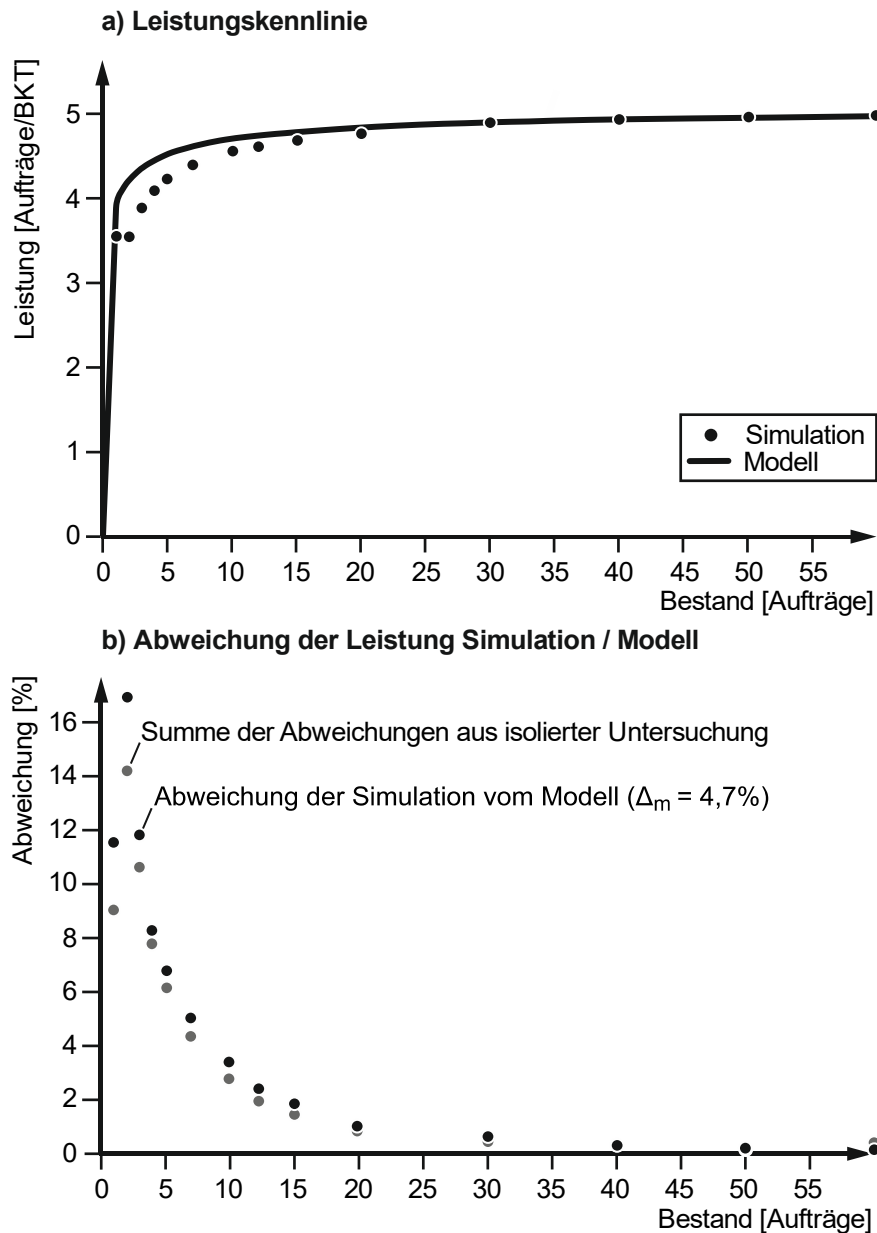
5.4.6 Überlagerung der Einflussgrößen

Die vorherigen Abschnitte stellen isoliert den Einfluss der Parameter auf die Modellierungsgüte dar. Die Untersuchung verschiedener Kombinationen der Parameter soll zeigen, ob Wechselwirkungen zwischen den Parametern bestehen.

Abbildung 5-15 zeigt die Ergebnisse einer Simulationsreihe mit Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten zwischen Aufträgen und Rüstfamilien und einer inhomogenen Aufteilung der Rüstfamilien.¹⁴ Der obere Bildteil stellt die Simulation dem Modell gegenüber. Im unteren Bildteil sind die Abweichungen dargestellt. Die grauen Punkte sind die Werte, die sich aus der Addition der Abweichungen aus den Versuchen nur mit Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten (Abschnitt 5.4.5) bzw. inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien (Abschnitt 5.4.4) ergeben.

¹⁴ Abbildung A-23 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 15 (Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten zwischen Aufträgen und Rüstfamilien in Kombination mit inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien) dar.

Die Abweichungen mit einem Mittelwert von 4,7% sind relativ hoch. Zudem sind die Abweichungen höher als die Summe der Abweichungen der einzelnen Effekte.



13999

Abbildung 5-15. Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten in Kombination mit inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien auf die Leistungsprognose

Dabei überlagern sich im beschriebenen Szenario zwei Effekte, sodass die Summe höher als der Einfluss der Parameter einzeln wäre. Die inhomogene Aufteilung der Rüstfamilien führt dazu, dass der Rüstzyklus erst bei sehr hohen Beständen eingehalten werden kann. Die Abweichung vom Rüstzyklus führt jedoch auch dazu, dass nicht die geplanten großen Rüstzeiten entsprechend des Rüstzyklus anfallen, sondern die

höheren großen Rüstzeiten eines nicht optimalen Rüstzyklus. Der Rüstaufwand ist dadurch höher als vom Modell prognostiziert.

Im Wesentlichen sind die größten Abweichungen von der Modellierung immer dann zu beobachten, wenn die Rüstzeiten abhängig von der Reihenfolge der Rüstfamilien sind und der Rüstzyklus nicht eingehalten wird. Während die Abhängigkeit der Rüstzeiten prozessbedingt ist, verursachen folgende Faktoren eine Abweichung vom Rüstzyklus:

1. Geringe Bestände
2. Hohe Anzahl von Rüstfamilien
3. Inhomogene Aufteilung der Rüstfamilien

Diese Faktoren können einzeln oder auch in Kombination auftreten. Je höher der Bestand ist, desto geringer ist jedoch der Einfluss dieser Faktoren. Denn: Mit höherem Bestand sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass es notwendig ist, eine Rüstfamilie aufgrund fehlender Aufträge in der Warteschlange zu überspringen.

5.4.7 Evaluation der Leistung mit aktiver Warteschlange

Dieser Abschnitt soll die Modellierung der Leistung bei Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange evaluieren. Als Basis wird erneut das Referenzszenario mit 9 Rüstfamilien genutzt und eine aktive Warteschlange von 10 Aufträgen in das Simulationsmodell implementiert. Nur die dringendsten 10 Aufträge werden also bei der Rüstzyklusbildung berücksichtigt.

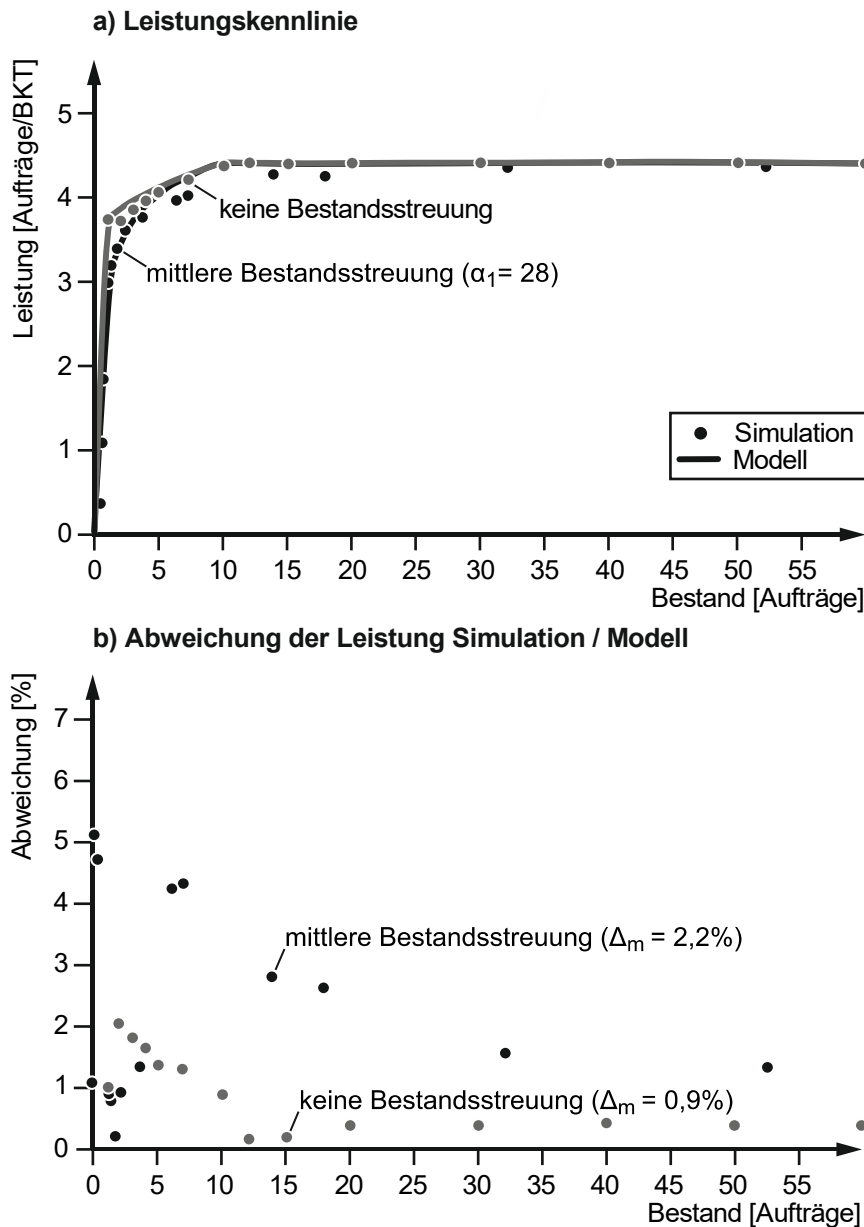
Abbildung 5-16 stellt die Ergebnisse für eine Simulationsreihe ohne Bestandsstreuung den Ergebnissen einer Simulationsreihe mit mittlerer Bestandsstreuung gegenüber.¹⁵ Für den Fall ohne Bestandsstreuung weichen die simulierten Werte im Mittel um 0,9% von der Prognose ab. Mit einer mittleren Bestandsstreuung erhöht sich die mittlere Abweichung auf 2,2%. Bei streuenden Beständen ist die Abweichung im Bereich um die 10 Aufträge mit etwa 3% noch relativ hoch.

Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass Bestände über 10 Aufträgen keine Leistungssteigerung mehr bewirken. Unterhalb von 10 Aufträgen wirkt sich eine Bestandsreduzierung allerdings leistungsmindernd aus. Schwankt der Bestand um einen Mittelwert von 10 Aufträgen, so können Phasen mit geringerer Leistung nicht durch Phasen höherer Leistung ausgeglichen werden. Die mittlere Leistung ist dadurch geringer als prognostiziert. Für höhere Bestände wirkt sich diese Schwankung allerdings

¹⁵ Abbildung A-18 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 10 (keine Bestandsstreuung) und Abbildung A-66 die Ergebnisse der Versuchsreihe 58 (mittlere Bestandsstreuung) dar.

nicht mehr so stark auf die Leistung aus, da der Bestand immer seltener 10 Aufträge unterschreitet.

Zusammenfassend ist die Modellierung mit konstanten Beständen als sehr präzise zu beurteilen. Bei streuenden Beständen überschätzt die Modellierung die Leistung, wenn der Bestand um den Wert der aktiven Warteschlange streut.



14000

Abbildung 5-16. Evaluation der Leistungsprognose bei Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange

5.5 Evaluation des Modells für die Durchlaufzeit

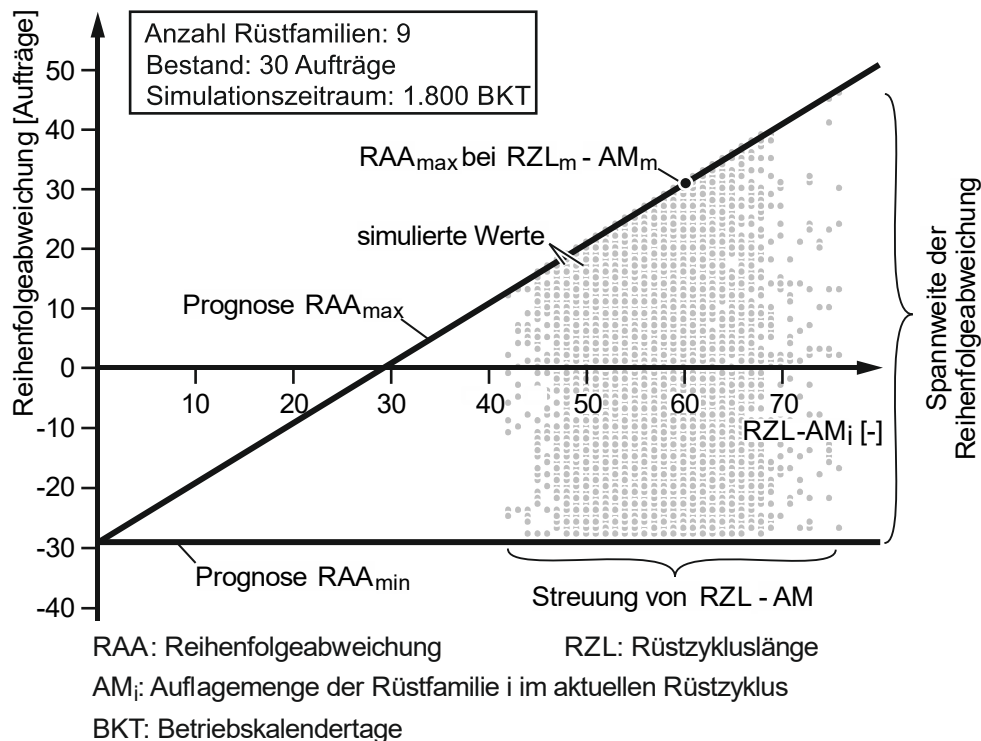
Dieser Abschnitt soll zeigen, wie genau das Modell den Einfluss der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die Durchlaufzeit vorhersagen kann. Der Einfluss der in Abschnitt 5.3 vorgestellten Parameter wird einzeln ausgehend von einem Referenzszenario untersucht. Zur Untersuchung werden die gleichen Simulationsreihen wie in Abschnitt 5.4 herangezogen.

5.5.1 Referenzszenario

Dieser Abschnitt evaluiert, wie genau das Modell die Durchlaufzeit für das Referenzszenario vorhersagen kann. Die mittlere Durchlaufzeit kann über die Trichterformel bzw. Little's Law (Gleichung 4-36) bestimmt werden. Eine Abweichung ergibt sich nur über die Abweichung der simulierten von der modellierten Leistung.

Interessanter ist dagegen die Evaluation der Prognose der maximalen Durchlaufzeit. Diese beschreibt die Verzögerung von Aufträgen durch die Rüstzyklusbildung. Bei Planung mit mittleren Durchlaufzeiten wirkt sich diese Verzögerung direkt auf die Terminabweichung eines Auftrags aus.

Abbildung 5-17 stellt für das Referenzszenario die Simulationsergebnisse eines Versuchs den Modellprognosen gegenüber.



14002

Abbildung 5-17. Reihenfolgeabweichung bei Rüstzyklusbildung (in Anlehnung an Engehausen & Lödding (2017a, S. 514))

Die Reihenfolgeabweichung der Aufträge eines Simulationsexperiments ist über die Rüstzykluslänge abzüglich der Auflagemenge dargestellt. Dieser Wert beschreibt im Wesentlichen die maximale Verzögerung der Aufträge (siehe auch Abbildung 4-13).

Obwohl der Bestand in dem Experiment konstant bei 30 Aufträgen liegt, schwankt die Reihenfolgeabweichung der Aufträge zwischen -28 und 46 Aufträgen. Dies liegt daran, dass sowohl die Rüstzykluslängen als auch die Auflagemengen der Rüstfamilien schwanken. Neben der Reihenfolgeabweichung beeinflussen schwankende Rüstzykluslängen und Auflagemengen auch die Leistung: Werden kurzfristig mehr oder weniger Aufträge gebündelt als im Mittel prognostiziert, führt dies zu Leistungsschwankungen, die wiederum die Durchlaufzeit der Aufträge beeinflussen können. Im Gegensatz zur Bestimmung von Mittelwerten gleichen sich die Schwankungen bei der Bestimmung von Maximalwerten nicht aus. Die Prognose der maximalen Durchlaufzeit ist daher selbst bei konstantem Bestand schwierig.

Ausnahmslos alle Reihenfolgeabweichungen liegen dagegen innerhalb der Grenzen, die sich aus der spezifischen Rüstzykluslänge und Auflagemenge eines Rüstzyklus ergeben. Auch die prognostizierte *minimale* Reihenfolgeabweichung wird nie unterschritten.

In Abbildung 5-17 ist auch die maximale Reihenfolgeabweichung bei mittlerer Rüstzykluslänge und mittlerer Auflagemenge gekennzeichnet. Bei einem Bestand von 30 Aufträgen beträgt die prognostizierte mittlere Rüstzykluslänge 67,5 Aufträge und die prognostizierte mittlere Auflagemenge 7,5 Aufträge¹⁶. Hieraus ergibt sich eine prognostizierte maximale Reihenfolgeabweichung von 31 Aufträgen für den Standardrüstzyklus. Aus der Abbildung ist jedoch auch erkennbar, dass einige Reihenfolgeabweichungen über diesem Wert liegen. Sind zufällig besonders viele Aufträge einer Rüstfamilie im Bestand, sodass der Rüstzyklus sehr lang ist, können einzelne Aufträge sehr lange auf die Auflage ihrer Rüstfamilie warten.

Abbildung 5-18 stellt die Ergebnisse der Simulationsreihe der Modellprognose für die maximale Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus ($ZDL_{\max,m}$) gegenüber.¹⁷ Entsprechend der Prognose besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Bestand und maximaler Durchlaufzeit. Die prognostizierte maximale Durchlaufzeit für den Standardrüstzyklus liegt zwischen dem Maximalwert und dem 95. Perzentil der Durchlaufzeit in den Simulationsversuchen. Die Prognose kann also zur groben Abschätzung der maximalen Durchlaufzeit genutzt werden. Anwendern sollte dabei jedoch bewusst sein, dass höhere Durchlaufzeiten für einzelne Aufträge möglich sind.

¹⁶ Bei homogener Aufteilung der Aufträge auf die Rüstfamilien ist die mittlere Auflagemenge gleichzeitig auch die minimale Auflagemenge, die zur Berechnung der maximalen Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus verwendet wird (Gleichung 4-43).

¹⁷ Abbildung A-17 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 9 (Referenzszenario) dar.

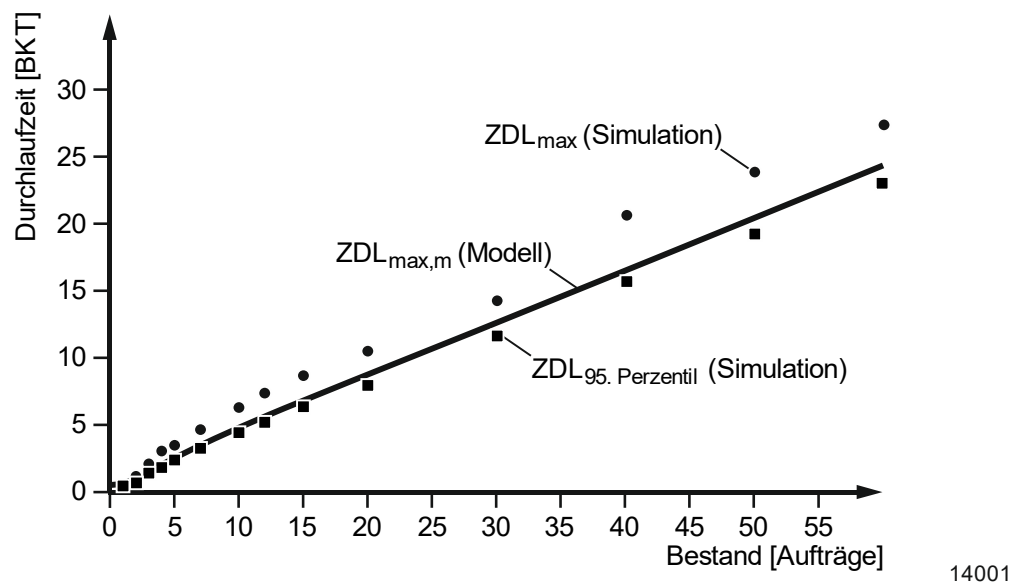


Abbildung 5-18. Evaluation der Durchlaufzeitprognose für das Referenzszenario

In den folgenden Abschnitten wird jeweils untersucht, wie sich die untersuchten Parameter auf die maximale Durchlaufzeit auswirken. Zudem wird die Prognose der maximalen Durchlaufzeit für einen Standardrüstzyklus den simulierten Werten gegenübergestellt.

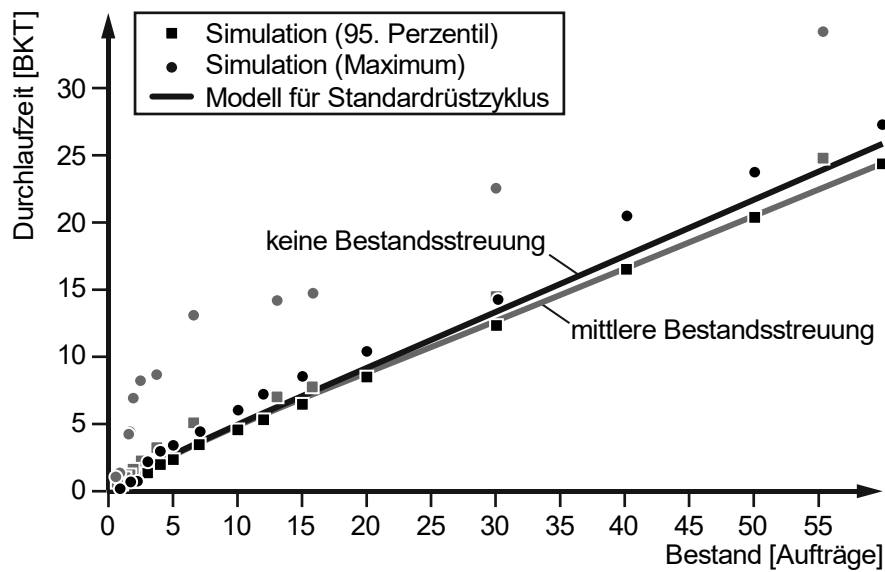
5.5.2 Einfluss der Bestandsstreuung

Dieser Abschnitt untersucht den Einfluss von Bestandsstreuungen auf die maximale Durchlaufzeit. Abbildung 5-19 stellt die Ergebnisse der Simulationsversuche dar und vergleicht diese mit den Prognosen für einen Standardrüstzyklus.¹⁸

Die Prognose bei streuenden Beständen liegt dabei leicht unter der Prognose bei konstanten Beständen, da bei streuenden Beständen der Effekt unterschiedlicher Auftragszeiten der Rüstfamilien im Modell berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt 4.3.5). Hierdurch ergeben sich leicht andere Rüstzykluslängen und Auflagemengen.

Bei streuenden Beständen ist die maximale Durchlaufzeit bei gleichem mittlerem Bestand höher als bei konstantem Bestand. Grund hierfür ist, dass bei streuenden Beständen in Zeiträumen hoher Bestände, höhere Auflagemengen und damit auch längere Rüstzyklen auftreten können.

¹⁸ Abbildung A-65 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 57 (mittlere Bestandsstreuung) dar.



14003

Abbildung 5-19. Einfluss der Bestandsstreuung auf die Prognose der maximalen Durchlaufzeit

Der Vergleich der simulierten Werte mit dem Modell für einen Standardrüstzyklus zeigt, dass bei streuenden Beständen das 95. Perzentil der Durchlaufzeiten über der Prognose für eine Standardrüstzyklus liegt. Somit bietet die Prognose auch bei streuenden zumindest einen guten Schätzwert für die maximale Durchlaufzeit. Je nachdem wie stark und wie lange der Bestand seinen Mittelwert überschreitet, sind höhere Durchlaufzeiten jedoch möglich und auch wahrscheinlich.

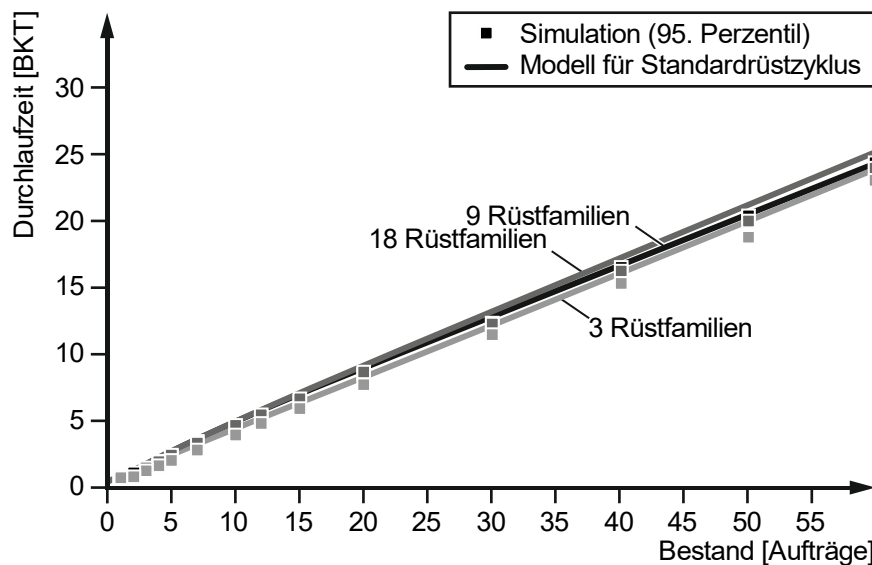
5.5.3 Einfluss der Anzahl der Rüstfamilien

Dieser Abschnitt soll den Einfluss der Anzahl von Rüstfamilien auf die maximale Durchlaufzeit untersuchen. Hierfür werden drei Szenarien mit 3, 9 und 18 Rüstfamilien miteinander verglichen. Abbildung 5-20 zeigt das Ergebnis der Simulationsversuche und stellt diese den jeweiligen Modellierungsergebnissen für einen Standardrüstzyklus mit mittleren Rüstzykluslängen und Auflagemengen gegenüber.¹⁹ Zur besseren Übersichtlichkeit stellt die Abbildung nur das 95. Perzentil der simulierten Durchlaufzeiten dar.

Die Abbildung zeigt, dass die Anzahl von Rüstfamilien das 95. Perzentil der Durchlaufzeiten kaum beeinflusst. Ein Vergleich der simulierten Maximalwerte bestätigt diesen Eindruck. Auch die absoluten Maximalwerte der Durchlaufzeiten sind in den drei Versuchsreihen nahezu gleich.

¹⁹ Abbildung A-9 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 (3 Rüstfamilien) und Abbildung A-25 die Ergebnisse der Versuchsreihe 17 (18 Rüstfamilien) dar.

In der Modellierung für einen Standardrüstzyklus ergeben sich unabhängig von der Anzahl der Rüstfamilien identische Reihenfolgeabweichungen. Die Anzahl von Rüstfamilien beeinflusst jedoch die Leistung (vgl. Abschnitt 5.4.3), wodurch sich die leicht unterschiedlichen Prognosen für die maximale Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus ergeben.



14004

Abbildung 5-20. Einfluss der Anzahl Rüstfamilien auf die Prognose der maximalen Durchlaufzeit

Die Anzahl von Rüstfamilien beeinflusst die maximale Durchlaufzeit also nur über ihren Einfluss auf die Leistung. Das 95. Perzentil der simulierten Durchlaufzeiten liegt zudem unabhängig von der Anzahl der Rüstfamilien relativ nah an der prognostizierten maximalen Durchlaufzeit für einen Standardrüstzyklus.

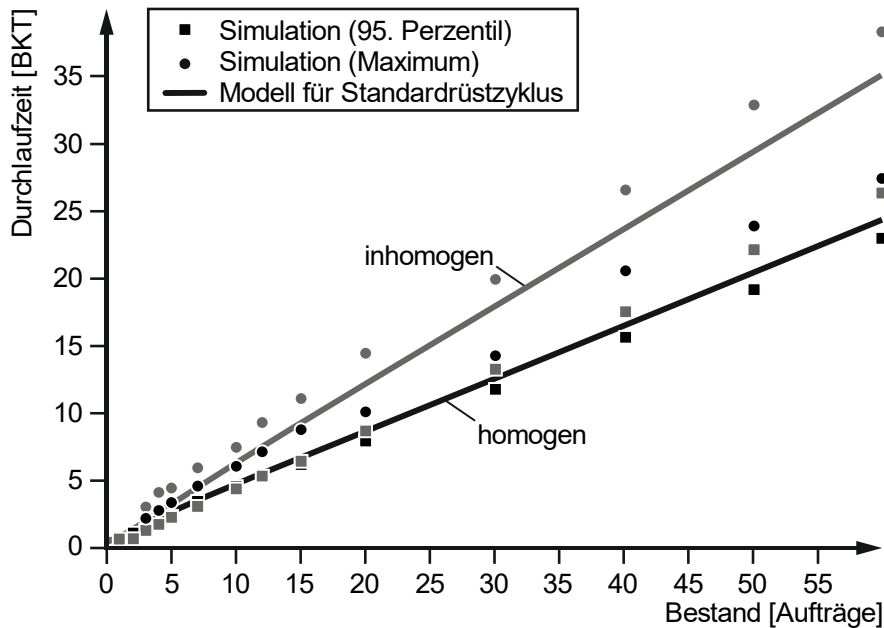
5.5.4 Einfluss der Aufteilung der Rüstfamilien

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Aufteilung der Rüstfamilien auf die maximale Durchlaufzeit untersucht. Abbildung 5-21 zeigt die Ergebnisse für das Referenzszenario mit einer homogenen Aufteilung der Aufträge auf die Rüstfamilien und die Ergebnisse des Versuchs mit inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien.²⁰

Zunächst ist hierbei erkennbar, dass die maximale Durchlaufzeit bei inhomogener Verteilung der Aufträge auf die Rüstfamilien etwas größer ist als bei einer homogenen Verteilung. Ein Grund hierfür ist, dass Aufträge seltener Rüstfamilien, wie beispielsweise Rüstfamilie G mit einem Anteil von 0,5%, aufgrund geringerer Auflagemengen länger auf ihre Bearbeitung warten (vgl. Abbildung 4-13).

²⁰ Abbildung A-21 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 13 (inhomogene Aufteilung) dar.

Zudem liegen die simulierten Werte für das 95. Perzentil bei inhomogener Aufteilung der Aufträge deutlich unter der maximalen Durchlaufzeit eines Standardrüstzyklus mit mittleren Rüstzykluslängen und Auflagemengen. Dies liegt darin begründet, dass das Modell die Reihenfolgeabweichung basierend auf der minimalen Auflagemenge berechnet (siehe Gleichung 4-43). Die Rüstfamilie mit den geringsten Auflagemengen ist jedoch auch die Rüstfamilie mit dem geringsten Anteil. Im vorliegenden Szenario gilt dies für Rüstfamilie G mit einem Anteil von 0,5% (siehe Tabelle 5-1).



14005

Abbildung 5-21. Einfluss der Aufteilung der Rüstfamilien auf die Prognose der maximalen Durchlaufzeit

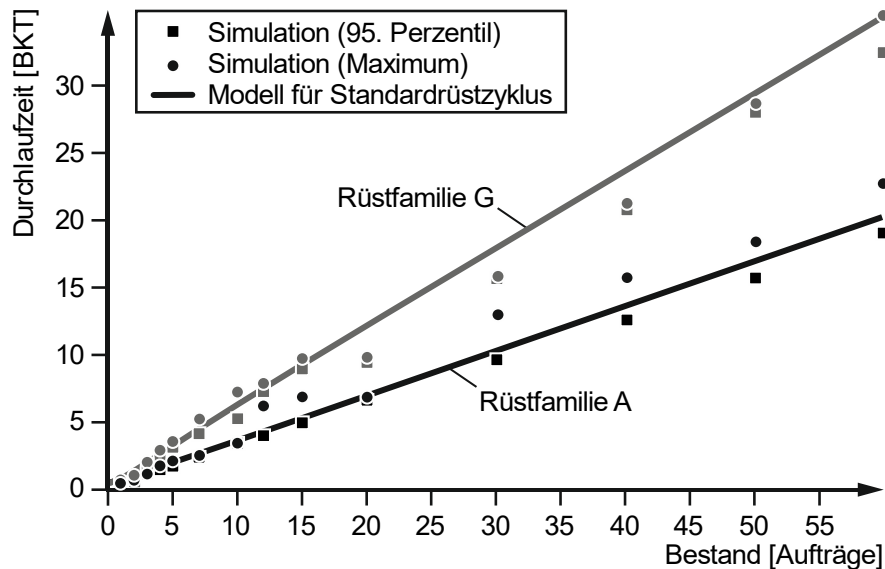
Bei inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien liegt die maximale Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus also näher am simulierten Maximalwert als bei einer homogenen Aufteilung der Rüstfamilien. Weiterhin ist zu erkennen, dass bei homogener Aufteilung der Rüstfamilien der Unterschied zwischen 95. Perzentil und dem absoluten Maximum geringer ist als bei inhomogener Aufteilung. Bei inhomogener Aufteilung streut die Durchlaufzeit also stärker als bei homogener Aufteilung.

Bei inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien unterscheiden sich die Durchlaufzeiten zwischen den einzelnen Rüstfamilien stark. Abbildung 5-22 stellt den Maximalwert und das 95. Perzentil der größten (Rüstfamilie A) und kleinsten Rüstfamilie (Rüstfamilie G) in der Versuchsreihe mit inhomogener Aufteilung dar. Außerdem ist die maximale Durchlaufzeit für einen Standardrüstzyklus bezogen auf die jeweiligen Rüstfamilien dargestellt (vgl. Gleichung 4-43).

Zunächst ist aus der Abbildung erkennbar, dass die maximale Durchlaufzeit kleiner Rüstfamilien erwartungsgemäß größer ist als die großer Rüstfamilien. Die Spannweite

zwischen 95. Perzentil und Maximalwert der Durchlaufzeiten ist bei Betrachtung einer Rüstfamilie zudem kleiner als bei Betrachtung aller Aufträge.

Für Rüstfamilie A mit einem Anteil von 45% liegt der prognostizierte Maximalwert für den Standardrüstzyklus zwischen dem 95. Perzentil und dem Maximum der simulierten Durchlaufzeiten. Für Rüstfamilie G mit einem Anteil von 0,5% stellt die Prognose der maximalen Durchlaufzeit für den Standardrüstzyklus in den meisten Betriebspunkten sogar eine Obergrenze der Durchlaufzeiten dar.



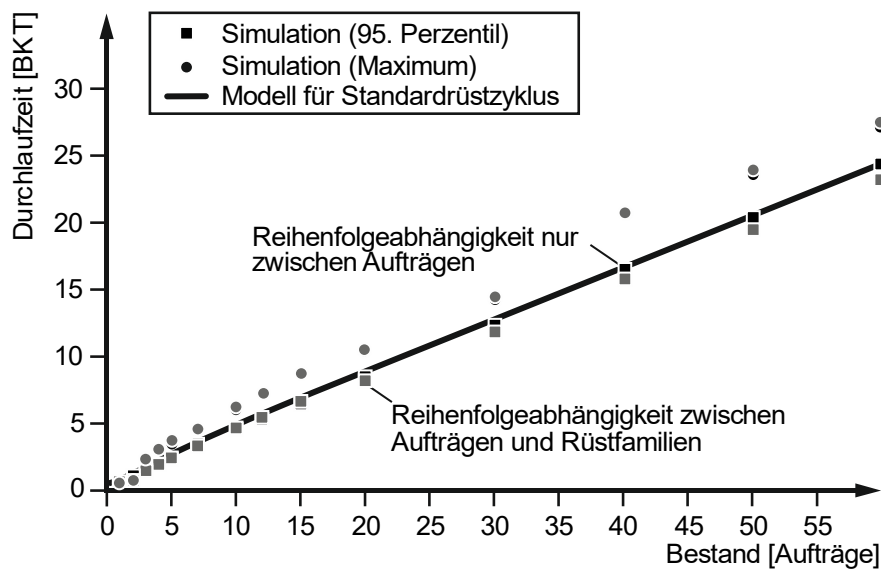
14007

Abbildung 5-22. Prognose der maximalen Durchlaufzeit je Rüstfamilie bei inhomogener Aufteilung der Aufträge auf die Rüstfamilien

5.5.5 Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten

Dieser Abschnitt zeigt den Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten auf die maximale Durchlaufzeit. Abbildung 5-23 zeigt die Ergebnisse der Simulationsversuche mit Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten für die Referenzversuche und ein Szenario, in dem Rüstzeiten zusätzlich noch von der Reihenfolge der Rüstfamilien abhängig sind. Die Modellierung der maximalen Durchlaufzeit für den Standardrüstzyklus unterscheidet nicht zwischen den zwei Szenarien, sodass beide Simulationsreihen mit dem gleichen Modell verglichen werden können.²¹

²¹ Abbildung A-19 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 11 (Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten zwischen Aufträgen und Rüstfamilien) dar.



14008

Abbildung 5-23. Einfluss der Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten auf die Prognose der maximalen Durchlaufzeit

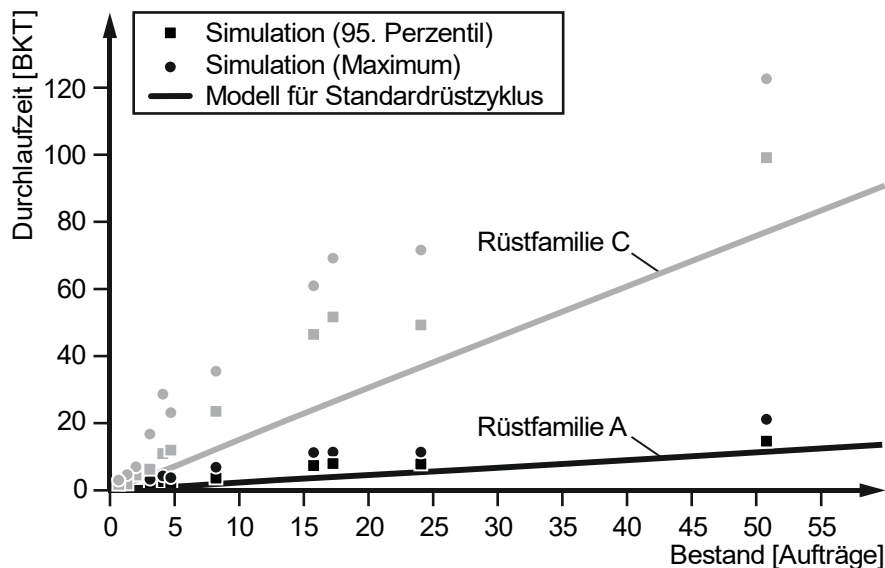
Die Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten beeinflusst das 95. Perzentil und den Maximalwert der Durchlaufzeiten in den Simulationen kaum. Der geringe Einfluss liegt daran, dass in der Prognose vor allem die Rüstzykluslänge sowie die Auflagemengen entscheidend für die Abweichung der Durchlaufzeit sind. Diese Größen sind bei konstanten Beständen wiederum unabhängig von den Rüstzeiten. Eine Abweichung ergibt sich nur dadurch, dass die Leistungsprognose bei Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten zwischen den Rüstfamilien besonders bei geringen Beständen etwas ungenauer wird (siehe Abschnitt 5.4.5).

Die Prognose für die Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus liegt auch bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten zwischen den Rüstfamilien zwischen dem 95. Perzentil und dem Maximalwert der simulierten Durchlaufzeiten.

5.5.6 Überlagerung der Einflussgrößen

Zufällige Größen haben einen höheren Einfluss auf Extremwerte, wie die maximale Durchlaufzeit, als auf Mittelwerte. Deswegen beeinflussen Faktoren, die dazu führen, dass einzelne Aufträge lange auf ihre Bearbeitung warten, die maximale Durchlaufzeit besonders stark. Abschnitt 5.5.4 zeigt, dass die Aufteilung der Rüstfamilien einen hohen Einfluss auf den Maximalwert hat. Rüstfamilien, die einen sehr geringen Anteil am Auftragspektrum haben, warten tendenziell lange auf ihre Bearbeitung. Besonders die Kombination von inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien mit schwankenden Beständen führt daher dazu, dass das 95. Perzentil der simulierten Durchlaufzeiten stärker von der maximalen Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus abweicht. Abbildung 5-24

zeigt die Ergebnisse einer Simulationsreihe mit drei Rüstfamilien, inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien und schwankenden Beständen.²² Wie in Abbildung 5-22 bezieht sich auch in diesem Fall das Modell für den Standardrüstzyklus auf die jeweilige Rüstfamilie (vgl. Gleichung 4-43).



14009

Abbildung 5-24. Einfluss schwankender Bestände in Kombination mit inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien auf die Prognose der maximalen Durchlaufzeit

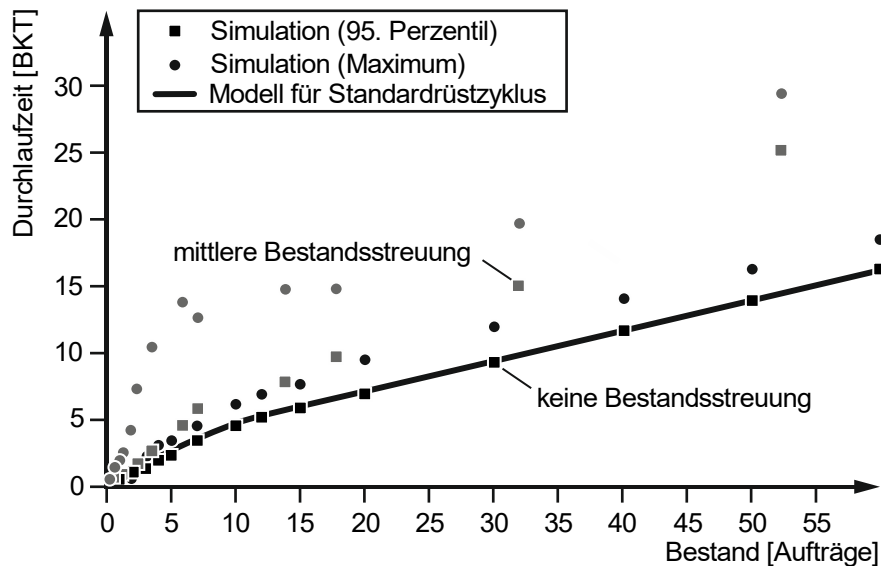
Bei schwankenden Beständen liegt sowohl das 95. Perzentil als auch der Maximalwert der simulierten Durchlaufzeiten über der Prognose für einen Standardrüstzyklus. Grund hierfür ist, dass in Zeiten hoher Bestände Rüstzyklen länger sind als der Mittelwert, der für die Prognose verwendet wird. Sollten die Bestände schwanken, so kann der Maximalwert für einen Standardrüstzyklus zumindest als ein guter Schätzwert für die zu erwartende maximale Durchlaufzeit verwendet werden.

5.5.7 Evaluation der Durchlaufzeit mit aktiver Warteschlange

In diesem Abschnitt soll die Modellierung der Durchlaufzeit für die Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange evaluiert werden. Abbildung 5-25 zeigt die Ergebnisse von

²² Abbildung A-61 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 53 (3 Rüstfamilien, mittlere Bestandsstreuung und inhomogene Aufteilung der Rüstfamilien) dar. Tabelle A-2 zeigt die prozentuale Aufteilung der Aufträge auf die Rüstfamilien.

Simulationsversuchen mit und ohne Bestandsstreuung und stellt diese den Modellergebnissen gegenüber.²³



14011

Abbildung 5-25. Evaluation der Prognose der maximalen Durchlaufzeit bei Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange

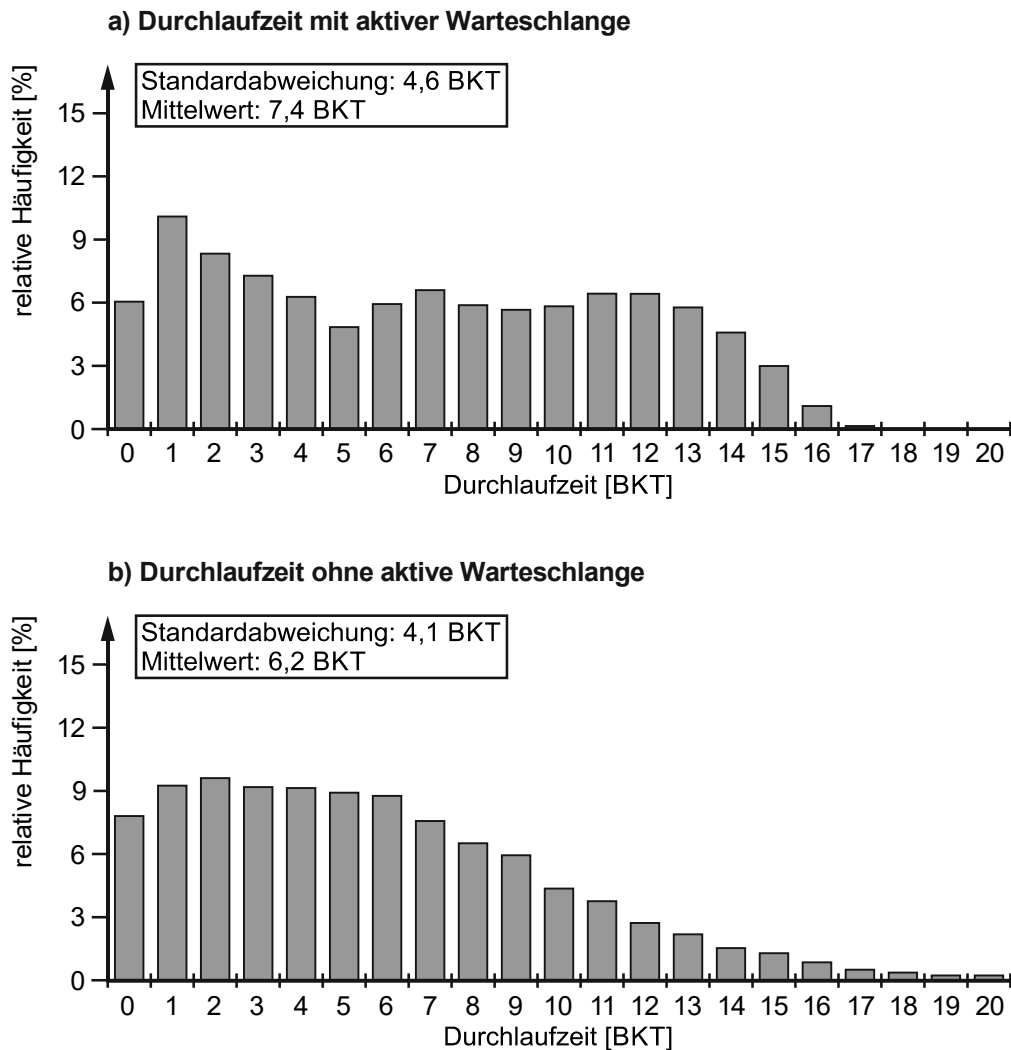
Ohne Bestandsstreuung ist das 95. Perzentil der simulierten Durchlaufzeit nahezu identisch mit der Prognose der maximalen Durchlaufzeit für den Standardrüstzyklus. Mit Bestandsstreuung liegt das 95. Perzentil der Durchlaufzeiten über der Prognose. Bei konstanten Beständen ist die Prognose für die maximale Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus also ein guter Schätzwert für das 95. Perzentil der Durchlaufzeiten.

Eine Annahme bei der Entwicklung der Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange war, dass die Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange die Streuung der Durchlaufzeit gegenüber der erschöpfenden Rüstzyklusbildung ohne aktive Warteschlange reduzieren kann. Dies sollte vor allem bei streuenden Beständen einen Vorteil bieten, da die Verzögerung der Aufträge eingegrenzt wird. Diese Annahme soll nun durch den Vergleich von zwei Versuchen mit streuenden Beständen, einem Versuch mit aktiver Warteschlange und einem Versuch ohne aktive Warteschlange, überprüft werden.

Abbildung 5-26 stellt die Verteilung der simulierten Durchlaufzeiten mit aktiver Warteschlange der Verteilung der simulierten Durchlaufzeiten ohne aktive Warteschlange gegenüber. Die Standardabweichung der Durchlaufzeit liegt mit 4,6 BKT bei der aktiven Warteschlange über der Standardabweichung ohne aktive Warteschlange (4,1 BKT). Zudem liegt der Mittelwert der Durchlaufzeiten mit aktiver Warteschlange 1,2

²³ Abbildung A-18 im Anhang stellt die Ergebnisse der Versuchsreihe 10 (keine Bestandsstreuung) und Abbildung A-66 die Ergebnisse der Versuchsreihe 58 (mittlere Bestandsstreuung) dar.

BKT über dem ohne aktive Warteschlange. Dies liegt daran, dass die aktive Warteschlange nur die dringendsten 10 Aufträge bei der Rüstzyklusbildung berücksichtigt. Hierdurch ist die Leistung bei einem mittleren Bestand von 33 Aufträgen mit aktiver Warteschlange geringer als ohne aktive Warteschlange.



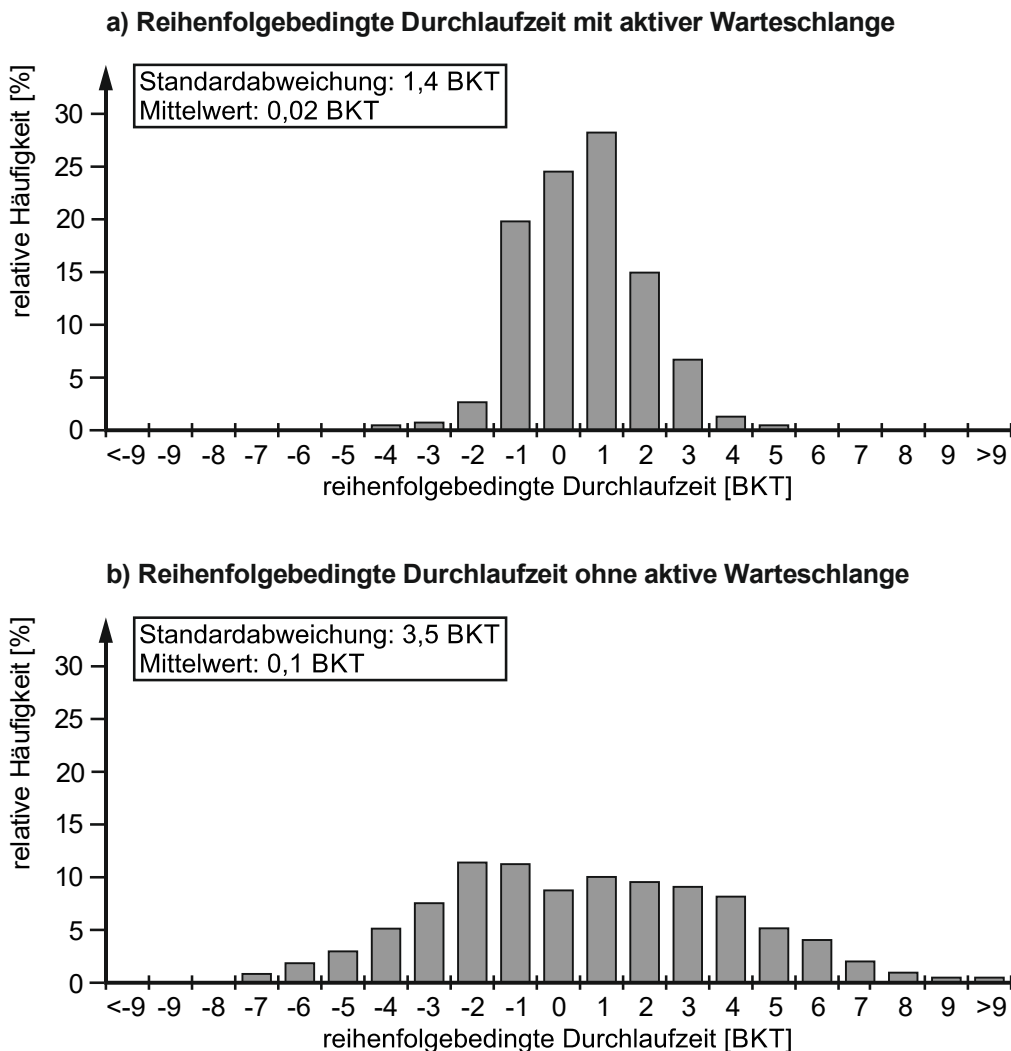
14062

Abbildung 5-26. Durchlaufzeit mit und ohne aktive Warteschlange

Die Zerlegung der Durchlaufzeit in die reihenfolge- und bestandsbedingte Durchlaufzeit zeigt den Einfluss der aktiven Warteschlange auf die Durchlaufzeit (vgl. Abschnitt 2.2.7). Abbildung 5-27 zeigt das Histogramm der reihenfolgebedingten Durchlaufzeit für die beiden Versuche.

Abbildung 5-27a) zeigt, dass die aktive Warteschlange die Streuung der reihenfolgebedingten Durchlaufzeit gegenüber der Rüstzyklusbildung mit erschöpfender Fertigung der Rüstfamilien (Abbildung 5-27b) auch bei streuendem Bestand stark begrenzen kann. Der mittlere Bestand liegt mit etwa 33 Aufträgen im Versuch mit aktiver Warteschlange sogar leicht über dem mittleren Bestand von etwa 30 Aufträgen beim

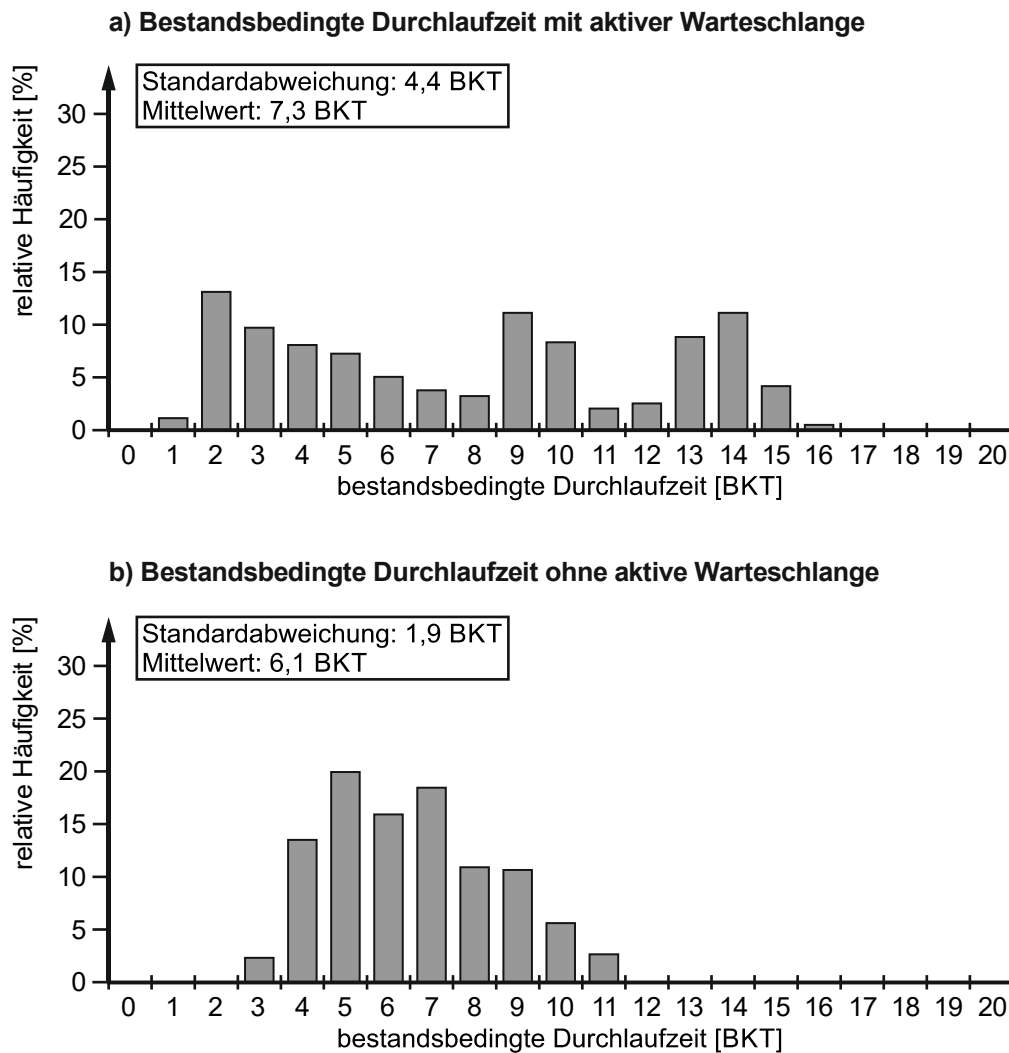
Versuch ohne aktive Warteschlange. Die Standardabweichung der reihenfolgebedingten Durchlaufzeit liegt bei der erschöpfenden Fertigung der Rüstfamilien mit 3,5 BKT 2,5-mal so hoch wie bei der Fertigung mit aktiver Warteschlange (1,4 BKT).



14013

Abbildung 5-27. Reihenfolgebedingte Durchlaufzeit mit und ohne aktive Warteschlange

Abbildung 5-28 stellt das Histogramm der bestandsbedingten Durchlaufzeit mit aktiver Warteschlange dem ohne aktive Warteschlange gegenüber. Dabei zeigt Abbildung 5-28a), dass die bestandsbedingte Durchlaufzeit bei Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange deutlich stärker streut als bei erschöpfender Fertigung der Rüstfamilien (Abbildung 5-28b). Zudem liegt auch der Mittelwert der bestandsbedingten Durchlaufzeit um 1,2 BKT höher als bei einer erschöpfenden Reihenfolgebildung.



14014

Abbildung 5-28. Bestandsbedingte Durchlaufzeit mit und ohne aktive Warteschlange

Offenbar hat die aktive Warteschlange also dazu beigetragen, die Bestandsschwankungen zu erhöhen. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Leistung – anders als bei einer erschöpfenden Reihenfolgebildung – bei hohen Beständen nicht mehr ansteigt und daher auch nicht Bestandsreduzierend wirken kann. Auf Basis der Simulationsversuche kann man also keine klare Empfehlung für die Begrenzung der Rüstzyklusbildung auf eine aktive Warteschlange ableiten. Zumindest müssen Unternehmen bei der Anwendung in der Lage sein, Bestandsstreuungen durch eine Bestandsregelung zu begrenzen (siehe hierzu z. B. Lödging 2016, S. 485-503).

5.6 Fazit zur Evaluation der Modellierung

In der Evaluation wurde untersucht, inwiefern das in Kapitel 4 vorgestellte Modell die Leistung und die maximale Durchlaufzeit prognostizieren kann. Ausgehend von einem Referenzszenario mit 9 Rüstfamilien wurde geprüft, welchen Einfluss die Parameter

Bestandsstreuung, Anzahl der Rüstfamilien, Aufteilung der Rüstfamilien sowie die Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten auf die Modellgüte haben. Die Ergebnisse aus Simulationsversuchen wurden dafür den modellierten Werten gegenübergestellt.

Zusammenfassend erweist sich das Modell unabhängig von der Ausprägung der Parameter als valide zur Prognose der Leistung, insbesondere bei den für die Praxis relevanten Bestandsniveaus von mehr als 10 Aufträgen. Die größten Abweichungen wurden identifiziert, wenn die Rüstzeiten abhängig von der Reihenfolge der Rüstfamilien sind und der Rüstzyklus nicht eingehalten wurde. Dies tritt besonders bei inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien, niedrigen Beständen sowie einer hohen Anzahl an Rüstfamilien auf.

Das Modell liefert für spezifische Rüstzykluslängen und Auflagemengen gültige Ober- und Untergrenzen für die Durchlaufzeit. Verwendet man die maximale Durchlaufzeit einer mittleren Rüstzykluslänge und Auflagemenge als Prognose für die maximale Durchlaufzeit für einen längeren Untersuchungszeitraum, wird die tatsächlich auftretende maximale Durchlaufzeit unterschätzt. Das liegt an den folgenden Gründen:

1. Selbst bei konstanten Beständen schwanken die Rüstzykluslängen und die Auflagemengen der Rüstfamilien durch die zufällige Reihenfolge, in der die Aufträge unterschiedlicher Rüstfamilien zugehen.
2. Schwankende Bestände verstärken diesen Effekt, weil sich bei hohen Beständen längere Rüstzyklen und höhere Auflagemengen ergeben als bei niedrigen Beständen.

Für viele Parameterkonstellationen scheint die maximale Durchlaufzeit bei mittlerer Rüstzykluslänge und Auflagemenge jedoch eine gute Abschätzung für das 95. Perzentil der Durchlaufzeitverteilung zu sein.

Hervorzuheben ist, dass sich alle Abweichungen vom Modell sehr gut mit Abweichungen der Realität von den Modellprämissen erklären lassen. Das Modell bietet somit eine sehr gute Grundlage, um es weiterzuentwickeln, z. B. um die Abbildungsgenauigkeit für spezifische Parameterkonstellationen zu erhöhen.

Die aktive Warteschlange konnte den erwarteten Effekt auf die Streuung der reihenfolgebedingten Durchlaufzeit erzielen. Allerdings wurde dieser Effekt in den Simulationsversuchen durch eine stärkere Streuung der bestandsbedingten Durchlaufzeit aufgehoben.

6 Auslegung und Implementierung der Reihenfolgebildung

Die Rüstzyklusbildung verursacht einen Zielkonflikt zwischen einer hohen Leistung und konstanten und damit planbaren Durchlaufzeiten. Kapitel 4 stellt ein Modell vor, mit dem der Einfluss der Rüstzyklusbildung auf die Leistung und die Durchlaufzeit quantifiziert werden kann. Die Evaluation in Kapitel 5 zeigt, dass das Modell den Einfluss der Rüstzyklusbildung auf die logistischen Zielgrößen valide vorhersagen kann. Ziel dieses Kapitels ist es, einen Leitfaden zur Auslegung und Implementierung der Rüstzyklusbildung zu geben. Produktionsplaner sollen hierdurch in die Lage versetzt werden, das Modell in der Praxis anwenden zu können.

Abschnitt 6.1 erläutert zunächst die Parametrierung des Verfahrens. Anschließend stellt 6.2 ein Hilfsmittel vor, das die Einführung der Rüstzyklusbildung vereinfacht. Alternative Maßnahmen zur Senkung des Rüstaufwands erläutert Abschnitt 6.3 und zeigt, wie diese mithilfe des Modells bewertet werden können. Vor dem Abschluss des Kapitels durch ein Fazit fasst Abschnitt 6.4 die Erkenntnisse dieser Arbeit als Leitlinien zusammen.

6.1 Parametrierung des Verfahrens

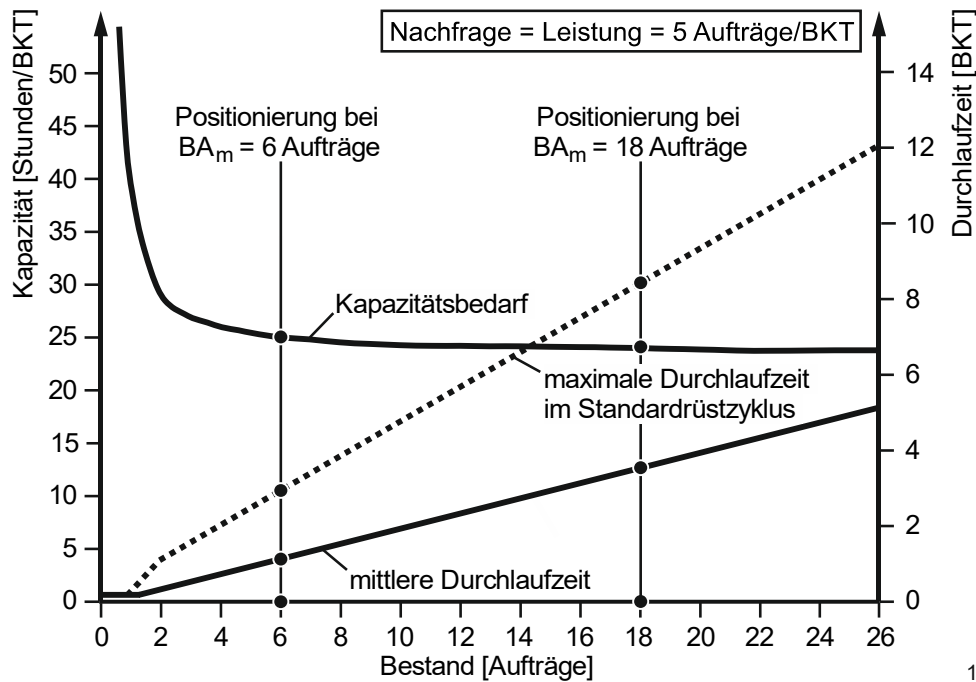
Bei Anwendung der Rüstzyklusbildung können Unternehmen die logistische Zielerreichung über die zwei Stellgrößen Bestand und Kapazität beeinflussen. Ausgangspunkt für die Entscheidung über die zwei Stellgrößen sollte stets die Kundennachfrage sein.

Über die Umformung der Gleichungen 4-18 und 4-19 lässt sich eine Kennlinie für den Kapazitätsbedarf für eine definierte Nachfrage bestimmen. Dabei gilt, dass die Leistung des Arbeitssystems der Nachfrage entsprechen sollte. Entsprechend lässt sich der Kapazitätsbedarf wie folgt berechnen:

$$KAP(BA_m) = \frac{LA_m \cdot ZAU_m}{LSF_{m,AS}(BA_m) \cdot A(BA_m)} \quad (6-1)$$

KAP(BA _m)	Kapazitätsbedarf in Abhängigkeit des Bestands [Std/BKT]
LA _m	Leistung des Arbeitssystems (= Nachfrage) in Anzahl Aufträgen [-/BKT]
ZAU _m	mittlere Auftragszeit [Std] (siehe Gleichung 4-17)
LSF _{m,AS} (BA _m)	mittlerer Leistungssteigerungsfaktor des Arbeitssystems in Abhängigkeit des Bestands [-]
A(BA _m)	Auslastung in Abhängigkeit des Bestands [-]

Abbildung 6-1 zeigt die Parametrierung für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien und einer Nachfrage von 5 Aufträgen pro Betriebskalendertag. Die mittlere sowie die maximale Durchlaufzeit lassen sich mit den in Abschnitt 4.4.3 vorgestellten Gleichungen 4-37 und 4-40 berechnen, indem die Leistung jeweils gleich der geforderten Nachfrage gesetzt wird.



14015

Abbildung 6-1. Parametrierung der Rüstzyklusbildung

Zunächst ist erkennbar, dass der Kapazitätsbedarf mit höherem Bestand abnimmt. Aufgrund der geringen Auslastung und geringen Leistungssteigerungseffekten ist der Kapazitätsbedarf, um die Nachfrage von 5 Aufträgen pro BKT erfüllen zu können, bei sehr niedrigen Beständen extrem hoch. In der Abbildung sind zwei unterschiedliche Positionierungen dargestellt:

1. Bei einem Bestand von 6 Aufträgen ist eine Kapazität von 25 Stunden pro Tag notwendig, um die Nachfrage von 5 Aufträgen zu erfüllen. Demgegenüber steht eine mittlere Durchlaufzeit von 1,2 BKT und eine maximale Durchlaufzeit in einem Standardrüstzyklus von 2,9 BKT.
2. Die gleiche Leistung kann auch bei einer Kapazität von 24 Stunden erreicht werden. Allerdings ist hierfür ein höherer Bestand von 18 Aufträgen notwendig, der höhere mittlere Durchlaufzeiten von 3,6 BKT mit einem Maximalwert im Standardrüstzyklus von 8,4 BKT verursacht.

Aus Sicht des Produktionsplaners gilt es somit, zwischen den Kosten der Kapazität und den Nachteilen durch eine Verlängerung der Durchlauf- und damit Lieferzeiten abzuwägen.

Zudem sollte die potenzielle Abweichung von der mittleren Durchlaufzeit bei der Terminierung berücksichtigt werden. Bei einer Kapazität von 24 Stunden beträgt der Maximalwert der Durchlaufzeiten im Standardrüstzyklus im Beispiel 8,4 BKT und der Mittelwert 3,6 BKT. Unter der Annahme einer Durchlaufterminierung mit konstanten Plan-

Durchlaufzeiten wird das Arbeitssystem also mit einer Durchlaufzeit von 3,6 BKT geplant. Jede Abweichung von der mittleren Durchlaufzeit verursacht somit eine Terminabweichung. Bei einem Maximalwert von 8,4 BKT bedeutet dies, dass durch die Rüstzyklusbildung die Terminabweichung einzelner Aufträge bereits in einem Standardrüstzyklus einen Wert von 4,8 BKT erreichen kann ($ZDL_{\max} - ZDL_{\text{Plan}}$). Weil die Rüstzykluslängen und die Auflagemengen schwanken, werden zumindest einzelne Aufträge diesen Wert sogar überschreiten.

Es gibt zwei Möglichkeiten, um zu verhindern, dass sich diese Terminabweichung auf den Liefertermin gegenüber dem Kunden auswirkt: eine Reihenfolgebildung nach frühestem Plan-Endtermin an allen folgenden Arbeitssystemen und die Festlegung eines Lieferzeitpuffers.

Durchläuft ein Auftrag nach dem Arbeitssystem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten noch weitere Arbeitssysteme, so kann eine strikte Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin an allen nachfolgenden Arbeitssystemen die Terminabweichung einzelner Aufträge reduzieren (siehe hierzu Lödding & Piontek (2017)). Das Potenzial der Reihenfolgebildung ist jedoch einerseits durch die Anzahl nachfolgender Arbeitssysteme und andererseits durch das Bestandsniveau dieser Arbeitssysteme beschränkt. Je mehr Arbeitssysteme folgen und je höher der Bestand, desto stärker können einzelne Aufträge beschleunigt werden. Das höhere Potenzial der Reihenfolgebildung durch mehr Bestand sollte jedoch stets gegenüber der hierdurch bedingten Erhöhung mittlerer Durchlaufzeiten abgewogen werden.

Eine weitere Möglichkeit bietet die Festlegung eines Lieferzeitpuffers. Sollte das Arbeitssystem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten das letzte vor dem Versand darstellen oder kann die Reihenfolgebildung an folgenden Arbeitssystemen die Terminabweichung durch Rüstzyklusbildung nicht vollständig ausgleichen, ist es meist sinnvoll, einen Lieferzeitpuffer festzulegen. Ein Lieferzeitpuffer, der die positiven Terminabweichungen ausgleichen soll, verursacht jedoch einen hohen Bestand im Warenausgang. Hierdurch können hohe Lagerkosten und bei einer Auftragsfertigung längere Lieferzeiten entstehen, die bei der Auslegung ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

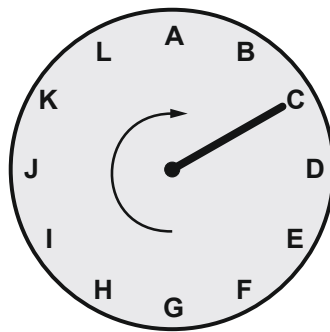
6.2 Hilfsmittel zur Rüstzyklusbildung

In der Praxis gestaltet sich die Umsetzung von Prioritätsregeln häufig problematisch, sodass Abweichungen von der Vorgabe entstehen (Koch 2018, S. 131; Kuyumcu 2013, S. 26 f.; Lödding 2016, S. 89). Die Rüstzyklusbildung gliedert sich in folgende drei Schritte, die die Fertigungsmitarbeiter umsetzen müssen:

1. Eine Rüstfamilie wird erschöpfend gefertigt.
2. Die Reihenfolge der Rüstfamilien ist durch einen Rüstzyklus festgelegt.
3. Innerhalb der Rüstfamilien werden die Aufträge nach frühestem Plan-Endtermin des Arbeitsvorgangs gefertigt.

Schritt 1. Der Vorteil der erschöpfenden Fertigung der Rüstfamilien ist, dass die Vermeidung großer Rüstvorgänge im Interesse der Mitarbeiter ist. Für die erste Entscheidung bedarf es also voraussichtlich keiner Hilfsmittel.

Schritt 2. Die Einhaltung des Rüstzyklus ist auf den ersten Blick nicht intuitiv. Beim Wechsel auf die nächste Rüstfamilie kann es einem Fertigungsmitarbeiter eher sinnvoll erscheinen, auf die Rüstfamilie mit den meisten Aufträgen in der Warteschlange zu wechseln. Produktionsplaner sollten daher gemeinsam mit den Fertigungsmitarbeitern den Rüstzyklus festlegen und erläutern, warum es so wichtig ist, den Rüstzyklus einzuhalten. Ein einfaches Hilfsmittel in Form einer Uhr bietet sich zur Einhaltung des Rüstzyklus in der Fertigung an. Abbildung 6-2 zeigt beispielhaft, wie dieses Hilfsmittel aussehen kann.



14016

Abbildung 6-2. Hilfsmittel zur Rüstzyklusbildung

Der Zeiger zeigt an, welche Rüstfamilie aktuell gefertigt wird. Der Maschinenbediener sucht in dem Beispiel also alle Aufträge der Rüstfamilie C aus der Warteschlange. Wenn keine Aufträge der Rüstfamilie C mehr vorliegen, wird der Zeiger auf die nächste Rüstfamilie gedreht. Rüstfamilie D wird dann solange gefertigt, bis keine Aufträge dieser mehr vorliegen. Sollten überhaupt keine Aufträge der Rüstfamilie D vorliegen, so wird diese Rüstfamilie übersprungen und der Zeiger auf Rüstfamilie E gedreht.

Zur Anwendung dieses Vorgehens muss bekannt sein, welcher Rüstfamilie ein Auftrag angehört. Zur einfacheren Zuordnung der Aufträge kann es sinnvoll sein, die Rüstfamilie entweder direkt auf den Auftragsbegleitpapieren zu vermerken oder die Mitarbeiter in der Zuordnung zu schulen.

Schritt 3. Fertigungsmitarbeiter sollten für den Einfluss der Priorisierung der Aufträge innerhalb der Rüstfamilien auf die Terminabweichung in Schulungen sensibilisiert werden. Produktionsplaner sollten hierfür die richtigen Voraussetzungen schaffen, indem die Plan-Endtermine der Aufträge entweder auf Bildschirmen am Arbeitsplatz oder auf den Auftragsbegleitpapieren gut erkennbar sind.

6.3 Alternative Maßnahmen zur Reduzierung des Rüstaufwands

Neben der Anwendung einer rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung sollten Unternehmen weitere Alternativen beim Umgang mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten abwägen. Die folgenden Abschnitte stellen zwei Möglichkeiten vor: Die Reduzierung der Rüstzeiten und die Reduzierung der Rüstfamilien.

6.3.1 Reduzierung der Rüstzeiten

Die Reduzierung der Rüstzeiten, die in diesem Abschnitt analysiert wird, ist von der Rüstzeitreduzierung durch eine sinnvolle Reihenfolge der Rüstfamilien zu trennen. Die Festlegung der Reihenfolge bewirkt keine Veränderung der Rüstzeiten in der Rüstzeitmatrix, sondern lediglich die Auswahl des niedrigsten Wertes aus der Matrix. Die Reduzierung der Rüstzeiten soll hingegen die Werte in der Rüstzeitmatrix senken. Rüstprozesse werden also verändert. Auf Methoden und Maßnahmen, die zur Senkung von Rüstaufwänden eingesetzt werden, soll hier nicht näher eingegangen werden.²⁴ Es soll lediglich gezeigt werden, wie das Modell angewendet werden kann, um den Nutzen dieser Maßnahmen zu bewerten.

Zwei Fälle der Rüstzeitreduzierung werden getrennt betrachtet. Die Reduzierung der großen Rüstzeiten und die Reduzierung der kleinen Rüstzeiten. Ausgangspunkt ist weiterhin das Beispiel mit den drei Rüstfamilien. Abbildung 6-3 stellt die Rüstzeitmatrix im Ausgangszustand sowie die resultierenden Rüstzeitmatrizen nach der Rüstzeitreduzierung dar.

Abbildung 6-3b) stellt die Rüstzeitmatrix nach einer Halbierung der großen Rüstzeiten dar. Die kleinen Rüstzeiten auf der Diagonalen sind identisch zur Ursprungsmatrix in Abbildung 6-3a). Abbildung 6-3c) zeigt die Rüstzeitmatrix nach einer Halbierung der kleinen Rüstzeiten. Gegenüber der Ursprungsmatrix verändert sich hierbei nur die Diagonale.

Um den Einfluss verschiedener Maßnahmen vergleichen zu können, wird zunächst der mittlere Rüstaufwand je Rüstzyklus bestimmt. Für jede Rüstfamilie fällt ein großer Rüstvorgang sowie $AM_{m,i}-1$ kleine Rüstvorgänge an. Sollte die mittlere Auflagemenge kleiner oder gleich eins sein, so fällt im Durchschnitt nur ein großer Rüstvorgang an²⁵:

$$RA_{m,i}(BA_m) = ZR_{i-1,i}^+ + (AM_{m,i}(BA_m) - 1) \cdot ZR_i^- \quad , \text{ falls } AM_{m,i}(BA_m) > 1 \quad (6-1)$$

$$RA_{m,i}(BA_m) = ZR_{i-1,i}^+ \quad , \text{ falls } AM_{m,i}(BA_m) \leq 1 \quad (6-2)$$

²⁴ Zur Senkung von Rüstzeiten sei hier beispielhaft auf die SMED-Methode verwiesen (Shingō 2019).

²⁵ Die Modellierung der Auflagemenge bleibt von der Rüstzeitreduzierung unberührt. Sie kann daher weiterhin mit den Gleichungen 4-13 und 4-5 berechnet werden.

Auslegung und Implementierung der Reihenfolgebildung

$RA_{m,i}(BA_m)$	mittlerer Rüstaufwand der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands [Std]
$AM_{m,i}(BA_m)$	mittlere Auflagemenge der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-]
$ZR^+_{i-1,i}$	große Rüstzeit von der zuvor bearbeiteten Rüstfamilie $(i-1)$ zur Rüstfamilie i gemäß dem Rüstzyklus [Std]
ZR^-_i	kleine Rüstzeit der Rüstfamilie i [Std]

Pro Rüstzyklus entspricht der mittlere Rüstaufwand also:

$$RA_m(BA_m) = \sum_{i=1}^n RA_{m,i}(BA_m) \quad (6-3)$$

$RA_m(BA_m)$	mittlerer Rüstaufwand pro Rüstzyklus in Abhängigkeit des Bestands [Std]
$RA_{m,i}(BA_m)$	mittlerer Rüstaufwand der Rüstfamilie i in Abhängigkeit des Bestands [Std]
n	Anzahl Rüstfamilien

a) Rüstzeitmatrix im Ausgangszustand

Wechsel von	nach	A	B	C
A		0,3	2,0	3,7
B		2,6	0,2	1,7
C		3,0	2,5	0,1

b) Rüstzeitmatrix mit reduzierten großen Rüstzeiten

Wechsel von	nach	A	B	C
A		0,3	1,0	1,85
B		1,3	0,2	0,85
C		1,5	1,25	0,1

c) Rüstzeitmatrix mit reduzierten kleinen Rüstzeiten

Wechsel von	nach	A	B	C
A		0,15	2,0	3,7
B		2,6	0,1	1,7
C		3,0	2,5	0,05

14017

Abbildung 6-3. Rüstzeitmatrix im Ausgangszustand (a) und Rüstzeitmatrizen mit reduzierten großen (b) und kleinen Rüstzeiten (c)

Um den Rüstaufwand pro Rüstzyklus in den Rüstaufwand je Betriebskalendertag umzuwandeln, muss bekannt sein, wie viele Rüstzyklen pro Tag im Durchschnitt durchlaufen werden. Die Rüstzyklen pro Tag ergeben sich aus dem Quotienten aus der Leistung und der Rüstzykluslänge:

$$RZ_m(BA_m) = \frac{LA_{m,RZB}(BA_m)}{RZL_m(BA_m)} \quad (6-4)$$

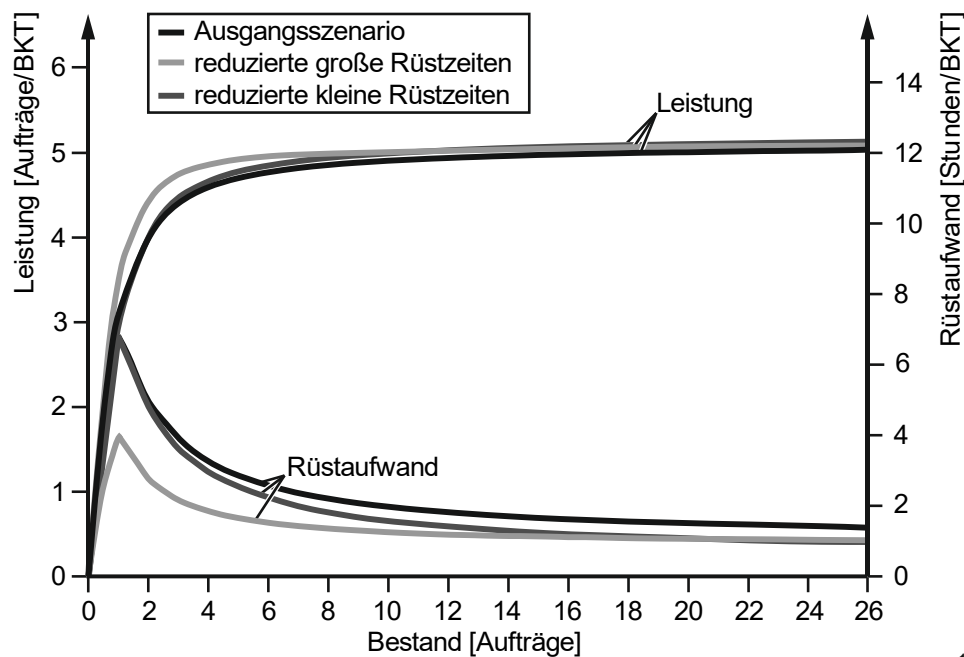
- $RZ_m(BA_m)$ mittlere Anzahl Rüstzyklen pro Betriebskalendertag in Abhängigkeit des Bestands [-/BKT]
 $LA_{m,RZB}(BA_m)$ mittlere Leistung bei Rüstzyklusbildung in Abhängigkeit des Bestands in Anzahl Aufträgen [-/BKT]
 $RZL_m(BA_m)$ mittlere Rüstzykluslänge in Abhängigkeit des Bestands [-]

Der Rüstaufwand pro Tag ergibt sich dann aus dem Produkt des Rüstaufwands pro Rüstzyklus und der Anzahl Rüstzyklen pro Tag:

$$RA_{m,BKT}(BA_m) = RA_m(BA_m) \cdot RZ_m(BA_m) \quad (6-5)$$

- $RA_{m,BKT}(BA_m)$ mittlerer Rüstaufwand pro Betriebskalendertag in Abhängigkeit des Bestands [Std/BKT]
 $RA_m(BA_m)$ mittlerer Rüstaufwand pro Rüstzyklus in Abhängigkeit des Bestands [Std]
 $RZ_m(BA_m)$ mittlere Anzahl Rüstzyklen pro Betriebskalendertag in Abhängigkeit des Bestands [-/BKT]

Für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien ergibt sich dann der Rüstaufwand in Abbildung 6-4.



14018

Abbildung 6-4. Rüstaufwand und Leistung bei Reduzierung der Rüstzeiten

Zwei charakteristische Bereiche definieren dabei den Verlauf des Rüstaufwands. Im Unterlastbereich steigt der Rüstaufwand an, bis der Bestand ausreicht, um das Arbeitssystem zu 100% auszulasten. Ein geringerer Rüstaufwand resultiert im Unterlastbereich daraus, dass nur wenige Aufträge bearbeitet werden und das Arbeitssystem zwischen der Bearbeitung der Aufträge wartet. Sobald das Arbeitssystem zu 100% ausgelastet ist, entsteht eine Warteschlange. Durch die Rüstzyklusbildung werden dann mit zunehmendem Bestand immer mehr Rüstvorgänge durch Auftragsbündelung eingespart.

Es ist erkennbar, dass eine Senkung der großen Rüstzeiten einen hohen Einfluss auf den Rüstaufwand und die Leistung bei niedrigen Beständen hat. Die Senkung der kleinen Rüstzeiten beeinflusst die Leistung bei hohen Beständen. Bei hohen Beständen ist der Einfluss der Rüstzeitreduzierung in diesem Beispiel fast identisch.

Weil die Effekte der Rüstzeitreduzierung stark von den individuellen Rüstzeiten abhängen, kann das Modell Unternehmen dabei helfen, den Einfluss verkürzter Rüstzeiten schnell abzuschätzen. Je nachdem, welche Maßnahmen notwendig sind, um die Rüstzeiten zu senken, können auf Basis der Berechnungen Entscheidungen über deren Nutzen getroffen werden: Ist in dem Beispiel das Arbeitssystem im Übergangsbereich bei niedrigen Beständen positioniert, so wäre der Nutzen reduzierter großer Rüstvorgänge deutlich höher als der reduzierter kleiner Rüstvorgänge. Bei hohen Beständen wäre der Nutzen für die Reduzierung der großen und der kleinen Rüstzeiten gleich. Die Entscheidung über die Rüstzeitreduzierung könnte dann zugunsten der weniger aufwendigen Maßnahme getroffen werden.

6.3.2 Reduzierung der Anzahl der Rüstfamilien

Alternativ zur Reduzierung der Rüstzeiten können auch Maßnahmen zur Reduzierung der Anzahl der Rüstfamilien diskutiert werden. Zum Beispiel könnte eine Modularisierung von Produkten die Variantenvielfalt in der Produktion reduzieren, sodass weniger Rüstfamilien vorliegen. Im besten Falle schafft es ein Unternehmen sogar, die Umrüstprozesse zwischen den Varianten komplett zu vermeiden, sodass keine Rüstfamilien mehr vorliegen. Mithilfe des in dieser Arbeit entwickelten Modells können Unternehmen den Nutzen von Maßnahmen zur Reduzierung der Anzahl der Rüstfamilien bewerten. Dies soll anhand eines Beispiels im Folgenden exemplarisch gezeigt werden. Abbildung 6-5 zeigt die Rüstzeitmatrix für das Beispiel.

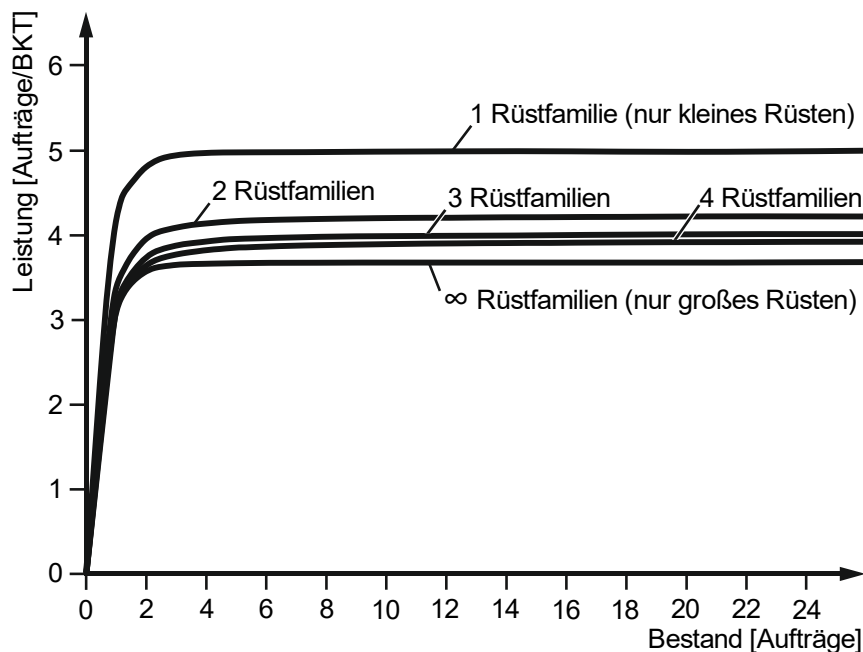
Annahme ist, dass jeweils die großen und kleinen Rüstzeiten identisch für alle Rüstfamilien sind. Das bedeutet, dass der große Rüstvorgang immer 2 Stunden und das Umrüsten innerhalb der Rüstfamilien 0,3 Stunden dauert. Annahme für die Berechnungen ist weiterhin, dass sich die Aufträge homogen auf die Rüstfamilien aufteilen. Bei drei Rüstfamilien entspricht der Anteil der Rüstfamilien also jeweils $\frac{1}{3}$, bei vier Rüstfamilien $\frac{1}{4}$ etc. Die Bearbeitungszeit beträgt für alle Aufträge 4,5 Stunden.

Wechsel von	nach	A	B	...	n
A		0,3	2,0	2,0	2,0
B		2,0	0,3	2,0	2,0
...		2,0	2,0	0,3	2,0
n		2,0	2,0	2,0	0,3

14019

Abbildung 6-5. Rüstzeitmatrix

Abbildung 6-6 zeigt beispielhaft, welchen Einfluss die Anzahl der Rüstfamilien auf die Leistung hat. Der Fall mit einer Rüstfamilie entspricht dem ohne Rüstfamilien. Dies bedeutet, dass zwischen den Aufträgen nur kleine Rüstvorgänge anfallen. Die untere Grenze ist ein Prozess mit unendlich vielen Rüstfamilien, also ein Prozess, bei dem nach jedem Auftrag groß gerüstet wird. Diese beiden Grenzfälle können mit Hilfe der konventionellen Produktionskennlinien nach Nyhuis und Wiendahl ausgelegt werden (Nyhuis & Wiendahl 2012).



14020

Abbildung 6-6. Leistung bei unterschiedlicher Anzahl von Rüstfamilien

Der größte Leistungsverlust ist in dem Beispiel beim Übergang von einer auf zwei Rüstfamilien zu erkennen. Die maximale Leistung sinkt von 5,0 auf 4,2 Aufträge pro Tag. Jede weitere Rüstfamilie verursacht einen zusätzlichen Leistungsverlust. Die Reduzierung der Anzahl Rüstfamilien hat also einen hohen Einfluss auf die Leistung.

6.4 Leitlinien der Rüstzyklusbildung

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich die folgenden Leitlinien für die Produktionsplanung und -steuerung mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten ableiten:

1. Beurteilen Sie das Leistungssteigerungspotenzial.

Unternehmen sollten das Potenzial der Leistungssteigerung durch Rüstzyklusbildung bewerten, bevor sie diese anwenden (Abschnitt 4.3.1). Ist das Potenzial zu gering, so sollten Unternehmen die Aufträge nach Plan-Endtermin priorisieren, um die Termintreue positiv zu beeinflussen.

Ist das Potenzial insbesondere für die Rennerfamilien hoch, so deutet dies zunächst auf einen hohen Verlust durch Rüstprozesse hin. Das strategische Ziel sollte dann die Senkung von Rüstzeiten sein. Nur wenn dies nicht oder zumindest nicht kurzfristig möglich ist, sollten Unternehmen die Rüstzyklusbildung zur Leistungssteigerung anwenden.

2. Reduzieren Sie die Anzahl der Rüstfamilien.

Die negativen Effekte durch reihenfolgeabhängige Rüstzeiten erhöhen sich mit der Anzahl der Rüstfamilien. Je mehr Rüstfamilien vorliegen, desto höher ist der erforderliche Bestand, um eine definierte Leistung zu erreichen. Mit höherem Bestand erhöhen sich wiederum auch die mittleren Durchlaufzeiten und das Potenzial für Durchlaufzeitstreuungen. Neben der Reduzierung von Rüstzeiten sollten Unternehmen daher die Anzahl der Rüstfamilien reduzieren. Mithilfe des Modells ist es möglich, den Einfluss der Anzahl der Rüstfamilien zu quantifizieren, sodass Unternehmen dem Aufwand der Reduzierung den Nutzen gegenüberstellen können.

Beispielhafte Möglichkeiten zur Reduzierung der Anzahl an Rüstfamilien sind:

- Vorrichtungen, die Rüstvorgänge überflüssig machen,
- Bereinigung des Produktionsprogramms um selten nachgefragte Varianten,
- Modularisierung von Produkten und Baugruppen,
- Standardisierung von technischen Prozessen bzw. Prozesshilfsmitteln wie bspw. Ätzmitteln.

3. Positionieren Sie das Arbeitssystem bewusst im Zielkonflikt der logistischen Zielgrößen.

Die Rüstzyklusbildung verursacht einen Zielkonflikt zwischen Bestand, Leistung und streuenden Durchlaufzeiten. Mithilfe des vorgestellten Modells sind Unternehmen in der Lage, das Arbeitssystem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten aktiv zu steuern.

Sie können ein Bestandsniveau auswählen, bei dem eine gewisse Leistung zu Lasten eines definierten Anstiegs der mittleren und maximalen Durchlaufzeiten erreicht wird.

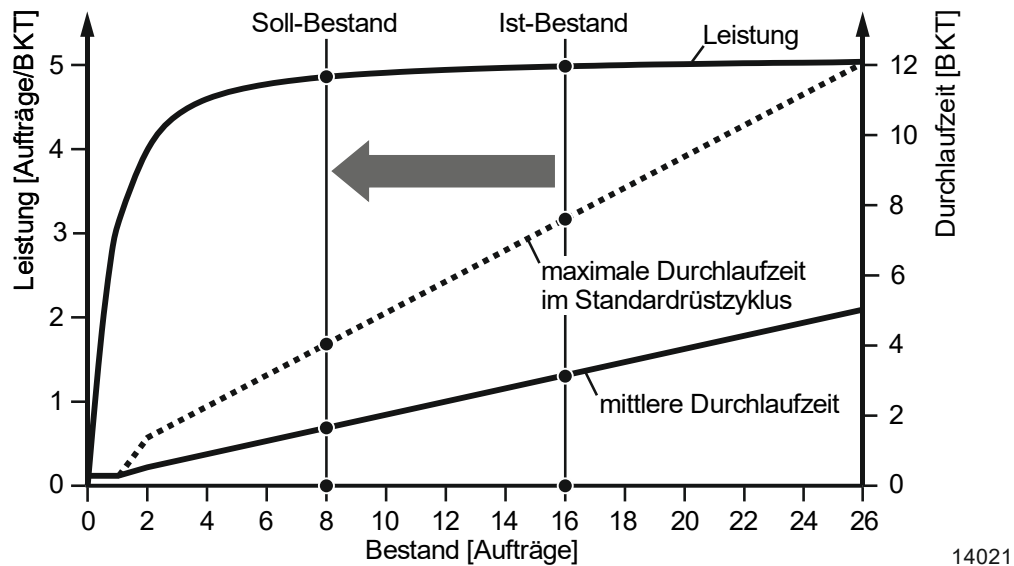


Abbildung 6-7. Logistische Positionierung mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten

Abbildung 6-7 zeigt die logistischen Kennlinien für das Beispiel mit den drei Rüstfamilien aus Kapitel 4. Eine Halbierung der mittleren Bestände von 16 auf 8 Aufträge führt dabei nicht nur zu einer Halbierung der mittleren Durchlaufzeiten von 3,2 auf 1,6 Tage, sondern auch zu einer Reduzierung der maximalen Durchlaufzeiten im Standardrüstzyklus von 7,7 auf 4,0 Tage. Gleichzeitig sinkt die Leistung von 5,0 auf 4,9 Aufträge pro Tag, sodass die Kapazität leicht erhöht werden muss, um die gleiche Leistung zu erreichen.

4. Nutzen Sie das Modell, um realistische Plan-Durchlaufzeiten und Lieferzeitpuffer festzulegen.

Der besondere Vorteil der Rüstzyklusbildung gegenüber anderen rüstzeitoptimalen Reihenfolgeregeln ist, dass sie die Bestimmung von mittleren und mit Einschränkungen auch von maximalen Durchlaufzeiten ermöglicht. Zudem zeigt das Modell, dass sich zwar die maximalen Durchlaufzeiten je nach Volumen einer Rüstfamilie unterscheiden. Die mittleren Durchlaufzeiten ähneln sich meist jedoch für alle Rüstfamilien, sodass Unternehmen eine mittlere Durchlaufzeit bzw. Übergangszeit für die Terminierung nutzen können. Mithilfe der maximalen Durchlaufzeiten kann der Lieferzeitpuffer festgelegt werden. Die Position des Arbeitssystems im Auftragsdurchlauf bestimmt, wie die Terminabweichung im Abgang der Fertigung dadurch beeinflusst wird. Zum Teil kann die durch Rüstzyklusbildung verursachte Streuung an den folgenden Arbeitssystemen durch Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin ausgeglichen werden.

6.5 Fazit zur Auslegung und Implementierung der Reihenfolgebildung

Der vorgestellte Leitfaden soll Unternehmen bei der Auslegung der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung helfen. Als Gestaltungsparameter für die Reihenfolgebildung wurden der Bestand und die Kapazität identifiziert. Mithilfe des Modells und einer gezielten Definition dieser beiden Parameter können sich Unternehmen aktiv im Zielkonflikt positionieren.

Neben der logistischen Positionierung wurde gezeigt, wie das Modell zur Bewertung von Rüstzeitreduzierungen oder Reduzierungen der Anzahl der Rüstfamilien genutzt werden kann. Die Reduzierung der Rüstfamilien bietet das größte Potenzial zur Reduzierung der Rüstaufwände.

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit wurden zudem Leitlinien für die Rüstzyklusbildung entwickelt. Diese sollen Anwendern helfen, die rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung systematisch bewerten und umsetzen zu können.

7 Praxisbeispiel

Um die praktische Relevanz des Vorgehens und des Modells zu überprüfen, wurde die Rüstzyklusbildung in einer realen Anwendungsumgebung getestet. Abschnitt 7.1 stellt die Anwendungsumgebung vor und erläutert, wie in dem Beispiel reihenfolgeabhängige Rüstzeiten entstehen. Anschließend erläutert Abschnitt 7.2 das bisherige Vorgehen zur Reihenfolgebildung. Abschnitt 7.3 beschreibt das Konzept zur Rüstzyklusbildung, das in der Anwendungsumgebung umgesetzt wurde. Anschließend werden die Ergebnisse der Testphase anhand einer Rückmeldedatenanalyse vorgestellt (Abschnitt 7.4). Das Kapitel schließt mit einem Fazit, in dem die Ergebnisse und das Vorgehen kritisch diskutiert werden.

7.1 Anwendungsumgebung

Das Arbeitssystem, an dem die Rüstzyklusbildung getestet wird, befindet sich innerhalb der Fertigung eines europäischen Leiterplattenherstellers. Folgend wird die Fertigung kurz anhand steuerungsrelevanter Fertigungsmerkmale nach Lödding (2016, S. 123-136) beschrieben. Anschließend folgen ein Abschnitt, der das Arbeitssystem beschreibt, an dem die Rüstzyklusbildung getestet wurde, und ein kurzer Abschnitt dazu, wie reihenfolgeabhängige Rüstzeiten in dem Prozess entstehen.

7.1.1 Steuerungsrelevante Fertigungsmerkmale

Fertigungsprinzip. Die Fertigung ist aufgrund der Diversität der Aufträge nach dem Verrichtungs- bzw. Werkstättenprinzip organisiert.

Fertigungsart. Das Unternehmen fertigt Leiterplatten nach Auftrag. Im Jahr 2016 wurden 98% aller Produkte weniger als 12-mal gefertigt, 46% sogar nur einmal im Jahr. Die Produkte werden dabei meist als einzelne Lose gefertigt. Die Fertigungsart ist also eine Einzel- und Kleinserienfertigung.

Teilefluss. Die Teile werden losweise transportiert. Eine überlappte Fertigung ist nicht vorgesehen. An mindestens einem der Arbeitssysteme werden die Lose als Charge bearbeitet.

Variantenanzahl. Im Jahr 2016 wurden mehr als 25.000 unterschiedliche Artikel in der Fertigung hergestellt. Zwischen 9 und 70 Arbeitsvorgänge sind notwendig, um eine Leiterplatte herzustellen. Die Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung gestaltet sich demnach sehr komplex.

Materialflusskomplexität. Der Materialfluss ist mit einem Desintegrationsgrad von 59% als sehr komplex einzustufen²⁶.

Schwankungen des Kunden- und Kapazitätsbedarfs. Je Betriebskalendertag stellt das Unternehmen an seinem deutschen Produktionsstandort durchschnittlich etwa 300 Produktionsaufträge fertig und liefert 120 Kundenaufträge aus. Die Nachfrage unterliegt leichten Schwankungen, die insbesondere von den Planungsaktivitäten der Kunden abhängen.

7.1.2 Beschreibung des Arbeitssystems

Für die Testphase der Rüstzyklusbildung konnte innerhalb der Leiterplattenfertigung ein Arbeitssystem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten identifiziert werden. Es handelt sich um ein Arbeitssystem mit zwei Durchlaufanlagen, die den sogenannten SES-Prozess durchführen. SES steht für die englischen Begriffe: strip – etch – strip. Es handelt sich um einen der Kernprozesse zur Herstellung von Leiterplatten. Die drei Vorgänge Filmstrippen, Ätzen und Zinnstrippen werden nacheinander in einer Durchlaufanlage durchgeführt.

Das Arbeitssystem vor dem SES-Prozess beschichtet die Leiterplatten mit einer Kupferschicht, die mit einer dünnen Zinnschicht bedeckt ist. Die Zinnschicht schützt das Kupfer vor dem späteren Ätzevorgang. Ziel des SES-Prozesses ist es, das Kupfer so abzutragen, dass am Ende nur noch das Leiterbild erhalten bleibt.

Beim Vorgang Filmstrippen wird dafür zunächst der fotosensitive Resist (Fotolack) entfernt. Dieser bedeckt die Flächen im Leiterplattenlayout, an denen keine Kupferstrukturen vorgesehen sind. Im folgenden Ätzevorgang wird das freigelegte Kupfer dann in einer alkalischen Lösung abgetragen. Das Leiterbild bleibt somit unter der schützenden Zinnschicht erhalten. Der letzte Prozess des Zinnstrippens löst die Zinnschicht auf dem verbleibenden Kupfer auf, sodass am Ende nur noch das Leiterbild aus Kupfer erhalten bleibt.

Die neuere und schnellere der zwei Durchlaufanlagen ist an jedem Betriebskalendertag in Betrieb, während die ältere Anlage nur dann in Betrieb ist, wenn zwei Maschinenbediener in einer Schicht anwesend sind.

²⁶ Zur Berechnung des Desintegrationsgrads sei hier auf Sainis (1975, S. 12 f.) verwiesen. Der Desintegrationsgrad beschreibt, wie viele der Kapazitäten durch eine direkte Materialflussbeziehung miteinander verbunden sind. Ein Desintegrationsgrad von 100% bedeutet, dass zwischen allen Kapazitäten eine Materialflussbeziehung vorliegt.

7.1.3 Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten am Arbeitssystem

Je nach Leiterplatte unterscheiden sich die Parameter für die Bearbeitung. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Geschwindigkeiten, über die die Verweildauer einer Leiterplatte in der Durchlaufanlage gesteuert wird. Beim Wechsel zwischen Aufträgen mit unterschiedlichen Kupferschichtdicken muss die Anlage erst leerlaufen. Rüstzeiten entstehen somit durch den Auslaufvorgang der vorherigen Variante.

In Summe existieren 17 unterschiedliche Programme, mit denen die Aufträge in der Anlage bearbeitet werden. Damit die Anlage nicht nach jedem Auftrag leerlaufen muss, werden Aufträge mit der gleichen Kupferschichtdicke gebündelt. Es liegt demnach ein klassischer Fall von reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten vor. Aufträge einer Kupferschichtdicke entsprechen einer Rüstfamilie. Die Rüstzeiten sind allerdings nur abhängig von der Reihenfolge der Aufträge, jedoch nicht von der Reihenfolge der Rüstfamilien. Zwischen Aufträgen einer Rüstfamilie fallen keine Rüstzeiten an, das heißt es gibt keine kleinen Rüstvorgänge. Aus den Geschwindigkeiten und der Länge der Anlage können die Rüstzeiten bestimmt werden, sodass sich die in Abbildung 7-1 dargestellte Rüstzeitmatrix ergibt.

Wechsel von nach	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
A	0	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
B	32	0	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
C	17	17	0	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
D	9	9	9	0	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
E	11	11	11	11	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
F	15	15	15	15	15	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
G	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
H	54	54	54	54	54	54	54	0	54	54	54	54	54	54	54	54	54
I	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	10	10	10
J	13	13	13	13	13	13	13	13	13	0	13	13	13	13	13	13	13
K	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	8	8
L	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10
M	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	0	9	9	9	9
N	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	0	25	25	25
O	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	0	19	19
P	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	0	24
Q	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0

14022

Abbildung 7-1. Rüstzeitmatrix für den SES-Prozess (Rüstzeiten in Minuten)

Die Rüstzeiten betragen je nach Rüstfamilie zwischen 8 und 54 Minuten. Abbildung 7-2 stellt die Anteile der Rüstfamilien für das Jahr 2019 den Anteilen für die Testphase im Juni 2019 gegenüber.

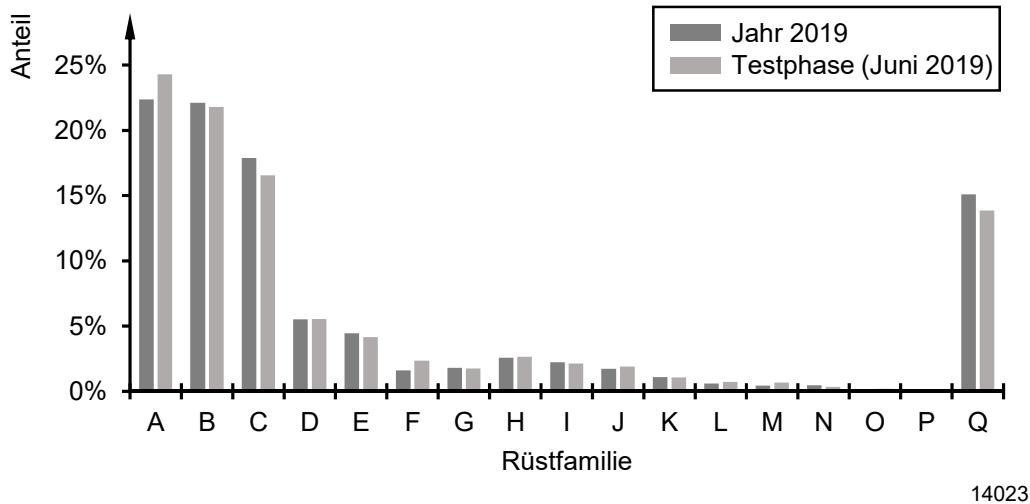


Abbildung 7-2. Anteil der Rüstfamilien im SES-Prozess

Etwa 77% aller Aufträge gehören den vier Rennerfamilien A, B, C und Q an. Die restlichen 23% der Aufträge verteilen sich auf 13 Exotenfamilien. Es ist zu erkennen, dass trotz heterogenem Auftragspektrum des Unternehmens die Aufteilung auf die verschiedenen Rüstfamilien relativ konstant bleibt.

7.2 Ausgangsszenario

Dieser Abschnitt zeigt das bisherige Vorgehen zur Reihenfolgebildung basierend auf Befragungen der Produktionsplaner und der Maschinenbediener sowie die logistische Zielerreichung anhand einer Rückmeldedatenauswertung vor der Einführung der Rüstzyklusbildung.

7.2.1 Vorgehen bei der Reihenfolgebildung

Mehrere Gespräche mit der Produktionsplanung und den Technologieverantwortlichen für den SES-Prozess gaben Aufschluss über das aktuelle Vorgehen bei der Reihenfolgebildung. Zusätzlich beantworteten Maschinenbediener einen Fragebogen, wie sie aktuell die Reihenfolge bilden. Folgende Aussagen konnten abgeleitet werden:

1. Aus den 20 dringendsten Aufträgen in der Warteschlange können die Maschinenbediener frei wählen, welchen Auftrag sie als nächstes bearbeiten. Die Maschinenbediener nutzen hierzu die Informationen auf den Bildschirmen am Arbeitsplatz.

2. Die Aufträge werden vom vorherigen Arbeitssystem in den Bereitstellflächen angeliefert. Die Bereitstellung ist nicht nach Dringlichkeit der Aufträge sortiert. Um Aufträge schneller zu finden, enthält die Liste mit den dringendsten Aufträgen die Wagenummer, auf der die Aufträge liegen.
3. Die Maschinenbediener bündeln Aufträge, um Rüstzeiten zu sparen.
4. Die Reihenfolge, in der die Rüstfamilien gefertigt werden, folgt grob einem Rüstzyklus, da von Rüstfamilien mit dünnen Kupferschichten zu Rüstfamilien mit dicken Kupferschichten gefertigt wird.
5. Produktionsplanung und Technologieverantwortliche zweifeln an, dass die Bündelung der Aufträge einen Nutzen hat.
6. Die Maschinenbediener geben an, dass sie die Rüstfamilie als nächstes auswählen, die den dringendsten Auftrag enthält. Zwei Maschinenbediener geben zusätzlich an, dass sie die Rüstfamilie mit den meisten Aufträgen auswählen.
7. Alle Maschinenbediener geben an, dass sie die Aufträge in der Warteschlange mehrmals pro Schicht sortieren. Ein Bediener gibt zusätzlich an, dass er nach jedem Rüstfamilienwechsel die Aufträge sortiert.
8. Zwei Drittel der Maschinenbediener geben an, Eilaufträge direkt nach Beendigung der aktuellen Rüstfamilie zu bearbeiten. Einer davon gibt zusätzlich an, dass er Eilaufträge erst bearbeitet, wenn weitere Aufträge der gleichen Rüstfamilie bearbeitet werden. Ein Drittel der Bediener gibt an, dass sie keine fixe Regelung für die Priorisierung von Eilaufträgen haben.
9. Zwei Drittel der Maschinenbediener geben an, dass sie mindestens einmal pro Schicht Aufträge überspringen, da sie diese nicht finden.

Grundsätzlich obliegt es also den Maschinenbedienern, wie sie die Aufträge bearbeiten. Einzige Vorgabe ist, dass sie nur Aufträge aus dem Pool der 20 dringendsten Aufträge bearbeiten dürfen. Aufgrund der langen Auslaufphase zwischen Aufträgen unterschiedlicher Rüstfamilien erscheint es den Maschinenbedienern allerdings auch ohne Vorgaben der Produktionsplanung sinnvoll, die Aufträge zu bündeln.

7.2.2 Logistische Zielerreichung

Abbildung 7-3 zeigt eine Übersicht relevanter Analysekenzahlen für den SES-Prozess.

Der Variationskoeffizient der Auftragszeit (ZAU_v) ist mit einem Wert von 0,5 moderat. Da die Rüstzeiten nur bei den ersten Aufträgen einer Rüstfamilie anfallen, liegt die tatsächliche Schwankung der Auftragszeiten jedoch noch höher.

Der Bestand in Anzahl Aufträgen schwankt mit einem Variationskoeffizient von $BA_v=0,6$ relativ stark. Dies bestätigt sich auch bei einer näheren Betrachtung des Durchlaufdiagramms (Abbildung 7-4). Mit einem relativen Bestand (B_{rel}) von 1.119 % liegt der Betriebspunkt des Arbeitssystems im Überlastbereich.

Auftragszeitstrukturkennzahlen	Terminkennzahlen
<ul style="list-style-type: none"> • $ZAU_m = 0,6$ Stunden • $ZAU_v = 0,5$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $TAA_m = 3,2$ BKT • $TAA_s = 0,6$ BKT • $TAZ_m = 3,2$ BKT • $TAZ_s = 0,6$ BKT
Bestandskennzahlen	Durchlaufzeitkennzahlen
<ul style="list-style-type: none"> • $BA_m = 39$ Aufträge • $B_m = 24$ Stunden • $BA_v = 0,6$ • $B_{rel} = 1.119$ % 	<ul style="list-style-type: none"> • $R_m = 0,4$ BKT • $ZDL_m = 0,4$ BKT • $ZDL_{mg} = 0,4$ BKT • $ZDL_v = 1,5$ • $ZDL_{95\%} = 1,0$ BKT
Leistungskennzahlen	
<ul style="list-style-type: none"> • $LA_m = 96$ Aufträge • $n = 11.826$ Aufträge 	

14024

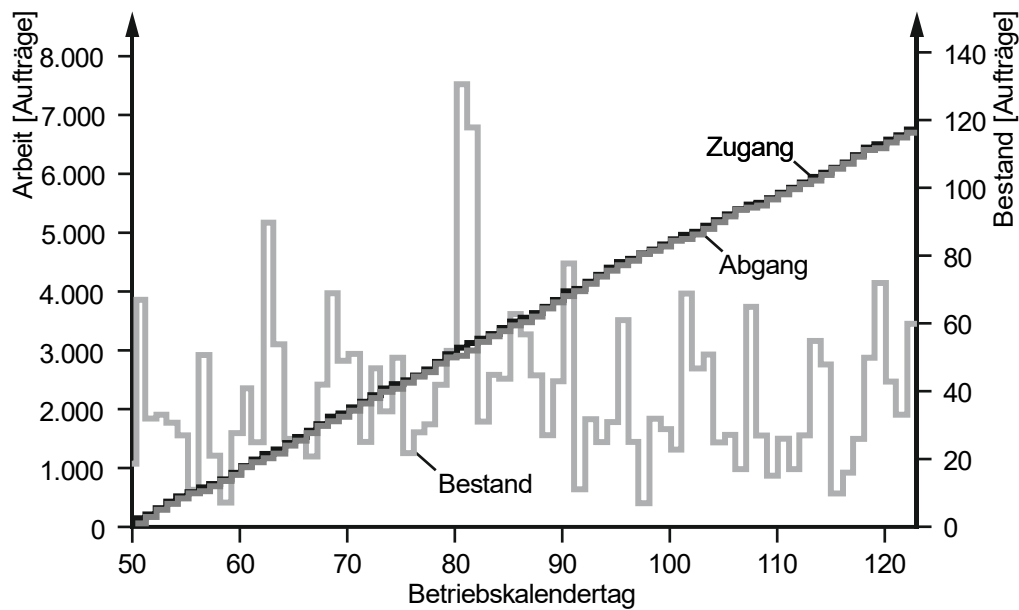
Abbildung 7-3. Kennzahlenanalyse für das Arbeitssystem SES vor der Testphase

Sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Zugangs- (TAZ) und Abgangsterminabweichung (TAA) sind identisch. Ein Mittelwert der Zugangsterminabweichung von 3,2 BKT bedeutet, dass Aufträge dem Arbeitssystem bereits mit einer mittleren Verspätung von 3,2 BKT zugehen. Das betrachtete Arbeitssystem verursacht im Mittel jedoch keine zusätzliche Verspätung. Bemerkenswert ist zudem, dass der SES-Prozess die Standardabweichung der Terminabweichung im Abgang gegenüber dem Zugang nicht erhöht. Die Reihenfolgebildung an vorgelagerten Arbeitssystemen führt demnach bereits zu einer Standardabweichung der Terminabweichung von 0,6 BKT, die Reihenfolgebildung am SES-Prozess erhöht diese nicht.

Die mittlere Reichweite (R_m) und die mittlere, gewichtete Durchlaufzeit (ZDL_{mg}) stimmen überein, was auf einen eingeschwungenen Systemzustand schließen lässt. Der Variationskoeffizient der Durchlaufzeit (ZDL_v) ist mit 1,5 hoch. Durchlaufzeiten streuen also stark. 95% aller Durchlaufzeiten ($ZDL_{95\%}$) liegen jedoch unter einem BKT.

Abbildung 7-4 zeigt das Durchlaufdiagramm für einen Ausschnitt des Zeitraums vor Einführung der Rüstzyklusbildung.

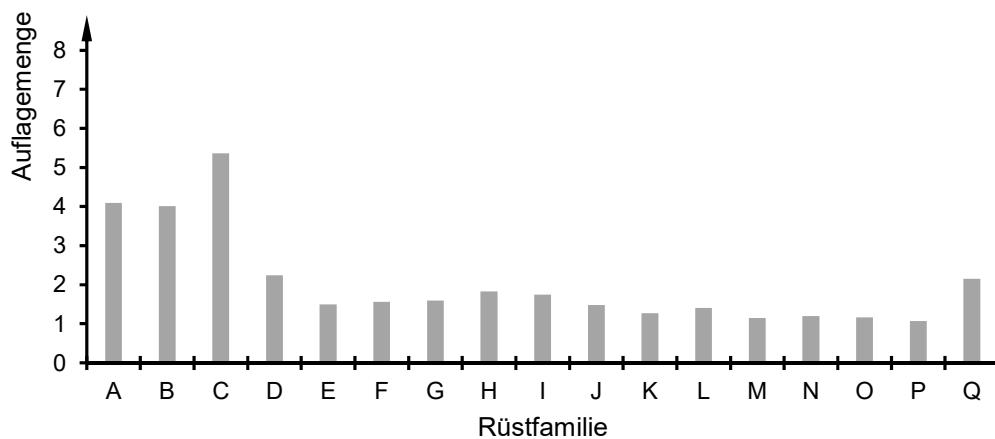
Zugang und Abgang stehen im Gleichgewicht. Hier bestätigt sich auch der Eindruck des hohen Variationskoeffizients des Bestands. Im Betrachtungszeitraum schwankt der Bestand zwischen 7 und 130 Aufträgen. Dabei baut sich jeweils zum Wochenende ein Bestand auf, der am Wochenende abgebaut wird.



14025

Abbildung 7-4. Durchlaufdiagramm für das Arbeitssystem SES vor der Testphase

Abbildung 7-5 zeigt, welche Auflagemengen die Maschinenbediener erreichten. Lediglich für die Rüstfamilien A, B, C, D und Q konnten im Mittel zwei oder mehr Aufträge gebündelt und Rüstvorgänge eingespart werden. Durch die Bündelung wurden im Zeitraum im Mittel 96 Aufträge pro Tag fertiggestellt.



14026

Abbildung 7-5. Auflagemengen der Rüstfamilien vor der Testphase

7.3 Konzept zur Rüstzyklusbildung

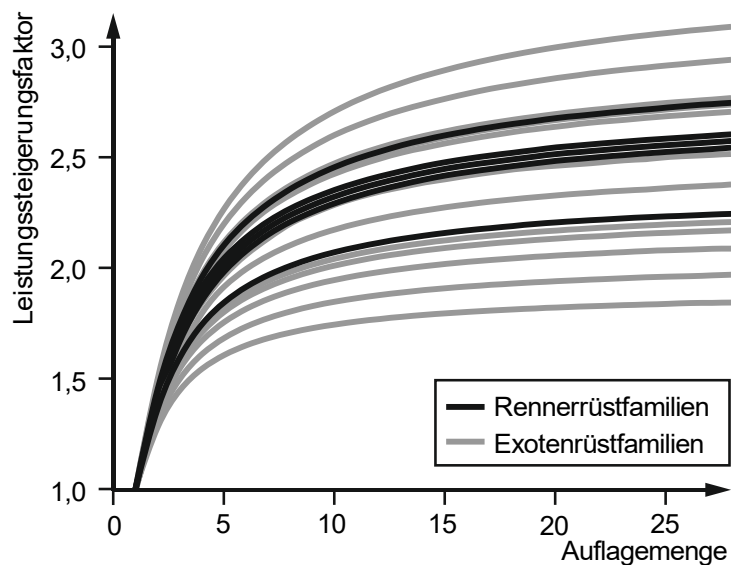
Dieser Abschnitt zeigt, wie die Reihenfolgebildung für den SES-Prozess ausgelegt wurde und welche Hilfsmittel verwendet wurden.

7.3.1 Anwendung der Leitlinien

Die Reihenfolgebildung wird anhand der Leitlinien der Rüstzyklusbildung aus Abschnitt 6.4 ausgelegt.

1. Beurteilen Sie das Leistungssteigerungspotenzial.

Wie in Abschnitt 7.2.1 dargelegt, zweifelten sowohl Technologieverantwortliche als auch die Produktionsplanung an, dass die Bündelung der Aufträge einen nennenswerten Effekt auf die Leistung hat. Mithilfe des entwickelten Modells konnten die Leistungssteigerungseffekte durch Auftragsbündelung für den SES-Prozess erstmalig quantifiziert werden. Abbildung 7-6 zeigt das Ergebnis, wobei die Rennerfamilien schwarz und die Exotenfamilien in grau dargestellt sind.

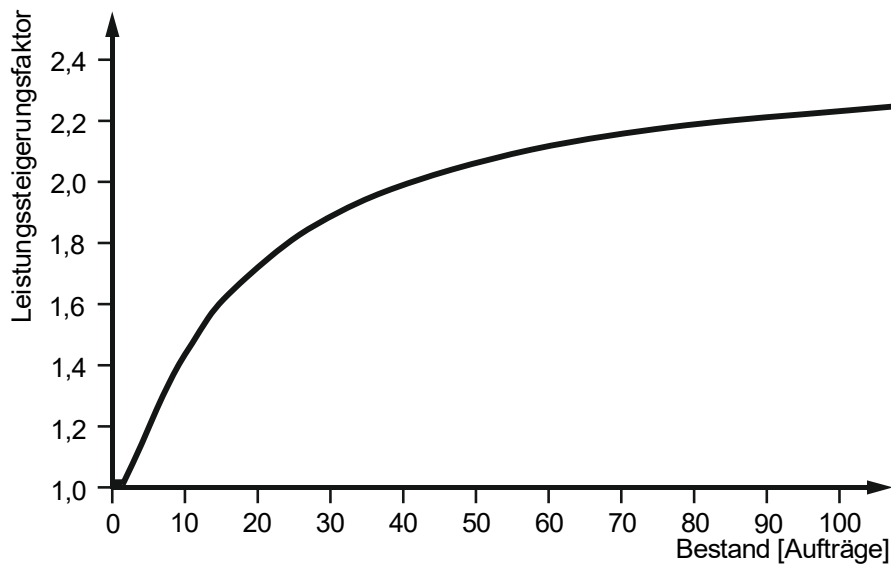


14027

Abbildung 7-6. Leistungssteigerungspotenzial des SES-Prozesses

Bei einer Bündelung von 5 Aufträgen ist bei allen Rüstfamilien ein Leistungssteigerungsfaktor zwischen 1,5 und 2,3 zu erwarten. Das Leistungssteigerungspotenzial ist damit als hoch zu bewerten. Eine Senkung der Rüstzeiten ist kurzfristig nicht erreichbar, sodass eine rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung in diesem Fall sinnvoll und gegenüber einer Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin zu bevorzugen ist.

Abbildung 7-7 zeigt den bestandsbedingten Leistungssteigerungsfaktor für den SES-Prozess, wenn nur eine Anlage in Betrieb ist. Selbst bei einem Bestand von 10 Aufträgen kann bereits ein Leistungssteigerungsfaktor von etwa 1,4 erwartet werden.

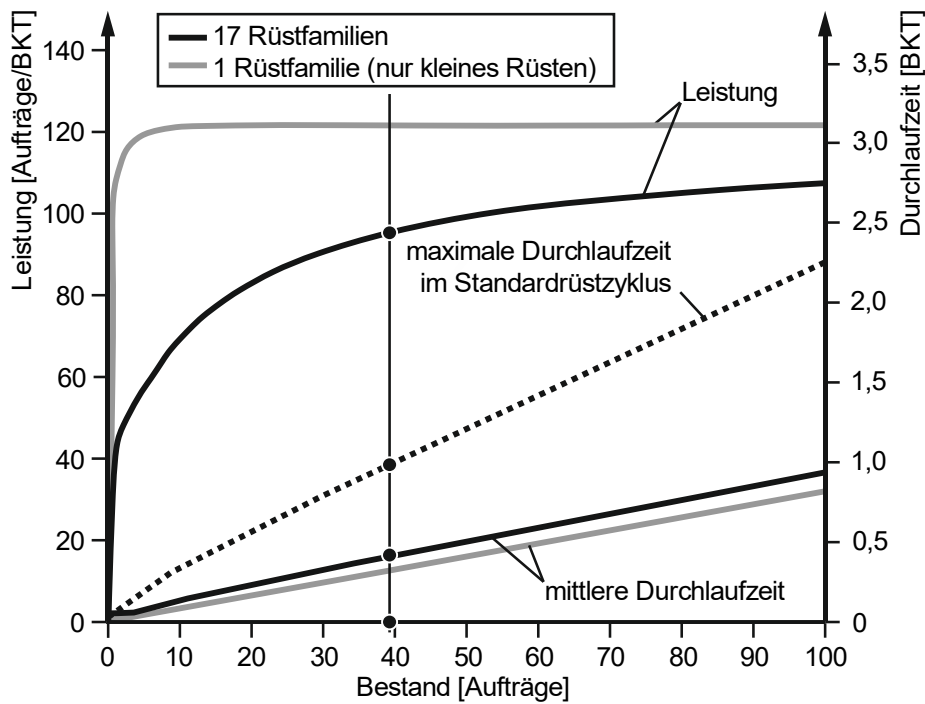


14028

Abbildung 7-7. Leistungssteigerungsfaktor für den SES-Prozess

2. Reduzieren Sie die Anzahl der Rüstfamilien.

Abbildung 7-8 stellt die Kennlinien mit 17 Rüstfamilien den Kennlinien ohne Rüstzeiten gegenüber. Die senkrechte Linie zeigt dabei die aktuelle Positionierung des Arbeitssystems.



14029

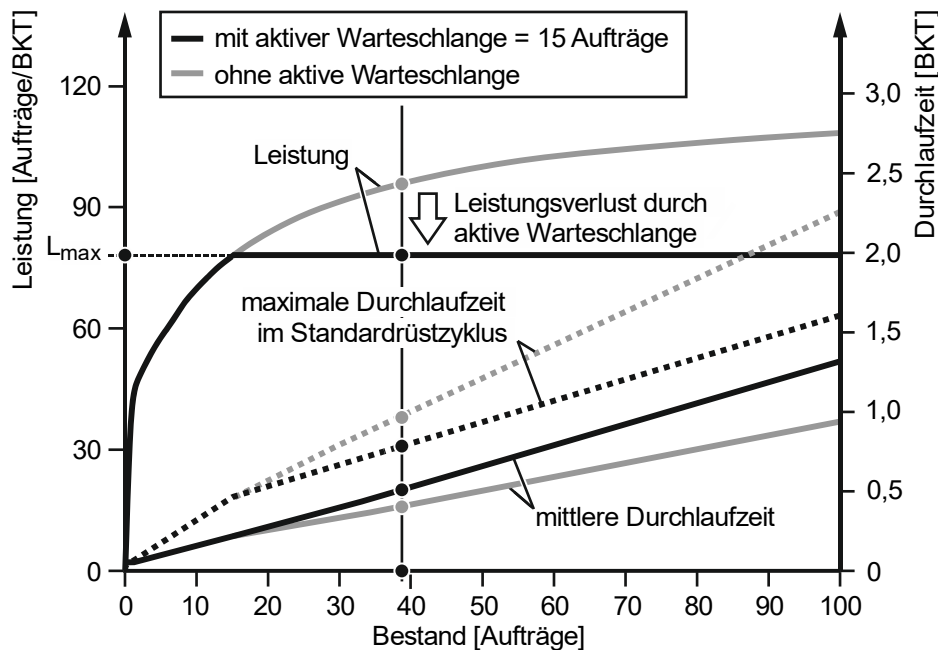
Abbildung 7-8. Einfluss der Rüstfamilien auf die Leistung und die Durchlaufzeit für den SES-Prozess

Hierbei wird deutlich, wie groß der Leistungsverlust durch Rüstaufwände ist. Der Leistungsverlust geht wiederum mit höheren mittleren Durchlaufzeiten einher. Zudem stellt die Abbildung dar, wie stark die Durchlaufzeit durch die rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung schwankt.

Langfristig sollte es demnach das Ziel sein, die Anzahl der Rüstfamilien zu reduzieren. Kurzfristig war die Reduzierung der Rüstfamilien nicht möglich. In Zukunft könnte der Prozess sich so verändern, dass beim Wechsel zwischen den Rüstfamilien kein Auslaufvorgang mehr nötig ist. Alternativ könnte das Unternehmen den Kunden nur noch eine begrenzte Anzahl an Varianten anbieten, wodurch die Anzahl der Rüstfamilien sinkt.

3. Positionieren Sie das Arbeitssystem bewusst im Zielkonflikt der logistischen Zielgrößen.

Für die Produktionsplanung war die Reduzierung der maximalen Durchlaufzeiten besonders wichtig. Die Rüstzyklusbildung soll daher mit aktiver Warteschlange eingeführt werden, was auch gut zum bereits bestehenden Vorgehen passte, aus den dringendsten 20 Aufträgen auszuwählen. Abbildung 7-9 stellt die Kennlinien für Durchlaufzeit und Leistung mit einer aktiven Warteschlange von nunmehr 15 Aufträgen den Kennlinien ohne aktive Warteschlange gegenüber.



14030

Abbildung 7-9. Logistische Positionierung für den SES-Prozess

Das Maximum der Leistung ist durch die aktive Warteschlange auf 77 Aufträge pro Tag beschränkt. Demgegenüber ist die maximale Abweichung von der mittleren Durchlauf-

zeit im Standardrüstzyklus auf 0,33 BKT für alle Bestände größer als 15 Aufträge begrenzt. Bei einem Dreischichtbetrieb entspricht die maximale Abweichung im Standardrüstzyklus also unabhängig von der mittleren Durchlaufzeit eine Schicht. Die Plan-Durchlaufzeit für das Arbeitssystem beträgt 0,5 BKT. Dies entspricht einem Plan-Bestand von 39 Aufträgen. Gegenüber der erschöpfenden Rüstzyklusbildung wird mit der aktiven Warteschlange also ein Leistungsverlust von 96 auf 77 Aufträge pro Tag in Kauf genommen, um die Schwankung der Durchlaufzeit zu reduzieren.

Sollten zwei Anlagen in Betrieb sein, so wird die aktive Warteschlange auf 30 Aufträge erweitert. Häufig wird der Vorschlag diskutiert, die Rüstfamilien auf zwei Anlagen aufzuteilen, sodass jede Anlage nur einen Teil der Rüstfamilien bearbeitet. Können zwei parallele Arbeitsstationen das gleiche Auftragspektrum bearbeiten, so ist von dieser Maßnahme aus folgenden Gründen abzusehen: Die Aufteilung der Rüstfamilien auf zwei Anlagen würde bedeuten, dass sich die Anlagen nicht mehr aus einer, sondern aus zwei getrennten Warteschlangen bedienen. Werden die Rüstfamilien so aufgeteilt, dass beide Anlagen 50% des Auftragspektrums bearbeiten, würde sich die Warteschlange halbieren. Letztendlich sind also gleich viele Rüstaufwände zu erwarten. Es bietet demnach keinen Vorteil. Aufgrund der stochastischen Zugangsprozesse kann es lediglich dazu kommen, dass der Rüstzyklus an einer Anlage schneller durchlaufen wird als an der anderen. Rüstfamilien an der Anlage mit dem langsamen Rüstzyklus warten also lange auf die Bearbeitung, obwohl sie auf der zweiten Anlage bereits gefertigt werden könnten. Das Unternehmen verliert also lediglich einen Teil der Flexibilität, ohne Rüstaufwände einzusparen.

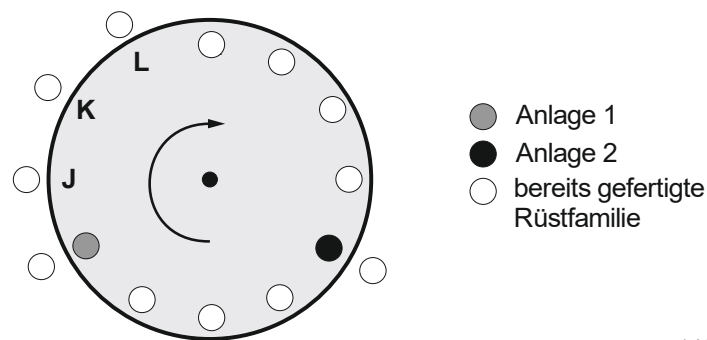
4. Nutzen Sie das Modell, um realistische Plan-Durchlaufzeiten und Lieferzeitpuffer festzulegen.

Die Rüstzyklusbildung mit einer aktiven Warteschlange von 15 Aufträgen ermöglicht es, die maximale Abweichung von der mittleren Durchlaufzeit auf 0,33 BKT zu begrenzen. Die Aufträge werden mit einer konstanten Plan-Durchlaufzeit von 0,5 BKT geplant. Die maximale Durchlaufzeit wird aktuell noch nicht im Produktionsplan berücksichtigt. Vielmehr sollen die Folgearbeitssysteme die Verspätung durch Reihenfolgebildung nach Plan-Endtermin aufholen.

7.3.2 Hilfsmittel zur Rüstzyklusbildung

Die Festlegung eines Zyklus für die Bearbeitung der Rüstfamilien ist für den SES-Prozess besonders sinnvoll. Um eine möglichst hohe Menge des Kupfers aus dem Elektrolyt rückzugewinnen zu können, ist die Fertigung der Rüstfamilien in der Reihenfolge von dünnen zu dicken Kupferschichten sinnvoll. Bereits vor der Einführung der Rüstzyklusbildung wurden die Rüstfamilien grob entsprechend des Zyklus gefertigt.

Abbildung 7-10 zeigt, welches Hilfsmittel am Arbeitssystem zur Unterstützung der Maschinenbediener eingesetzt wird.



14031

Abbildung 7-10. Hilfsmittel zur Rüstzyklusbildung mit zwei Anlagen

Anstelle der Zeiger wurde die Uhr auf eine Magnettafel geklebt, sodass die Position eines Magneten die aktuell gefertigte Rüstfamilie anzeigt. Sind zwei Anlagen in Betrieb, so werden zwei Magneten mit unterschiedlichen Farben verwendet. Um festzuhalten, welche Rüstfamilie im Rüstzyklus bereits gefertigt wurde, werden diese mit einem weißen Magneten abgedeckt. Ist der Rüstzyklus bis Rüstfamilie L durchlaufen, werden die weißen Magneten wieder zur Seite geschoben.

In einer Schulung wurde den Maschinenbedienern das Vorgehen erläutert. Wichtig war dabei, den Vorteil der Rüstzyklusbildung hervorzuheben: Die Rüstzyklusbildung systematisiert die Bündelung der Aufträge, sodass Leistung und Durchlaufzeiten leichter prognostiziert werden können.

7.4 Evaluation der Testphase

Die Reihenfolgebildung wich in der Testphase so erheblich von der Vorgabe ab, dass eine praktische Überprüfung der zyklischen Reihenfolgebildung nicht möglich war.

Über die genauen Ursachen lassen sich aus den Rückmeldedaten keine gesicherten Rückschlüsse ziehen. Allerdings fiel auf, dass sich der Fertigungsrückstand bereits vor der Testphase deutlich auf rund 400 Aufträge erhöht hatte, was einer rückstandsbedingten Terminabweichung von mehr als vier Tagen entspricht. Abbildung 7-11 zeigt den Rückstandsverlauf im Zugang und im Abgang für das Arbeitssystem.

Während der Testphase konnten zudem die folgenden Arten von Reihenfolgeabweichungen identifiziert werden:

„Vergessene“ Aufträge:

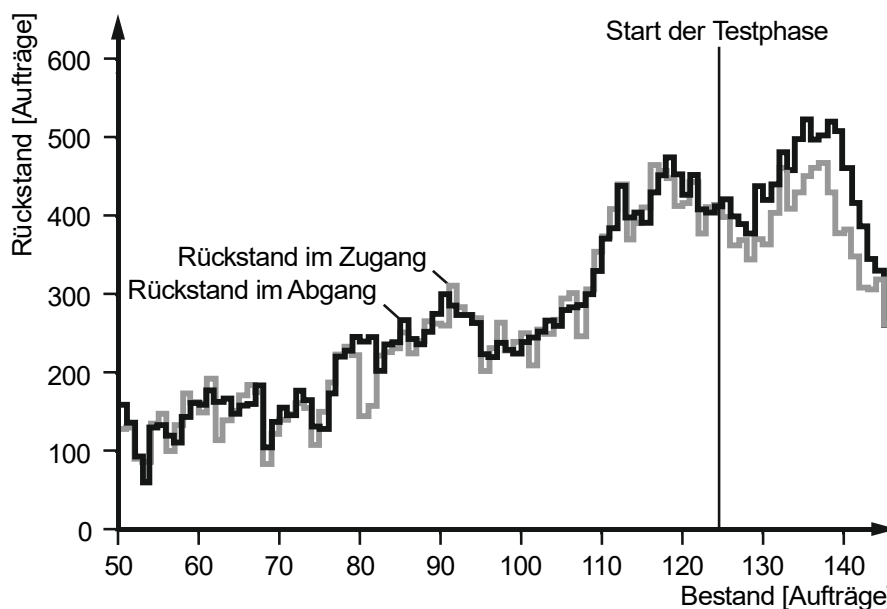
In einigen Fällen hat die Fertigung Aufträge nicht bearbeitet, obwohl diese bereits eine Verspätung von mehr als 4 Tagen hatten. 296 dieser dringenden Aufträge wurden um mehr als einen Rüstzyklus verzögert und beeinflussen so die Streuung, den Maximalwert sowie das 95. Perzentil der Durchlaufzeit.

Missachtung der aktiven Warteschlange:

In vielen Fällen hat die Fertigung Aufträge bearbeitet, obwohl sie noch nicht in der aktiven Warteschlange waren. Ein möglicher Grund hierfür ist der Versuch, den Rückstand des Arbeitssystems durch die Vermeidung von Rüstaufwänden abzubauen. Als Folge hat sich die Rüstzykluslänge insgesamt deutlich erhöht, sodass auch die Streuung der Terminabweichung deutlich zunahm. So umfasste der längste Rüstzyklus 147 statt der erwarteten 36 Aufträge.

Auch wenn zuvor genannte Gründe dazu führen, dass die Modellierung anhand des Praxisbeispiels nicht evaluiert werden kann, so lassen sich für das Vorgehen dennoch folgende Schlussfolgerungen ableiten:

1. Auch bei einer guten Visualisierung der Reihenfolgebildung kann man nicht davon ausgehen, dass die Fertigung die Vorgabe zur Reihenfolgebildung einhält. Vielmehr ist es erforderlich, die Einhaltung der Reihenfolgebildung zumindest zu Beginn engmaschig zu überprüfen (vgl. dazu auch Lödging 2016, S. 520-523)
2. Abweichungen von der Plan-Reihenfolgebildung wirken sich an Arbeitssystemen mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten besonders stark aus, weil die jeweilige Rüstfamilie erst im nächsten Zyklus wieder aufgelegt wird.



14032

Abbildung 7-11. Rückstandsverlauf für das Arbeitssystem SES vor und während der Testphase

8 Erfüllung der Anforderungen

Das entwickelte Modell wurde einerseits in einer simulativen Evaluierung auf seine Gültigkeit untersucht. Andererseits wurde die praktische Relevanz des Vorgehens in einer realen Fertigung überprüft. Dieses Kapitel soll diskutieren, inwieweit die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit die auf Seite 51 aufgestellten Anforderungen erfüllen.

Allgemeingültigkeit. Das Modell ist gültig, wenn die in dieser Arbeit vorgestellte rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung angewendet wird. Einerseits schränkt dies die Allgemeingültigkeit des Modells ein, da es bei Anwendung anderer rüstzeitoptimaler Reihenfolgebildungsverfahren ungültig ist. Andererseits sprechen jedoch viele Argumente für die Anwendung der vorgestellten Rüstzyklusbildung: 1. Die Rüstzyklusbildung hat sich als erfolgreich bei der Abwägung zwischen einer hohen Leistung und einer begrenzten Verzögerung der Aufträge erwiesen. 2. Mithilfe des Modells ist der Einfluss auf die Zielgrößen quantifizierbar und damit planbar.

Prozess- und Ressourcenorientierung. Das Modell kann das Verhalten des Arbeitssystems durch die Modellierung der Leistung vorhersagen. Zudem prognostiziert das Modell die mögliche Verzögerung von Aufträgen am Arbeitssystem. Auf Auftragsebene kann das Modell genutzt werden, um Plan-Durchlaufzeiten der Aufträge zu bestimmen.

Datenverfügbarkeit. Eingangsgrößen des Modells sind die Anteile der Rüstfamilien, die Bearbeitungszeiten und die Rüstzeiten. Bearbeitungs- und Rüstzeiten liegen in Unternehmen üblicherweise zur Planung vor. Anteile der Rüstfamilien sind nicht immer bekannt, können jedoch relativ einfach aus den Rückmeldedaten ermittelt werden.

Möglichkeit zur hierarchischen Verdichtung. Mithilfe des Modells können Plan-Durchlaufzeiten bestimmt werden. Diese Werte können zur Terminierung von Fertigungs- und Kundenaufträgen genutzt werden. Die maximale Durchlaufzeit hilft bei der Bestimmung eines Lieferzeitpuffers.

Die Leistungsprognose kann zur Bestimmung des Kapazitätsbedarfs eines Arbeitssystems genutzt werden. Dieser geht wiederum in die Kapazitätsplanung auf Bereichs- und Fertigungsebene ein.

Quantifizierbarkeit. Das Modell kann den Einfluss der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen quantifizieren. Gleichungen ermöglichen die Berechnung des Einflusses auf die Leistung und die Durchlaufzeit. Dabei liefern die Gleichungen für die Leistung unabhängig von den untersuchten Einflussgrößen valide Ergebnisse. Dies gilt auch für die Mindestdurchlaufzeit, für die mittlere Durchlaufzeit

und für die maximale Durchlaufzeit in einem Standardrüstzyklus mit mittleren Rüstzykluslängen und Auflagemengen.

Die Evaluation hat jedoch gezeigt, dass die maximale Durchlaufzeit bei inhomogener Aufteilung der Rüstfamilien stark von der maximalen Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus abweichen kann. Insgesamt eignen sich die Gleichungen jedoch zur Quantifizierung des Einflusses der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die Leistung und die Durchlaufzeit.

Visualisierbarkeit. Die Ergebnisse des Modells können in Form von Produktionskennlinien in einer Abbildung visualisiert werden. Dies unterstützt das Verständnis für den Zielkonflikt zwischen hoher Leistung und geringer Streuung der Durchlaufzeiten und ermöglicht eine näherungsweise Lösung des Problems.

Zielorientierung. Das Modell beschreibt den Einfluss der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die Zielgrößen Bestand, Leistung und Durchlaufzeit. Die Termintreue wird bislang nur implizit über die maximale Durchlaufzeit betrachtet.

Klarheit und Verständlichkeit. Das Praxisbeispiel hat gezeigt, dass der Zielkonflikt anhand der Produktionskennlinien verständlich und nachvollziehbar erklärt werden kann. Das Vorgehen zur Rüstzyklusbildung inklusive der Hilfsmittel erweist sich ebenfalls als intuitiv verständlich. Einzig die Berechnung der Kennlinien erfordert ein Vorwissen aus der Theorie, sodass die Anwendung des Modells vor eine gewisse Hürde gestellt wird.

Relevanz. Das Praxisbeispiel hat gezeigt, dass die Rüstzyklusbildung in der Praxis prinzipiell gut umsetzbar ist. Die Einhaltung der Vorgaben für die Reihenfolgebildung setzt allerdings eine hohe Disziplin und Motivation der Mitarbeiter voraus.

Genauigkeit. Die simulative Evaluation hat gezeigt, dass das Modell die mittlere Leistung und die mittlere Durchlaufzeit bei Rüstzyklusbildung in praxisrelevanten Bestandsniveaus mit einer Abweichung unter 5% prognostizieren kann.

Für spezifische Rüstzykluslängen und Auflagemengen liefert das Modell genaue Ober- und Untergrenzen für die Durchlaufzeit. Wird die maximale Durchlaufzeit basierend auf mittleren Rüstzykluslängen und Auflagemengen prognostiziert, unterschätzt das Modell die tatsächlich auftretenden maximalen Durchlaufzeiten und bildet damit einen unteren Grenzwert, der bei einer homogenen Aufteilung der Aufträge auf die Rüstfamilien in vielen Fällen das 95. Perzentil der Durchlaufzeitverteilung abbildet.

9 Schlussbetrachtung

Die Schlussbetrachtung soll einen Überblick über die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit und einen Ausblick für weitere Forschungsaktivitäten geben. Abschnitt 9.1 fasst die Inhalte und Ergebnisse der einzelnen Kapitel zusammen. Abschnitt 9.2 gibt basierend auf den Ergebnissen einen Ausblick für mögliche weitere Arbeiten auf dem Gebiet der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung.

9.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, zum einen ein Modell abzuleiten, das beschreibt, wie die zyklische Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien die logistischen Zielgrößen Leistung und Durchlaufzeit beschreibt. Zum anderen war das Ziel, ein Vorgehen zu entwickeln, um die Reihenfolgebildung mit Rüstzyklen auszulegen. Hierdurch soll es Unternehmen ermöglicht werden, das Modell in der Praxis gewinnbringend anzuwenden.

Die zyklische Reihenfolgebildung legt zunächst die Reihenfolge der Rüstfamilien fest. Die Rüstfamilien werden erschöpfend gefertigt. Die Eingangsgrößen des Modells beschränken sich damit auf die Anteile der Rüstfamilien, die Rüstzeiten und Bearbeitungszeiten. Mit diesen Parametern kann das Modell beschreiben, wie die Reihenfolgebildung mit Rüstzyklen die Zielgrößen Leistung und die Durchlaufzeit beeinflusst. Die Darstellung der Ergebnisse als Kennlinien ermöglicht ein intuitives Verständnis des Zielkonflikts und hilft Unternehmen bei der logistischen Positionierung.

In Simulationsversuchen wurde das Modell evaluiert. Die Leistung kann für relevante Bestandswerte genau prognostiziert werden. Auch für die mittlere Durchlaufzeit und für die maximale Durchlaufzeit eines Standardrüstzyklus mit mittleren Rüstzykluslängen und Auflagemengen liefert das Modell valide Ergebnisse. Zusammenfassend kann das Modell den Einfluss der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung auf die logistischen Zielgrößen erklären und damit helfen, den Zielkonflikt zwischen der Leistung und dem Bestand sowie der mittleren und maximalen Durchlaufzeit zu beherrschen.

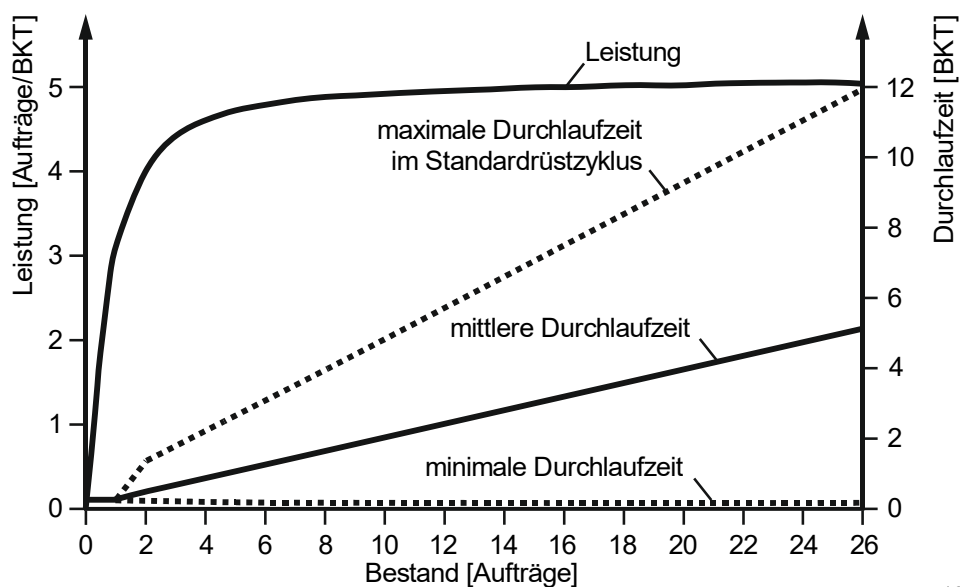
Neben der erschöpfenden Rüstzyklusbildung wurde auch die Rüstzyklusbildung mit Begrenzung auf eine aktive Warteschlange untersucht. Diese kann die Streuung der reihenfolgebedingten Durchlaufzeit zwar begrenzen, verursacht jedoch eine stärkere Streuung der bestandsbedingten Durchlaufzeit.

Die Auslegung der Reihenfolgebildung liefert eine Anleitung, um das Modell in die Praxis zu übertragen. Ein Leitfaden beschreibt die Parametrierung der rüstzeitoptimalen Reihenfolgebildung und stellt Hilfsmittel vor, um sie zu implementieren. Er zeigt auf, wie Unternehmen das Modell nutzen können, um zu bewerten, wie sich eine Rüstzeitreduzierung oder eine verringerte Anzahl von Rüstfamilien auswirken. Leitlinien zur Rüstzyklusbildung fassen die Erkenntnisse aus der Modellierung zusammen.

Ein Praxisbeispiel bestätigt die Relevanz des Modells und des Vorgehens zur Auslegung der Reihenfolgebildung. Die Rüstzyklusbildung wurde dafür an einem Arbeitssystem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten in einer Leiterplattenfertigung getestet.

Wesentliche Erkenntnisse sind, dass das Vorgehen für Praktiker verständlich und nachvollziehbar ist. Auch die Umsetzung der Rüstzyklusbildung mit den vorgestellten Hilfsmitteln erwies sich grundsätzlich als praktikabel. Allerdings wichen die Mitarbeiter in vielen Fällen von der vorgegebenen Reihenfolgebildung ab, was erwartungsgemäß zu starken Verzögerungen einzelner Aufträge führte. Das Modell und das Vorgehen zur Reihenfolgebildung leisten somit sowohl einen Beitrag zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn als auch zur Weiterentwicklung der Praxis.

Mithilfe des entwickelten Modells können die Leistungskennlinie sowie Kennlinien für die mittlere, minimale und maximale Durchlaufzeit in Abhängigkeit des Bestands bestimmt werden. Abbildung 9-1 fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen.



13983

Abbildung 9-1. Darstellung des Zielkonflikts durch Rüstzyklusbildung

Die rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung vermeidet Rüstaufwände, indem Aufträge einer Rüstfamilie nacheinander bearbeitet werden. Im Vergleich zu anderen Verfahren der Reihenfolgebildung kann hierdurch eine höhere Leistung erzielt werden. Wie die Abbildung zeigt, kann die Leistung zwar auch bei hohen Beständen weiter gesteigert werden, jedoch sind die Gewinne nur noch marginal.

Eine rüstzeitoptimale Reihenfolge erfordert jedoch Reihenfolgevertauschungen, sodass Aufträge teilweise stark beschleunigt oder verzögert werden. Dies verursacht eine hohe Streuung der Durchlaufzeit. Der Abstand zwischen minimaler und maximaler Durchlaufzeit steigt mit höherem Bestand.

Die Entscheidung für eine höhere Leistung geht also immer zu Lasten einer streuenden und damit weniger planbaren Durchlaufzeit.

9.2 Ausblick

Während der Bearbeitung zeigten sich folgende Themenschwerpunkte als mögliche Weiterentwicklungen:

Einfluss der Rüstzyklusbildung auf die Termintreue. Bislang wurde lediglich die minimale und maximale Durchlaufzeit modelliert. Es wird damit gezeigt, wie sich die Rüstzyklusbildung im Vergleich zu einer FIFO-Reihenfolgebildung verhält. Wie sich dies auf die Abgangsterminabweichung des Arbeitssystems auswirkt, bleibt unberücksichtigt. Mögliche Folgearbeiten können den Einfluss der Rüstzyklusbildung auf die Abgangsterminabweichung unter Berücksichtigung der Zugangsterminabweichung untersuchen (vgl. Mayer 2018). Dabei ist zu erwarten, dass die Rüstzyklusbildung eine Streuung der Terminabweichung verursacht. Die Erweiterung auf ein Modell, das den Einfluss der Rüstzyklusbildung auf die Terminabweichung beschreibt, würde eine vollständige Beschreibung des Zielkonflikts ermöglichen.

Einfluss der Rüstzyklusbildung auf Lagerbestände. Bislang bildet das Modell nur den Einfluss der Rüstzyklusbildung auf die Zielgrößen eines einzelnen Arbeitssystems ab. In einer Lagerfertigung verursacht die rüstzeitoptimale Reihenfolgebildung einen weiteren Zielkonflikt: Die Rüstzyklusbildung führt zu temporären Spitzen bei den Zugängen in die Läger nach dem Produktionsbereich. Dabei entsteht ein Zielkonflikt zwischen einer hohen Leistung in der Fertigung durch hohe Auflagemengen und damit einhergehenden langen Rüstzyklen auf der einen Seite und niedrigen Beständen in den Lägern auf der anderen Seite. In Folgearbeiten könnte ein Modell entwickelt werden, das die Lager- und Produktionszielgrößen miteinander verbindet, um sich im Zielkonflikt positionieren zu können.

Aufteilung der Rüstfamilien in Renner und Exoten. Innerhalb dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass jede Rüstfamilie genau einmal pro Rüstzyklus aufgelegt wird. Seltene Rüstfamilien werden daher häufig entweder übersprungen, da kein Auftrag in der Warteschlange vorliegt, oder mit nur einem Auftrag gefertigt, sodass keine Rüstvorgänge eingespart werden können. Unterscheiden sich die Anteile der Rüstfamilien stark, erscheint es daher sinnvoll, diese in Exoten und Renner zu unterteilen. Renner werden dann in jedem Rüstzyklus aufgelegt und erreichen verhältnismäßig kurze Durchlaufzeiten. Exoten werden dagegen nur in jedem zweiten oder dritten Rüstzyklus aufgelegt, sodass sich die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass mehr als ein Auftrag in der Warteschlange vorliegt, allerdings auf Kosten einer längeren Durchlaufzeit. Weitere Arbeiten könnten also überprüfen, ob und wie sich das Modell ändert, damit es auch die Aufteilung der Rüstfamilien in Renner und Exoten abbilden kann.

Literaturverzeichnis

Allahverdi, Ali; Gupta, Jatinder N.D; Aldowaisan, Tariq (1999): A Review of Scheduling Research Involving Setup Considerations. In: Omega 27 (2), S. 219-239.

Baker, Kenneth R. (1968): Priority Dispatching in the Single Channel Queue with Sequence-Dependent Setups. In: The journal of industrial engineering 19 (4), S. 203-206.

Bechte, Wolfgang (1979a): Konzeption einer statistischen Ablaufkontrolle für die Fertigungssteuerung. In: Hans Kettner (Hrsg.): Fabrikanlagen-Kolloquium '79. Hannover: poppdruck, S. 147-163.

Bechte, Wolfgang (1979b): Methoden und Hilfsmittel der Durchlaufzeit- und Bestandsanalyse in Klein- und Mittelbetrieben. Fachbericht aus dem Institut für Fabrikanlagen der Technischen Universität Hannover. Berlin: Beuth.

Bechte, Wolfgang (1984): Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Bertsch, Sebastian; Schmidt, Matthias; Nyhuis, Peter (2014): Modeling of lateness distributions depending on the sequencing method with respect to productivity effects. In: CIRP Annals 63 (1), S. 429-432.

Chiang, Tsung-Che; Fu, Li-Chen (2004): Solving the FMS scheduling problem by critical ratio-based heuristics and the genetic algorithm. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation 3, S. 3131–3136.

Conway, Richard W.; Maxwell, William L.; Miller, Louis W. (1967): Theory of Scheduling. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

Dombrowski, Uwe (1988): Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Engehausen, Friederike; Lödding, Hermann (2017a): Modeling Lateness for Workstations with Setup Cycles. In: Hermann Lödding, Ralph Riedel, Klaus-Dieter Thoben, Gregor von Cieminski und Dimitris Kiritsis (Hrsg.): Advances in production management systems. Hamburg, Germany. Cham: Springer, S. 509-517.

Engehausen, Friederike; Lödding, Hermann (2017b): Produktionskennlinien für Arbeitssysteme mit Rüstzyklen. Leistungssteigerung durch Rüstzyklusbildung. In: wt Werkstattstechnik online (4), S. 282-287.

Erdlenbruch, Burkhard (1984): Grundlagen neuer Auftragssteuerungsverfahren für die Werkstattfertigung. Untersuchungen mit Hilfe eines praxisingerechten Analyse- und Simulationskonzeptes. Zugl.: Hannover, Techn. Hochsch., Diss. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Gutenberg, Erich (1983): Die Produktion. 24., unveränd. Aufl. Berlin: Springer.

Heger, Jens; Branke, Jürgen; Hildebrandt, Torsten; Scholz-Reiter, Bernd (2016): Dynamic adjustment of dispatching rule parameters in flow shops with sequence-dependent set-up times. In: International journal of production research 54 (22), S. 6812-6824.

Hopp, Wallace J.; Spearman, Mark L. (2008): Factory physics. 3. ed., internat. ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin.

Kekre, Sunder (1987): Performance of a Manufacturing Cell with Increased Product Mix. In: IIE Transactions 19 (3), S. 329-339.

Kettner, Hans; Jendralski, Jürgen (1979): Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung - ein Sorgenkind der Produktion. In: VDI-Z 121 (9), S. 410-416.

Khintchine, A. (1927): Über das Gesetz der großen Zahlen. In: Math. Ann. 96 (1), S. 152-168.

Kivenko, Kenneth (1981): Managing work-in-process inventory. New York: Dekker.

Koch, Christoph (2018): Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger. TUHH Universitätsbibliothek.

Kuyumcu, Arif (2013): Modellierung der Termintreue in der Produktion. Technische Universität Hamburg-Harburg.

Lee, Young Hoon; Bhaskaran, Kumar; Pinedo, Michael (1997): A heuristic to minimize the total weighted tardiness with sequence-dependent setups. In: IIE Transactions 29 (1), S. 45-52.

Liao, Qingmiao (2018): Study of SVM-based Intelligent Dispatcher for Parallel Machines Scheduling with Sequence-dependent Setup Times. August 10-12, 2018, Hong Kong. Piscataway, NJ: IEEE.

Little, John D. C. (1961): A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. In: Operations Research 9 (3), S. 383-387.

- Lödning, Hermann (2016): Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Lödning, Hermann; Nyhuis, Peter; Schmidt, Matthias; Kuyumcu, Arif (2013): Modelling lateness and schedule reliability: how companies can produce on time. In: Production Planning & Control 25 (1), S. 59-72.
- Lödning, Hermann; Piontek, Andreas (2017): The surprising effectiveness of earliest operation due-date sequencing. In: Production Planning & Control 28 (5), S. 459-471.
- Lödning, Hermann; Piontek, Andreas (2018): Extending Little's Law to single order throughput times. In: Production Planning & Control 29 (1), S. 1-8.
- Ludwig, Eberhard (1995): Modellgestützte Diagnose logistischer Produktionsabläufe. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1994. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl.
- Ludwig, Eberhard; Nyhuis, Peter (1992): Verbesserung der Termineinhaltung in komplexen Fertigungsbereichen durch einen neuen Ansatz zur Plan-Durchlaufzeit-Ermittlung. In: W. Görke, H. Rininsland und M. Syrbe (Hrsg.): Information als Produktionsfaktor. Berlin: Springer Verlag, S. 473-483.
- Mayer, Jonas (2018): Quantitative Modellierung logistischer Auswirkungen von rüstopimalen Auftragsreihenfolgen an Arbeitssystemen. Dissertation. Hannover.
- Missbauer, H. (1997): Order release and sequence-dependent setup times. In: International Journal of Production Economics 49 (2), S. 131-143.
- Nomden, G.; van der Zee, D.-J.; Slomp, J. (2008): Family-based dispatching: anticipating future jobs. In: International journal of production research 46 (1), S. 73-97.
- Nyhuis, Peter (1991): Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1991. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl.
- Nyhuis, Peter; Cieminski, Gregor von; Fischer, Andreas; Feldmann, Klaus (2005): Applying Simulation and Analytical Models for Logistic Performance Prediction. In: CIRP Annals 54 (1), S. 417-422.
- Nyhuis, Peter; Mayer, Jonas (2017): Modelling the influence of setup optimized sequencing on lateness and productivity behaviour of workstations. In: CIRP Annals 66 (1), S. 421-424.
- Nyhuis, Peter; Wiendahl, Hans-Peter (2012): Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Oertli-Cajacob, Peter (1977): Praktische Wirtschaftskybernetik. Ein praxisorientierter Leitfaden für die Gestaltung und Optimierung der Planung und Organisation in Industrie, Handel und Verwaltung ; neue Methoden und deren Anwendung. Teilw. zugl.: Zürich, Eidgenössische Techn. Hochsch., Diss., 1975. 1. Aufl. München: Hanser.

Orlicky, Joseph A. (1975): Material requirements planning. The new way of life in production and inventory management. New York: McGraw-Hill.

Pawellek, Günther (2007): Produktionslogistik. Planung - Steuerung - Controlling ; mit 42 Übungsfragen. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag.

Petermann, Dirk (1996): Modellbasierte Produktionsregelung. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Pickardt, Christoph W.; Branke, Jürgen (2012): Setup-oriented dispatching rules – a survey. In: International journal of production research 50 (20), S. 5823-5842.

REFA (1952): Das REFA-Buch. Band 1, Arbeitsgestaltung. 2. Aufl., 6.-10. Tsd. München: Carl Hanser Verlag.

REFA (1978): Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 2, Datenermittlung. 6. Aufl., 151.-249. Tsd. München: Hanser.

Sainis, Petros (1975): Ermittlung von Durchlaufzeiten in der Werkstattfertigung aus Daten des Fertigungsprogrammes mit Hilfe der Warteschlangentheorie. Verlag nicht ermittelbar.

Sawicki, John D. (1973): The Problems of Tardiness and Saturation in a Multi-Class Queue with Sequence-Dependent Setups. In: A I I E Transactions 5 (3), S. 250-255.

Schmitz, Paul-Gerhard (1961): Analytische Beziehungen zwischen Produktionsverlauf, Belastung und unvollendeter Produktion in Maschinenbaubetrieben. Berlin: VEB Verlag Technik.

Schuh, Günther (2007): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte. Dordrecht: Springer.

Seitz, Melissa; Härtel, Lasse; Hübner, Marco; Merkel, Lukas; be Isa, Johannes; Enghausen, Friederike et al. (2018): PPS-Report 2017/18. Studienergebnisse. 1. Erstausgabe. Garbsen: TEWISS.

Shingō, Shigeo (2019): A revolution in manufacturing. The SMED system. 1st. London: Routledge.

VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, 2014: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen.

Wedemeyer, Hans-Georg von (1989): Entscheidungsunterstützung in der Fertigungssteuerung mit Hilfe der Simulation. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1989. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Wiendahl, Hans-Peter (1996): Modelle und Systeme des Produktionscontrollings. In: Walter Eversheim und Günther Schuh (Hrsg.): Hütte. Produktion und Management; Betriebshütte. 7., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 18/32-18/63.

Wiendahl, Hans-Peter (1997): Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. München: Hanser.

Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.) (2002): Erfolgsfaktor Logistikqualität. Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung. 2. Auflage. Berlin: Springer.

Wiendahl, Hans-Peter (2008): Betriebsorganisation für Ingenieure. Mit 2 Tabellen. 6., aktualisierte Aufl. München: Hanser.

Yu, Kwok-Wai (2001): Terminkennlinie. Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Zugl.: Hannover, Univ., Diss. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Anhang: Evaluationsergebnisse

Eingangsdaten der Versuchsreihen: Rüstzeitmatrizen

a) Reihenfolgeabhängigkeit nur zwischen Aufträgen

Wechsel von nach	A	B	C
A	0,3	2,0	1,7
B	2,5	0,2	1,7
C	2,5	2,0	0,1

b) Reihenfolgeabhängigkeit zwischen Aufträgen und Rüstfamilien

Wechsel von nach	A	B	C
A	0,3	2,0	3,7
B	2,7	0,2	1,7
C	2,5	3,0	0,1

Abbildung A-1. Rüstzeitmatrizen für Simulationsreihen mit drei Rüstfamilien und Reihenfolgeabhängigkeit nur zwischen Aufträgen (a) und Reihenfolgeabhängigkeit zwischen Aufträgen und Rüstfamilien (b)

Wechsel von nach	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0,3	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
B	2,5	0,2	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
C	2,5	2,0	0,2	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
D	2,5	2,0	1,7	0,3	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
E	2,5	2,0	1,7	2,8	0,1	3,2	2,3	1,3	2,1
F	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	0,3	2,3	1,3	2,1
G	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	0,2	1,3	2,1
H	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	0,1	2,1
I	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	0,2

Abbildung A-2. Rüstzeitmatrix für Simulationsreihen mit neun Rüstfamilien und Reihenfolgeabhängigkeit nur zwischen Aufträgen

Wechsel von nach	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0,3	2,0	3,1	2,8	2,5	2,1	2,7	4,3	2,3
B	2,3	0,2	1,7	3,2	2,0	1,8	2,5	3,0	3,8
C	3,0	2,7	0,2	2,8	3,5	3,2	3,7	2,9	3,7
D	3,3	1,9	2,5	0,3	1,5	3,5	2,0	1,7	2,2
E	4,2	3,3	3,7	3,3	0,1	3,2	3,5	3,8	4,1
F	2,5	3,2	2,7	3,4	3,0	0,3	2,3	3,0	2,8
G	2,2	1,5	1,9	2,1	2,7	3,0	0,2	1,3	2,0
H	2,5	2,2	3,2	2,9	3,3	2,8	3,3	0,1	2,1
I	2,5	3,0	2,7	3,2	2,8	4,2	3,3	2,6	0,2

Abbildung A-3. Rüstzeitmatrix für Simulationsreihen mit neun Rüstfamilien und Reihenfolgeabhängigkeit zwischen Aufträgen und Rüstfamilien

Wechsel von nach	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
A	0,3	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
B	2,5	0,2	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
C	2,5	2,0	0,2	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
D	2,5	2,0	1,7	0,3	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
E	2,5	2,0	1,7	2,8	0,1	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
F	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	0,3	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
G	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	0,2	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
H	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	0,1	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
I	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	0,2	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
J	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	0,3	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
K	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	0,2	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
L	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	0,2	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
M	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	0,3	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
N	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	0,1	3,2	2,3	1,3	2,1
O	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	0,3	2,3	1,3	2,1
P	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	0,2	1,3	2,1
Q	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	0,1	2,1
R	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	0,2

Abbildung A-4. Rüstzeitmatrix für Simulationsreihen mit 18 Rüstfamilien und Reihenfolgeabhängigkeit nur zwischen Aufträgen

Wechsel von nach	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
A	0,3	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
B	2,5	0,2	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
C	2,5	2,0	0,2	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
D	2,5	2,0	1,7	0,3	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
E	2,5	2,0	1,7	2,8	0,1	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
F	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	0,3	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
G	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	0,2	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
H	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	0,1	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
I	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	0,2	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
J	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	0,3	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
K	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	0,2	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
L	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	0,2	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
M	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	0,3	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1
N	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	0,1	3,2	2,3	1,3	2,1
O	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	0,3	2,3	1,3	2,1
P	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	0,2	1,3	2,1
Q	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	0,1	2,1
R	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	2,1	2,5	2,0	1,7	2,8	1,5	3,2	2,3	1,3	0,2

Abbildung A-5. Rüstzeitmatrix für Simulationsreihen mit 18 Rüstfamilien und Reihenfolgeabhängigkeit zwischen Aufträgen und Rüstfamilien

Eingangsdaten der Versuchsreihen: Anteile der Rüstfamilien

Tabelle A-1. Anteile der Rüstfamilien bei Simulationsreihen mit drei Rüstfamilien und homogener Aufteilung

Rüstfamilie	A	B	C
Anteil [%]	33,3	33,3	33,3

Tabelle A-2. Anteile der Rüstfamilien bei Simulationsreihen mit drei Rüstfamilien und inhomogener Aufteilung

Rüstfamilie	A	B	C
Anteil [%]	85,0	13,0	2,0

Tabelle A-3. Anteile der Rüstfamilien bei Simulationsreihen mit neun Rüstfamilien und homogener Aufteilung

Rüstfamilie	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Anteil [%]	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1

Anhang

Tabelle A-4. Anteile der Rüstfamilien bei Simulationsreihen mit neun Rüstfamilien und inhomogener Aufteilung

Rüstfamilie	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Anteil [%]	43,0	1,4	5,0	2,5	35,0	5,0	0,5	6,3	1,3

Tabelle A-5. Anteile der Rüstfamilien bei Simulationsreihen mit 18 Rüstfamilien und homogener Aufteilung

Rüstfamilie	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Anteil [%]	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5

Tabelle A-6. Anteile der Rüstfamilien bei Simulationsreihen mit 18 Rüstfamilien und inhomogener Aufteilung

Rüstfamilie	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Anteil [%]	40,0	1,0	5,0	20,0	2,0	1,0	10,0	1,0	0,5	0,1	2,0	1,0	1,0	2,0	3,0	0,2	10,0	0,2

Übersicht verwendeter Abkürzungen

A	Auslastung [%]
BA _m	mittlerer Bestand in Anzahl Aufträgen [-]
BA _v	Variationskoeffizient des Bestands [-]
LA _m	mittlere Leistung in Anzahl Aufträgen [-/BKT]
L _m	mittlere Leistung [Std/BKT]
LSF	Leistungssteigerungsfaktor [-]
Mod	Ergebnis der Modellierung
RZB	Rüstzyklusbildung
RZB + WS	Rüstzyklusbildung mit aktiver Warteschlange
Sim	Ergebnis der Simulation
WS	Warteschlange
ZDL _m	mittlere Durchlaufzeit [BKT]
ZDL _{max}	maximale Durchlaufzeit [BKT]
ZDL _{max,m}	maximale Durchlaufzeit im Standardrüstzyklus [BKT]
ZDL _{min}	minimale Durchlaufzeit [BKT]
ZDL _{95%}	95. Perzentil der Durchlaufzeiten [BKT]
Δ	Betrag der prozentualen Abweichung der Modellierung von der Simulation [%]
∅	Durchschnittswert

Übersicht der Parameter der Versuchsreihen

#	Bestandsstreuung	Anzahl Rüstfamilien	Aufteilung der Rüstfamilien	Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten	Reihenfolgebildung
1	keine	3	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
2	keine	3	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
3	keine	3	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
4	keine	3	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
5	keine	3	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
6	keine	3	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
7	keine	3	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
8	keine	3	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
9	keine	9	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
10	keine	9	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
11	keine	9	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
12	keine	9	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
13	keine	9	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
14	keine	9	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
15	keine	9	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
16	keine	9	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
17	keine	18	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
18	keine	18	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
19	keine	18	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
20	keine	18	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
21	keine	18	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
22	keine	18	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
23	keine	18	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
24	keine	18	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
25	gering	3	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
26	gering	3	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
27	gering	3	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
28	gering	3	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
29	gering	3	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
30	gering	3	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
31	gering	3	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
32	gering	3	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
33	gering	9	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
34	gering	9	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
35	gering	9	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
36	gering	9	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
37	gering	9	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
38	gering	9	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
39	gering	9	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
40	gering	9	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
41	gering	18	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
42	gering	18	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS

Abbildung A-6. Übersicht der Parameter der Versuchsreihen 1-42

#	Bestands- streuung	Anzahl Rüst- familien	Aufteilung der Rüst- familien	Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten	Reihen- folge- bildung
43	gering	18	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
44	gering	18	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
45	gering	18	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
46	gering	18	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
47	gering	18	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
48	gering	18	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
49	mittel	3	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
50	mittel	3	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
51	mittel	3	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
52	mittel	3	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
53	mittel	3	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
54	mittel	3	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
55	mittel	3	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
56	mittel	3	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
57	mittel	9	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
58	mittel	9	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
59	mittel	9	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
60	mittel	9	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
61	mittel	9	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
62	mittel	9	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
63	mittel	9	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
64	mittel	9	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
65	mittel	18	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
66	mittel	18	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
67	mittel	18	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
68	mittel	18	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
69	mittel	18	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
70	mittel	18	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
71	mittel	18	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
72	mittel	18	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
73	hoch	3	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
74	hoch	3	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
75	hoch	3	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
76	hoch	3	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
77	hoch	3	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
78	hoch	3	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
79	hoch	3	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
80	hoch	3	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
81	hoch	9	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
82	hoch	9	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
83	hoch	9	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
84	hoch	9	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
85	hoch	9	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB

Abbildung A-7. Übersicht der Parameter der Versuchsreihen 43-85

#	Bestands- streuung	Anzahl Rüst- familien	Aufteilung der Rüst- familien	Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten	Reihen- folge- bildung
86	hoch	9	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
87	hoch	9	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
88	hoch	9	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
89	hoch	18	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
90	hoch	18	homogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
91	hoch	18	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
92	hoch	18	homogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS
93	hoch	18	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB
94	hoch	18	inhomogen	nur zwischen Aufträgen	RZB + WS
95	hoch	18	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB
96	hoch	18	inhomogen	zwischen Aufträgen und Rüstfamilien	RZB + WS

Abbildung A-8. Übersicht der Parameter der Versuchsreihen 86-96

Evaluationsergebnisse

Parameter Versuchsreihe 1

Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	4,0	4,0	0,9%	26,5	26,2	1,0%	1,1	1,1	0,9%
2	0	100	100	0,0%	4,0	4,3	5,3%	26,5	27,9	5,2%	1,1	1,2	5,3%
3	0	100	100	0,0%	4,3	4,5	3,7%	28,5	29,5	3,7%	1,2	1,2	3,8%
4	0	100	100	0,0%	4,5	4,6	2,1%	29,7	30,3	2,1%	1,2	1,3	2,1%
5	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	1,5%	30,5	30,9	1,4%	1,3	1,3	1,5%
7	0	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,8%	31,4	31,6	0,7%	1,3	1,3	0,8%
10	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	32,0	32,2	0,5%	1,3	1,3	0,4%
12	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,5%	32,3	32,4	0,4%	1,3	1,4	0,5%
15	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,3%	32,5	32,6	0,2%	1,4	1,4	0,3%
20	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,1%	32,8	32,8	0,1%	1,4	1,4	0,1%
30	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	33,0	33,0	0,1%	1,4	1,4	0,2%
40	0	100	100	0,0%	5,1	5,1	0,1%	33,1	33,1	0,1%	1,4	1,4	0,1%
50	0	100	100	0,0%	5,1	5,1	0,1%	33,2	33,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
60	0	100	100	0,0%	5,1	5,1	0,1%	33,2	33,3	0,0%	1,4	1,4	0,1%
70	0	100	100	0,0%	5,1	5,1	0,2%	33,3	33,3	0,1%	1,4	1,4	0,2%
		∅		0%	∅		1,1%	∅		1,0%	∅		1,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	11,6%	0,4	0,3	0,3
2	0	0,5	0,5	5,7%	0,6	0,6	0,9
3	0	0,7	0,7	3,7%	2,3	1,1	1,5
4	0	0,9	0,9	2,2%	2,9	1,6	1,9
5	0	1,1	1,1	1,2%	3,5	2,0	2,3
7	0	1,5	1,4	0,8%	5,0	2,7	3,1
10	0	2,1	2,0	0,7%	6,3	3,8	4,3
12	0	2,4	2,4	0,5%	7,2	4,6	5,1
15	0	3,0	3,0	0,2%	8,4	5,8	6,2
20	0	4,0	4,0	0,2%	11,1	7,7	8,2
30	0	6,0	6,0	0,1%	15,1	11,4	12,1
40	0	7,9	7,9	0,1%	18,4	15,2	16,0
50	0	9,9	9,9	0,1%	24,6	18,6	19,9
60	0	11,9	11,8	0,2%	29,8	22,9	23,8
70	0	13,8	13,8	0,2%	33,5	26,3	27,7
		∅		1,8%			

Abbildung A-9. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 1

Parameter Versuchsreihe 2Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	4,0	4,3	6,0%	26,5	28,1	5,9%	1,1	1,2	6,0%
2	0	100	100	0,0%	4,0	4,3	7,4%	26,5	28,4	7,3%	1,1	1,2	7,4%
3	0	100	100	0,0%	4,3	4,5	4,1%	28,5	29,6	4,0%	1,2	1,2	4,1%
4	0	100	100	0,0%	4,5	4,6	2,1%	29,7	30,3	2,1%	1,2	1,3	2,1%
5	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	1,5%	30,5	30,9	1,4%	1,3	1,3	1,5%
7	0	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,8%	31,4	31,6	0,7%	1,3	1,3	0,8%
10	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	32,0	32,2	0,5%	1,3	1,3	0,4%
12	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,0%
15	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,1%
20	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,1%
30	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,1%
40	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,1%
50	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,1%
60	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,1%
70	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,1%
		∅		0%	∅		1,5%	∅		1,5%	∅		1,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,4	62,9%	0,4	0,3	1,0
2	0	0,5	0,5	6,3%	0,6	0,6	1,1
3	0	0,7	0,7	3,8%	2,3	1,1	1,5
4	0	0,9	0,9	2,2%	2,9	1,6	1,9
5	0	1,1	1,1	1,2%	3,5	1,9	2,3
7	0	1,5	1,4	0,8%	5,0	2,8	3,1
10	0	2,1	2,0	0,6%	6,3	3,8	4,3
12	0	2,5	2,4	0,3%	7,0	4,5	4,7
15	0	3,1	3,1	0,2%	7,7	5,1	5,3
20	0	4,1	4,1	0,2%	8,8	6,1	6,3
30	0	6,1	6,1	0,2%	10,9	8,1	8,3
40	0	8,2	8,1	0,1%	13,0	10,2	10,4
50	0	10,2	10,2	0,1%	15,0	12,3	12,4
60	0	12,2	12,2	0,1%	17,1	14,3	14,5
70	0	14,3	14,2	0,1%	19,1	16,4	16,5
		∅		5,3%			

Abbildung A-10. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 2

Parameter Versuchsreihe 4Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,8	4,3	12,1%	25,0	28,1	12,2%	1,0	1,2	12,1%
2	0	100	100	0,0%	3,8	4,3	13,6%	25,0	28,5	13,7%	1,0	1,2	13,6%
3	0	100	100	0,0%	4,3	4,5	5,1%	28,2	29,6	5,1%	1,2	1,2	5,1%
4	0	100	100	0,0%	4,5	4,6	2,3%	29,6	30,3	2,3%	1,2	1,3	2,3%
5	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	1,5%	30,5	30,9	1,5%	1,3	1,3	1,5%
7	0	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,8%	31,4	31,6	0,8%	1,3	1,3	0,8%
10	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	32,0	32,2	0,4%	1,3	1,3	0,4%
12	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,0%
15	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,0%
20	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,0%
30	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,0%
40	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,0%
50	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,0%
60	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,1%
70	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,1%
		∅		0%	∅		2,4%	∅		2,4%	∅		2,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,4	56,3%	0,4	0,3	1,0
2	0	0,5	0,5	9,9%	0,7	0,7	1,1
3	0	0,7	0,7	5,2%	2,3	1,2	1,5
4	0	0,9	0,9	3,4%	2,9	1,6	1,9
5	0	1,1	1,1	2,2%	3,5	2,0	2,3
7	0	1,5	1,4	0,8%	5,0	2,8	3,1
10	0	2,1	2,0	0,6%	6,3	3,8	4,2
12	0	2,5	2,4	0,3%	7,0	4,5	4,7
15	0	3,1	3,1	0,2%	7,7	5,1	5,3
20	0	4,1	4,1	0,2%	8,8	6,1	6,3
30	0	6,1	6,1	0,2%	10,9	8,1	8,4
40	0	8,2	8,1	0,1%	13,0	10,2	10,4
50	0	10,2	10,2	0,1%	15,0	12,3	12,4
60	0	12,2	12,2	0,1%	17,1	14,3	14,5
70	0	14,3	14,2	0,1%	19,1	16,4	16,5
		∅		5,3%			

Abbildung A-12. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 4

Parameter Versuchsreihe 6Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	4,5	4,7	4,2%	31,3	32,6	4,1%	1,3	1,4	4,2%
2	0	100	100	0,0%	4,5	4,7	4,8%	31,3	32,8	4,7%	1,3	1,4	4,8%
3	0	100	100	0,0%	4,7	4,8	1,9%	32,8	33,3	1,8%	1,4	1,4	1,9%
4	0	100	100	0,0%	4,8	4,9	0,9%	33,3	33,6	0,8%	1,4	1,4	0,9%
5	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,6%	33,6	33,8	0,5%	1,4	1,4	0,6%
7	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	33,9	34,0	0,3%	1,4	1,4	0,4%
10	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
12	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
15	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
20	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
30	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
40	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
50	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
60	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
70	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
		∅		0%	∅		0,9%	∅		0,8%	∅		0,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,2	0,4	82,5%	0,3	0,3	2,8
2	0	0,4	0,5	3,7%	0,7	0,6	3,3
3	0	0,6	0,6	0,9%	10,6	1,0	4,8
4	0	0,8	0,8	0,9%	10,7	2,1	6,3
5	0	1,0	1,0	0,7%	12,2	3,0	7,8
7	0	1,4	1,4	0,5%	15,6	4,8	10,8
10	0	2,0	2,0	0,4%	25,5	7,5	14,8
12	0	2,4	2,4	0,2%	21,1	8,7	15,7
15	0	3,0	3,0	0,3%	21,7	9,4	16,4
20	0	4,1	4,0	0,2%	22,8	10,5	17,4
30	0	6,1	6,1	0,1%	24,8	12,6	19,4
40	0	8,1	8,1	0,2%	26,8	14,8	21,4
50	0	10,1	10,1	0,1%	28,8	17,0	23,4
60	0	12,2	12,1	0,2%	30,9	19,1	25,5
70	0	14,2	14,1	0,1%	32,8	21,1	27,5
				6,1%			

Abbildung A-14. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 6

Parameter Versuchsreihe 7Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	4,5	4,6	2,1%	31,0	31,6	2,0%	1,3	1,3	2,1%
2	0	100	100	0,0%	4,5	4,7	4,8%	31,0	32,5	4,7%	1,3	1,4	4,8%
3	0	100	100	0,0%	4,7	4,8	2,1%	32,7	33,3	1,9%	1,4	1,4	2,1%
4	0	100	100	0,0%	4,8	4,9	0,9%	33,3	33,6	0,9%	1,4	1,4	0,9%
5	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,8%	33,6	33,8	0,6%	1,4	1,4	0,8%
7	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	33,9	34,0	0,3%	1,4	1,4	0,4%
10	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,2%	1,4	1,4	0,1%
12	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	34,3	34,3	0,1%	1,4	1,4	0,2%
15	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	34,4	34,4	0,1%	1,4	1,4	0,2%
20	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	34,4	34,5	0,1%	1,4	1,4	0,2%
30	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,1%	34,5	34,5	0,0%	1,4	1,4	0,1%
40	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	34,6	34,6	0,0%	1,4	1,4	0,2%
50	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,1%	34,6	34,6	0,0%	1,4	1,4	0,1%
60	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,1%	34,6	34,6	0,0%	1,4	1,4	0,1%
70	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,1%	34,6	34,6	0,0%	1,4	1,4	0,1%
		∅		0%	∅		0,8%	∅		0,7%	∅		0,8%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,2	0,3	34,0%	0,4	0,3	0,4
2	0	0,5	0,5	2,1%	0,7	0,6	2,6
3	0	0,6	0,6	2,5%	10,6	1,0	4,8
4	0	0,8	0,8	0,9%	10,7	2,1	6,3
5	0	1,0	1,0	0,7%	12,2	3,0	7,8
7	0	1,4	1,4	0,5%	15,6	4,8	10,8
10	0	2,0	2,0	0,4%	25,5	7,5	15,3
12	0	2,4	2,4	0,4%	23,2	9,2	18,4
15	0	3,0	3,0	0,4%	30,6	12,2	22,9
20	0	4,0	4,0	0,1%	37,2	16,5	30,4
30	0	6,0	6,0	0,2%	49,2	25,4	45,5
40	0	8,0	8,0	0,5%	69,0	35,2	60,5
50	0	10,0	10,0	0,3%	81,0	45,2	75,5
60	0	11,9	12,0	0,4%	100,6	56,3	90,5
70	0	14,1	14,0	0,6%	126,5	64,3	105,5
		∅		2,9%			

Abbildung A-15. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 7

Parameter Versuchsreihe 8Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	4,5	4,7	5,2%	31,0	32,6	5,1%	1,3	1,4	5,2%
2	0	100	100	0,0%	4,5	4,7	5,8%	31,0	32,8	5,7%	1,3	1,4	5,8%
3	0	100	100	0,0%	4,7	4,8	2,1%	32,7	33,3	2,0%	1,4	1,4	2,1%
4	0	100	100	0,0%	4,8	4,9	0,9%	33,3	33,6	0,9%	1,4	1,4	0,9%
5	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,8%	33,6	33,8	0,6%	1,4	1,4	0,8%
7	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	33,9	34,0	0,3%	1,4	1,4	0,4%
10	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
12	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
15	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
20	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
30	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
40	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
50	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
60	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
70	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
		∅		0%	∅		1,1%	∅		1,0%	∅		1,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,2	0,4	82,3%	0,4	13,3	2,8
2	0	0,5	0,5	1,4%	0,7	13,3	3,3
3	0	0,6	0,6	2,5%	10,6	13,6	4,8
4	0	0,8	0,8	0,9%	10,7	15,9	6,3
5	0	1,0	1,0	0,7%	12,2	15,9	7,8
7	0	1,4	1,4	0,5%	15,6	15,9	10,8
10	0	2,0	2,0	0,4%	25,5	19,1	14,7
12	0	2,4	2,4	0,2%	21,1	21,6	15,7
15	0	3,0	3,0	0,3%	21,7	21,6	16,4
20	0	4,1	4,0	0,2%	22,8	21,6	17,4
30	0	6,1	6,1	0,1%	24,9	20,3	19,4
40	0	8,1	8,1	0,2%	26,8	20,3	21,4
50	0	10,1	10,1	0,1%	28,8	20,3	23,4
60	0	12,2	12,1	0,2%	30,9	20,3	25,5
70	0	14,2	14,1	0,1%	32,8	20,3	27,5
		∅		6,0%			

Abbildung A-16. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 8

Parameter Versuchsreihe 10Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,7	3,7	1,0%	24,8	24,5	1,2%	1,0	1,0	1,0%
2	0	100	100	0,0%	3,7	3,8	2,0%	24,8	25,3	1,8%	1,0	1,1	2,0%
3	0	100	100	0,0%	3,8	3,9	1,8%	25,6	26,0	1,8%	1,1	1,1	1,8%
4	0	100	100	0,0%	3,9	4,0	1,7%	26,3	26,7	1,4%	1,1	1,1	1,7%
5	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	1,4%	26,9	27,3	1,3%	1,1	1,1	1,4%
7	0	100	100	0,0%	4,2	4,2	1,3%	27,9	28,3	1,3%	1,2	1,2	1,3%
10	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,9%	29,1	29,3	0,9%	1,2	1,2	0,9%
12	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,2%	29,4	29,4	0,0%	1,2	1,2	0,2%
15	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,2%	29,4	29,4	0,2%	1,2	1,2	0,2%
20	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,3%	1,2	1,2	0,4%
30	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,5%	1,2	1,2	0,4%
40	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,4%	1,2	1,2	0,4%
50	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,4%	1,2	1,2	0,4%
60	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,4%	1,2	1,2	0,4%
70	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,4%	1,2	1,2	0,4%
		∅		0%	∅		0,9%	∅		0,8%	∅		0,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	4,5%	0,4	0,3	0,6
2	0	0,5	0,5	3,0%	0,7	0,6	1,1
3	0	0,8	0,8	1,9%	2,1	1,3	1,6
4	0	1,0	1,0	1,7%	3,0	1,7	2,1
5	0	1,2	1,2	1,8%	3,5	2,2	2,6
7	0	1,7	1,6	1,5%	4,5	3,1	3,4
10	0	2,3	2,3	1,2%	6,1	4,2	4,7
12	0	2,7	2,7	0,9%	6,8	4,9	5,2
15	0	3,4	3,4	0,9%	7,6	5,6	5,8
20	0	4,5	4,5	0,6%	9,4	6,8	7,0
30	0	6,8	6,8	0,3%	11,8	9,2	9,2
40	0	9,1	9,1	0,1%	13,9	11,5	11,5
50	0	11,4	11,3	0,2%	16,2	13,8	13,8
60	0	13,6	13,6	0,1%	18,4	16,1	16,0
70	0	15,9	15,8	0,2%	20,6	18,4	18,3
		∅		1,3%			

Abbildung A-18. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 10

Parameter Versuchsreihe 11

Bestandsstreuung: **keine** Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,4	3,7	7,6%	22,8	24,5	7,4%	0,9	1,0	7,6%
2	0	100	100	0,0%	3,4	3,8	10,7%	22,8	25,3	10,7%	1,0	1,1	10,7%
3	0	100	100	0,0%	3,6	3,9	7,7%	24,2	26,0	7,7%	1,0	1,1	7,7%
4	0	100	100	0,0%	3,8	4,0	6,0%	25,2	26,7	5,9%	1,0	1,1	6,0%
5	0	100	100	0,0%	3,9	4,1	4,8%	26,1	27,3	4,6%	1,1	1,1	4,8%
7	0	100	100	0,0%	4,1	4,2	3,3%	27,4	28,3	3,1%	1,1	1,2	3,3%
10	0	100	100	0,0%	4,3	4,4	2,0%	28,9	29,4	1,8%	1,2	1,2	2,0%
12	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	1,4%	29,6	30,0	1,3%	1,2	1,2	1,4%
15	0	100	100	0,0%	4,6	4,6	1,1%	30,3	30,6	1,0%	1,3	1,3	1,0%
20	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,6%	31,2	31,4	0,5%	1,3	1,3	0,6%
30	0	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,4%	32,1	32,2	0,3%	1,3	1,3	0,4%
40	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,6	32,6	0,1%	1,4	1,4	0,1%
50	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	32,8	32,9	0,1%	1,4	1,4	0,1%
60	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	33,0	33,0	0,1%	1,4	1,4	0,2%
70	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,0%	33,2	33,2	0,0%	1,4	1,4	0,0%
		∅		0%	∅		3,1%	∅		3,0%	∅		3,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	2,7%	0,4	0,4	0,6
2	0	0,6	0,5	9,7%	0,8	0,7	1,1
3	0	0,8	0,8	7,8%	2,1	1,3	1,6
4	0	1,1	1,0	6,3%	3,1	1,8	2,1
5	0	1,3	1,2	4,9%	3,7	2,3	2,6
7	0	1,7	1,6	3,2%	4,5	3,1	3,4
10	0	2,3	2,3	2,0%	6,1	4,2	4,7
12	0	2,7	2,7	1,3%	7,3	5,0	5,5
15	0	3,3	3,3	0,9%	8,7	6,2	6,7
20	0	4,3	4,2	0,6%	10,5	7,9	8,7
30	0	6,2	6,2	0,3%	14,4	11,6	12,6
40	0	8,2	8,2	0,1%	20,7	15,6	16,5
50	0	10,2	10,1	0,2%	23,8	19,2	20,5
60	0	12,1	12,1	0,1%	27,4	23,0	24,4
70	0	14,1	14,1	0,2%	31,9	26,9	28,3
		∅		2,7%			

Abbildung A-29. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 11

Parameter Versuchsreihe 12Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,4	3,7	7,7%	22,8	24,5	7,4%	0,9	1,0	7,7%
2	0	100	100	0,0%	3,4	3,8	10,7%	22,8	25,3	10,7%	1,0	1,1	10,7%
3	0	100	100	0,0%	3,6	3,9	7,7%	24,2	26,0	7,7%	1,0	1,1	7,7%
4	0	100	100	0,0%	3,8	4,0	6,0%	25,2	26,7	5,9%	1,0	1,1	6,0%
5	0	100	100	0,0%	3,9	4,1	4,8%	26,1	27,3	4,6%	1,1	1,1	4,8%
7	0	100	100	0,0%	4,1	4,2	3,3%	27,4	28,3	3,2%	1,1	1,2	3,3%
10	0	100	100	0,0%	4,3	4,4	1,7%	28,9	29,3	1,5%	1,2	1,2	1,7%
12	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,4%	1,2	1,2	0,4%
15	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,6%	29,3	29,4	0,5%	1,2	1,2	0,6%
20	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,6%	29,3	29,4	0,5%	1,2	1,2	0,6%
30	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,6%	29,3	29,4	0,5%	1,2	1,2	0,6%
40	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,6%	29,3	29,4	0,5%	1,2	1,2	0,6%
50	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,6%	29,3	29,4	0,5%	1,2	1,2	0,6%
60	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,4%	1,2	1,2	0,4%
70	0	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,4%	29,3	29,4	0,4%	1,2	1,2	0,4%
		∅		0%	∅		3,1%	∅		3,0%	∅		3,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	1,7%	0,4	0,4	0,6
2	0	0,6	0,5	9,4%	0,8	0,7	1,1
3	0	0,8	0,8	7,7%	2,1	1,3	1,6
4	0	1,1	1,0	6,3%	3,1	1,8	2,1
5	0	1,3	1,2	4,9%	3,7	2,3	2,6
7	0	1,7	1,6	3,2%	4,5	3,1	3,4
10	0	2,3	2,3	1,7%	6,1	4,2	4,7
12	0	2,7	2,7	0,5%	6,8	4,9	5,2
15	0	3,4	3,4	0,4%	7,7	5,6	5,8
20	0	4,5	4,5	0,3%	9,4	6,9	7,0
30	0	6,8	6,8	0,4%	11,8	9,2	9,2
40	0	9,1	9,1	0,4%	13,9	11,5	11,5
50	0	11,4	11,3	0,4%	16,2	13,8	13,8
60	0	13,6	13,6	0,4%	18,4	16,1	16,0
70	0	15,9	15,8	0,4%	20,6	18,4	18,3
				2,5%			

Abbildung A-20. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 12

Parameter Versuchsreihe 14Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	4,0	4,0	1,3%	26,4	26,0	1,4%	1,1	1,1	1,3%
2	0	100	100	0,0%	4,0	4,2	3,6%	26,4	27,3	3,5%	1,1	1,1	3,6%
3	0	100	100	0,0%	4,2	4,4	2,9%	27,9	28,6	2,8%	1,2	1,2	2,9%
4	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	1,9%	28,8	29,3	1,7%	1,2	1,2	1,9%
5	0	100	100	0,0%	4,5	4,5	1,5%	29,4	29,8	1,4%	1,2	1,2	1,5%
7	0	100	100	0,0%	4,6	4,6	1,1%	30,1	30,4	0,9%	1,3	1,3	1,1%
10	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,7%	30,8	30,9	0,6%	1,3	1,3	0,7%
12	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,1%	30,9	31,0	0,1%	1,3	1,3	0,1%
15	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,4%	30,9	31,0	0,1%	1,3	1,3	0,4%
20	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,4%	30,9	31,0	0,2%	1,3	1,3	0,4%
30	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,4%	30,9	31,0	0,3%	1,3	1,3	0,4%
40	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,4%	30,9	31,0	0,3%	1,3	1,3	0,4%
50	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,6%	30,8	31,0	0,4%	1,3	1,3	0,6%
60	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,6%	30,8	31,0	0,5%	1,3	1,3	0,6%
70	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,6%	30,8	31,0	0,5%	1,3	1,3	0,6%
		∅		0%	∅		1,1%	∅		1,0%	∅		1,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	12,2%	0,4	0,3	0,7
2	0	0,5	0,5	3,3%	0,7	0,6	1,4
3	0	0,7	0,7	3,4%	2,9	1,2	2,0
4	0	0,9	0,9	1,9%	4,0	1,7	2,6
5	0	1,1	1,1	1,8%	4,5	2,1	3,2
7	0	1,5	1,5	1,3%	5,8	3,1	4,4
10	0	2,1	2,1	0,4%	7,3	4,3	6,1
12	0	2,6	2,5	0,2%	8,4	4,9	6,6
15	0	3,2	3,2	0,3%	9,6	5,6	7,3
20	0	4,3	4,2	0,2%	10,7	6,6	8,3
30	0	6,4	6,4	0,3%	13,1	9,0	10,4
40	0	8,5	8,5	0,3%	15,7	11,4	12,6
50	0	10,7	10,6	0,5%	18,0	13,7	14,7
60	0	12,8	12,7	0,5%	19,9	15,9	16,8
70	0	14,9	14,8	0,5%	21,6	18,2	18,9
		∅		1,8%			

Abbildung A-22. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 14

Parameter Versuchsreihe 15
 Bestandsstreuung: **keine** Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,6	4,0	11,5%	23,4	26,1	11,3%	1,0	1,1	11,5%
2	0	100	100	0,0%	3,6	4,2	16,9%	23,4	27,4	16,9%	1,0	1,1	16,9%
3	0	100	100	0,0%	3,9	4,4	11,8%	25,7	28,7	11,8%	1,1	1,2	11,8%
4	0	100	100	0,0%	4,1	4,5	8,3%	27,1	29,3	8,2%	1,1	1,2	8,3%
5	0	100	100	0,0%	4,3	4,5	6,8%	27,9	29,8	6,7%	1,2	1,2	6,8%
7	0	100	100	0,0%	4,4	4,6	5,0%	29,0	30,4	4,8%	1,2	1,3	5,0%
10	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	3,4%	30,0	30,9	3,2%	1,2	1,3	3,4%
12	0	100	100	0,0%	4,6	4,8	2,5%	30,5	31,2	2,4%	1,3	1,3	2,5%
15	0	100	100	0,0%	4,7	4,8	1,9%	30,9	31,5	1,8%	1,3	1,3	1,9%
20	0	100	100	0,0%	4,8	4,9	1,1%	31,5	31,8	1,0%	1,3	1,3	1,1%
30	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,7%	32,1	32,2	0,5%	1,3	1,3	0,7%
40	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	32,4	32,5	0,3%	1,3	1,4	0,4%
50	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,3%	32,6	32,6	0,2%	1,4	1,4	0,3%
60	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	32,7	32,7	0,1%	1,4	1,4	0,2%
70	0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	32,8	32,8	0,1%	1,4	1,4	0,2%
		∅			0%			∅			4,7%		

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	1,9%	0,4	0,4	0,7
2	0	0,6	0,5	13,3%	0,8	0,7	1,4
3	0	0,8	0,7	10,9%	3,2	1,3	2,0
4	0	1,0	0,9	8,0%	4,1	1,8	2,6
5	0	1,2	1,1	6,0%	4,7	2,2	3,2
7	0	1,6	1,5	4,4%	5,9	3,2	4,4
10	0	2,2	2,1	2,7%	7,5	4,5	6,2
12	0	2,6	2,5	2,2%	9,5	5,3	7,4
15	0	3,2	3,1	1,7%	11,1	6,5	9,1
20	0	4,2	4,1	1,1%	14,4	8,7	12,0
30	0	6,1	6,1	0,5%	19,7	13,1	17,8
40	0	8,1	8,1	0,5%	26,5	17,5	23,6
50	0	10,1	10,1	0,3%	33,0	22,1	29,4
60	0	12,1	12,0	0,3%	38,3	26,5	35,1
70	0	14,0	14,0	0,2%	44,9	30,9	40,9
		∅			3,6%		

Abbildung A-23. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 15

Parameter Versuchsreihe 16Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,6	4,0	11,5%	23,4	26,1	11,3%	1,0	1,1	11,5%
2	0	100	100	0,0%	3,6	4,2	16,9%	23,4	27,4	16,9%	1,0	1,1	16,9%
3	0	100	100	0,0%	3,9	4,4	11,8%	25,7	28,7	11,8%	1,1	1,2	11,8%
4	0	100	100	0,0%	4,1	4,5	8,3%	27,1	29,3	8,2%	1,1	1,2	8,3%
5	0	100	100	0,0%	4,3	4,5	6,8%	27,9	29,8	6,7%	1,2	1,2	6,8%
7	0	100	100	0,0%	4,4	4,6	5,0%	29,0	30,4	4,8%	1,2	1,3	5,0%
10	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	3,3%	30,0	30,9	3,1%	1,2	1,3	3,3%
12	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,5%	30,2	31,0	2,4%	1,3	1,3	2,5%
15	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,5%	30,2	31,0	2,4%	1,3	1,3	2,5%
20	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,5%	30,3	31,0	2,3%	1,3	1,3	2,5%
30	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,3%	30,3	31,0	2,3%	1,3	1,3	2,3%
40	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,3%	30,3	31,0	2,2%	1,3	1,3	2,3%
50	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,3%	30,3	31,0	2,2%	1,3	1,3	2,3%
60	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,3%	30,3	31,0	2,2%	1,3	1,3	2,3%
70	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,3%	30,3	31,0	2,1%	1,3	1,3	2,3%
		∅		0%	∅		5,5%	∅		5,4%	∅		5,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	1,9%	0,4	0,4	0,7
2	0	0,6	0,5	13,3%	0,8	0,7	1,4
3	0	0,8	0,7	10,9%	3,2	1,3	2,0
4	0	1,0	0,9	8,0%	4,1	1,8	2,6
5	0	1,2	1,1	6,0%	4,7	2,2	3,2
7	0	1,6	1,5	4,4%	5,9	3,2	4,4
10	0	2,2	2,1	2,6%	7,5	4,5	6,1
12	0	2,6	2,5	2,1%	8,4	5,0	6,6
15	0	3,3	3,2	2,1%	9,7	5,7	7,3
20	0	4,3	4,2	2,3%	10,8	6,8	8,3
30	0	6,5	6,4	2,1%	13,3	9,1	10,4
40	0	8,7	8,5	2,1%	15,9	11,6	12,6
50	0	10,8	10,6	2,0%	18,1	13,9	14,7
60	0	13,0	12,7	2,1%	20,3	16,1	16,8
70	0	15,1	14,8	2,0%	21,9	18,5	18,9
		∅		4,3%			

Abbildung A-24. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 16

Parameter Versuchsreihe 18Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,7	3,6	0,7%	24,4	24,2	0,7%	1,0	1,0	0,7%
2	0	100	100	0,0%	3,7	3,7	0,8%	24,4	24,6	0,9%	1,0	1,0	0,8%
3	0	100	100	0,0%	3,7	3,8	0,8%	24,8	25,0	0,9%	1,0	1,0	0,8%
4	0	100	100	0,0%	3,8	3,8	0,9%	25,1	25,4	0,9%	1,0	1,1	0,9%
5	0	100	100	0,0%	3,8	3,9	0,9%	25,5	25,7	0,8%	1,1	1,1	0,9%
7	0	100	100	0,0%	3,9	4,0	0,8%	26,1	26,4	0,9%	1,1	1,1	0,8%
10	0	100	100	0,0%	4,1	4,1	0,8%	26,9	27,2	0,8%	1,1	1,1	0,8%
12	0	100	100	0,0%	4,1	4,1	0,3%	27,2	27,2	0,2%	1,1	1,1	0,3%
15	0	100	100	0,0%	4,1	4,1	0,3%	27,1	27,2	0,3%	1,1	1,1	0,3%
20	0	100	100	0,0%	4,1	4,1	0,5%	27,1	27,2	0,4%	1,1	1,1	0,5%
30	0	100	100	0,0%	4,1	4,1	1,0%	27,0	27,2	0,9%	1,1	1,1	1,0%
40	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,1%	1,1	1,1	1,3%
50	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,1%	1,1	1,1	1,3%
60	0	100	100	0,0%	4,1	4,1	1,0%	27,0	27,2	0,9%	1,1	1,1	1,0%
70	0	100	100	0,0%	4,1	4,1	1,0%	27,0	27,2	1,0%	1,1	1,1	1,1%
		∅		0%	∅		0,8%	∅		0,8%	∅		0,8%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	5,0%	0,4	0,3	0,6
2	0	0,6	0,5	1,7%	0,7	0,6	1,1
3	0	0,8	0,8	1,6%	2,1	1,3	1,6
4	0	1,1	1,0	1,4%	3,1	1,8	2,2
5	0	1,3	1,3	0,7%	3,7	2,3	2,7
7	0	1,8	1,8	0,9%	4,8	3,3	3,6
10	0	2,5	2,4	0,9%	6,7	4,5	5,0
12	0	2,9	2,9	0,1%	7,8	5,3	5,5
15	0	3,7	3,7	0,1%	8,3	6,2	6,2
20	0	4,9	4,9	0,2%	10,1	7,9	7,5
30	0	7,4	7,3	0,5%	12,8	11,0	9,9
40	0	9,9	9,8	0,8%	16,4	13,8	12,3
50	0	12,3	12,2	0,7%	18,7	16,8	14,8
60	0	14,8	14,7	0,7%	21,3	19,5	17,2
70	0	17,2	17,1	0,7%	24,2	22,2	19,7
		∅		1,1%			

Abbildung A-26. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 18

Parameter Versuchsreihe 19
 Bestandsstreuung: **keine** Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,4	3,6	8,7%	22,3	24,2	8,7%	0,9	1,0	8,7%
2	0	100	100	0,0%	3,4	3,7	10,5%	22,3	24,6	10,4%	0,9	1,0	10,5%
3	0	100	100	0,0%	3,5	3,8	8,6%	23,0	25,0	8,8%	1,0	1,0	8,7%
4	0	100	100	0,0%	3,5	3,8	7,7%	23,6	25,4	7,6%	1,0	1,1	7,7%
5	0	100	100	0,0%	3,6	3,9	6,5%	24,2	25,7	6,5%	1,0	1,1	6,5%
7	0	100	100	0,0%	3,8	4,0	5,1%	25,1	26,4	5,2%	1,0	1,1	5,1%
10	0	100	100	0,0%	3,9	4,1	3,8%	26,2	27,2	3,9%	1,1	1,1	3,8%
12	0	100	100	0,0%	4,0	4,2	3,1%	26,9	27,7	3,2%	1,1	1,2	3,1%
15	0	100	100	0,0%	4,2	4,3	2,2%	27,7	28,4	2,3%	1,2	1,2	2,2%
20	0	100	100	0,0%	4,3	4,4	1,5%	28,8	29,2	1,5%	1,2	1,2	1,5%
30	0	100	100	0,0%	4,5	4,6	0,9%	30,2	30,5	0,9%	1,3	1,3	0,8%
40	0	100	100	0,0%	4,7	4,7	0,7%	31,0	31,2	0,6%	1,3	1,3	0,7%
50	0	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,4%	31,6	31,7	0,4%	1,3	1,3	0,4%
60	0	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,2%	32,0	32,1	0,2%	1,3	1,3	0,2%
70	0	100	100	0,0%	4,8	4,9	0,4%	32,3	32,3	0,2%	1,3	1,3	0,4%
		∅		0%	∅		4,0%	∅		4,0%	∅		4,0%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	5,0%	0,4	0,4	0,3
2	0	0,6	0,5	9,8%	0,8	0,7	1,0
3	0	0,9	0,8	8,3%	2,3	1,4	1,6
4	0	1,1	1,0	7,5%	3,1	1,9	2,2
5	0	1,4	1,3	6,4%	3,9	2,5	2,7
7	0	1,9	1,8	5,2%	5,0	3,4	3,6
10	0	2,5	2,4	3,4%	6,8	4,7	5,0
12	0	3,0	2,9	2,7%	7,6	5,5	5,9
15	0	3,6	3,5	2,1%	9,0	6,6	7,2
20	0	4,6	4,5	1,4%	11,0	8,6	9,3
30	0	6,6	6,6	0,6%	15,1	12,3	13,3
40	0	8,6	8,5	0,3%	20,4	16,2	17,3
50	0	10,5	10,5	0,3%	24,6	20,1	21,2
60	0	12,5	12,4	0,2%	29,2	23,9	25,1
70	0	14,5	14,4	0,3%	31,5	27,3	29,0
		∅		3,6%			

Abbildung A-27. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 19

Parameter Versuchsreihe 20Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,4	3,6	8,7%	22,3	24,2	8,7%	0,9	1,0	8,7%
2	0	100	100	0,0%	3,4	3,7	10,5%	22,3	24,6	10,4%	0,9	1,0	10,5%
3	0	100	100	0,0%	3,5	3,8	8,6%	23,0	25,0	8,8%	1,0	1,0	8,7%
4	0	100	100	0,0%	3,5	3,8	7,7%	23,6	25,4	7,6%	1,0	1,1	7,7%
5	0	100	100	0,0%	3,6	3,9	6,5%	24,2	25,7	6,5%	1,0	1,1	6,5%
7	0	100	100	0,0%	3,8	4,0	5,1%	25,1	26,4	5,2%	1,0	1,1	5,1%
10	0	100	100	0,0%	3,9	4,1	3,6%	26,2	27,2	3,7%	1,1	1,1	3,6%
12	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	2,5%	26,6	27,2	2,5%	1,1	1,1	2,5%
15	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	2,3%	26,6	27,2	2,3%	1,1	1,1	2,3%
20	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	2,0%	26,7	27,2	1,9%	1,1	1,1	2,0%
30	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	1,8%	26,7	27,2	1,8%	1,1	1,1	1,8%
40	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	1,8%	26,8	27,2	1,7%	1,1	1,1	1,8%
50	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	1,5%	26,8	27,2	1,5%	1,1	1,1	1,5%
60	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,2%	1,1	1,1	1,3%
70	0	100	100	0,0%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,2%	1,1	1,1	1,3%
		∅		0%	∅		4,4%	∅		4,3%	∅		4,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	5,0%	0,4	0,4	0,6
2	0	0,6	0,5	9,8%	0,8	0,7	1,1
3	0	0,9	0,8	8,3%	2,3	1,4	1,6
4	0	1,1	1,0	7,5%	3,1	1,9	2,2
5	0	1,4	1,3	6,4%	3,9	2,4	2,7
7	0	1,9	1,8	5,2%	5,0	3,4	3,6
10	0	2,5	2,4	3,2%	6,8	4,7	5,0
12	0	3,0	2,9	2,2%	7,8	5,4	5,5
15	0	3,7	3,7	2,0%	8,4	6,3	6,2
20	0	5,0	4,9	1,5%	10,1	8,0	7,5
30	0	7,4	7,3	1,3%	12,9	11,0	9,9
40	0	9,9	9,8	1,4%	16,4	13,9	12,3
50	0	12,4	12,2	1,1%	18,8	16,8	14,8
60	0	14,8	14,7	0,9%	21,3	19,5	17,2
70	0	17,3	17,1	0,9%	24,4	22,2	19,7
		∅		3,8%			

Abbildung A-28. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 20

Parameter Versuchsreihe 23
 Bestandsstreuung: **keine** Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,6	3,7	3,5%	24,6	25,4	3,5%	1,0	1,1	3,5%
2	0	100	100	0,0%	3,6	3,9	8,6%	24,6	26,7	8,6%	1,0	1,1	8,6%
3	0	100	100	0,0%	3,8	4,1	8,3%	25,8	27,9	8,2%	1,1	1,2	8,3%
4	0	100	100	0,0%	3,9	4,2	6,8%	26,8	28,6	6,8%	1,1	1,2	6,8%
5	0	100	100	0,0%	4,0	4,3	6,2%	27,6	29,2	6,1%	1,1	1,2	6,3%
7	0	100	100	0,0%	4,2	4,4	5,0%	28,6	30,0	5,0%	1,2	1,3	5,0%
10	0	100	100	0,0%	4,3	4,5	4,0%	29,6	30,8	4,0%	1,2	1,3	4,0%
12	0	100	100	0,0%	4,4	4,6	3,8%	30,1	31,2	3,6%	1,3	1,3	3,8%
15	0	100	100	0,0%	4,5	4,6	2,8%	30,7	31,6	2,8%	1,3	1,3	2,8%
20	0	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,3%	31,4	32,1	2,2%	1,3	1,3	2,3%
30	0	100	100	0,0%	4,7	4,8	1,3%	32,2	32,6	1,3%	1,3	1,4	1,3%
40	0	100	100	0,0%	4,8	4,8	1,1%	32,7	33,0	1,0%	1,4	1,4	1,1%
50	0	100	100	0,0%	4,8	4,9	0,8%	33,0	33,2	0,7%	1,4	1,4	0,7%
60	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,5%	33,3	33,4	0,5%	1,4	1,4	0,5%
70	0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,5%	33,4	33,6	0,5%	1,4	1,4	0,5%
		∅		0%	∅		3,7%	∅		3,6%	∅		3,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	5,8%	0,4	0,4	0,3
2	0	0,6	0,5	8,0%	18,3	0,7	1,1
3	0	0,8	0,7	8,2%	74,2	1,3	1,9
4	0	1,0	1,0	6,6%	78,8	1,8	2,5
5	0	1,3	1,2	7,2%	89,5	2,3	3,0
7	0	1,7	1,6	4,6%	57,5	3,2	4,1
10	0	2,3	2,2	3,9%	90,7	4,6	5,7
12	0	2,7	2,6	2,5%	90,4	5,5	6,8
15	0	3,3	3,2	1,8%	43,2	6,7	8,4
20	0	4,3	4,3	1,2%	60,8	8,9	11,0
30	0	6,3	6,3	0,7%	64,5	13,3	16,2
40	0	8,4	8,3	0,7%	92,5	17,4	21,4
50	0	10,4	10,3	0,5%	107,0	21,7	26,6
60	0	12,3	12,3	0,4%	121,4	26,5	31,7
70	0	14,3	14,3	0,4%	120,2	30,3	36,8
		∅		3,5%			

Abbildung A-31. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 23

Parameter Versuchsreihe 24Bestandsstreuung: **keine**Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
1	0	100	100	0,0%	3,6	3,7	3,5%	24,6	25,4	3,5%	1,0	1,1	3,5%
2	0	100	100	0,0%	3,6	3,9	8,6%	24,6	26,7	8,6%	1,0	1,1	8,6%
3	0	100	100	0,0%	3,8	4,1	8,3%	25,8	27,9	8,2%	1,1	1,2	8,3%
4	0	100	100	0,0%	3,9	4,2	6,8%	26,8	28,6	6,8%	1,1	1,2	6,8%
5	0	100	100	0,0%	4,0	4,3	6,2%	27,6	29,2	6,1%	1,1	1,2	6,3%
7	0	100	100	0,0%	4,2	4,4	5,0%	28,6	30,0	4,9%	1,2	1,3	5,0%
10	0	100	100	0,0%	4,3	4,5	3,7%	29,6	30,7	3,7%	1,2	1,3	3,7%
12	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	3,6%	29,8	30,8	3,4%	1,2	1,3	3,6%
15	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	3,1%	30,0	30,8	2,9%	1,2	1,3	3,1%
20	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	3,1%	29,9	30,8	3,0%	1,2	1,3	3,1%
30	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	3,1%	29,9	30,8	3,0%	1,2	1,3	3,1%
40	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	3,1%	29,9	30,8	3,0%	1,2	1,3	3,1%
50	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	3,1%	29,9	30,8	3,0%	1,2	1,3	3,1%
60	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	3,3%	29,9	30,8	3,2%	1,2	1,3	3,3%
70	0	100	100	0,0%	4,4	4,5	3,3%	29,9	30,8	3,2%	1,2	1,3	3,4%
		∅		0%	∅		4,5%	∅		4,4%	∅		4,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
1	0	0,3	0,3	5,8%	0,4	0,4	0,7
2	0	0,6	0,5	8,0%	18,3	0,7	1,3
3	0	0,8	0,7	8,2%	74,2	1,3	1,9
4	0	1,0	1,0	6,6%	78,8	1,8	2,5
5	0	1,3	1,2	7,2%	89,5	2,3	3,0
7	0	1,7	1,6	4,6%	57,5	3,2	4,1
10	0	2,3	2,2	3,6%	90,7	4,6	5,6
12	0	2,7	2,7	2,1%	92,5	5,3	6,2
15	0	3,4	3,3	1,8%	45,0	6,0	6,8
20	0	4,5	4,4	2,2%	106,9	7,4	7,9
30	0	6,8	6,7	2,3%	111,6	10,0	10,2
40	0	9,1	8,9	2,3%	119,9	12,7	12,4
50	0	11,4	11,1	2,3%	138,7	15,7	14,6
60	0	13,6	13,3	2,3%	151,5	18,5	16,8
70	0	15,8	15,5	1,8%	55,4	21,2	19,0
		∅		4,1%			

Abbildung A-32. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 24

Parameter Versuchsreihe 25

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=3$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	3,5%	0,4	0,4	3,0%	2,6	2,7	2,3%	1,1	1,1	0,5%
0,3	1,5	30	31	3,4%	1,2	1,2	2,1%	7,9	8,1	2,1%	1,1	1,1	1,2%
0,5	1,0	50	51	2,6%	2,0	2,1	1,5%	13,3	13,4	1,4%	1,1	1,1	1,1%
0,8	0,5	80	79	1,6%	3,2	3,2	2,7%	21,2	20,7	2,8%	1,1	1,1	1,1%
0,9	0,4	85	84	1,4%	3,5	3,4	2,6%	22,6	22,0	2,6%	1,1	1,1	1,3%
1,0	0,4	90	90	0,4%	3,7	3,6	1,6%	23,9	23,5	1,7%	1,1	1,1	1,2%
1,2	0,5	95	96	1,5%	3,9	3,9	1,9%	25,2	25,7	1,9%	1,1	1,1	0,4%
1,6	0,6	97	99	1,9%	4,0	4,2	4,7%	26,2	27,4	4,6%	1,1	1,2	2,7%
1,8	0,7	98	99	1,6%	4,1	4,3	4,7%	26,6	27,9	4,7%	1,1	1,2	3,1%
2,4	0,7	99	100	0,7%	4,2	4,4	4,8%	27,5	28,8	4,8%	1,2	1,2	4,1%
6,7	0,2	100	100	0,1%	4,8	4,8	0,8%	31,3	31,6	0,8%	1,3	1,3	0,8%
8,4	0,1	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,5%	31,8	31,9	0,5%	1,3	1,3	0,5%
23,4	0,1	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,3%	32,9	32,9	0,1%	1,4	1,4	0,2%
52,6	0,1	100	100	0,1%	5,1	5,1	0,2%	33,2	33,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
100,2	0,1	100	100	0,1%	5,1	5,1	0,1%	33,3	33,3	0,0%	1,4	1,4	0,1%
		∅		1,3%	∅		2,1%	∅		2,0%	∅		1,2%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,1%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	9,1%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,2	1,4%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	2,0%	0,4	0,3	0,8
0,9	0,4	0,3	0,3	8,9%	0,4	0,3	0,8
1,0	0,4	0,3	0,3	1,6%	1,4	0,4	0,8
1,2	0,5	0,3	0,3	2,9%	2,3	0,5	0,8
1,6	0,6	0,4	0,4	6,8%	3,7	0,8	1,0
1,8	0,7	0,5	0,4	5,4%	4,2	1,0	1,0
2,4	0,7	0,6	0,5	6,3%	5,1	1,4	1,3
6,7	0,2	1,4	1,4	2,3%	5,1	2,9	3,0
8,4	0,1	1,7	1,7	0,9%	6,2	3,4	3,6
23,4	0,1	4,7	4,7	0,8%	14,8	9,2	9,4
52,6	0,1	10,5	10,4	0,7%	26,3	20,2	20,7
100,2	0,1	19,7	19,7	0,1%	45,3	38,0	39,2
		∅		3,9%			

Abbildung A-33. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 25

Parameter Versuchsreihe 26Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=3$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	3,6%	0,4	0,4	3,0%	2,6	2,7	2,3%	1,1	1,1	0,6%
0,3	1,5	30	31	3,4%	1,2	1,2	2,1%	7,9	8,1	2,1%	1,1	1,1	1,3%
0,5	1,0	50	51	2,7%	2,0	2,0	1,5%	13,3	13,4	1,4%	1,1	1,1	1,1%
0,8	0,5	80	79	1,6%	3,2	3,2	2,7%	21,3	20,7	2,8%	1,1	1,1	1,2%
0,9	0,4	85	84	1,4%	3,5	3,4	2,7%	22,6	22,0	2,6%	1,1	1,1	1,3%
1,0	0,4	90	90	0,4%	3,7	3,6	1,7%	23,9	23,5	1,7%	1,1	1,1	1,2%
1,2	0,6	95	96	1,6%	3,9	3,9	2,2%	25,2	25,8	2,2%	1,1	1,1	0,5%
1,6	0,7	97	99	1,9%	4,0	4,2	4,7%	26,1	27,3	4,6%	1,1	1,2	2,7%
1,9	0,7	98	100	1,8%	4,1	4,3	5,1%	26,6	28,0	5,1%	1,1	1,2	3,3%
2,3	0,8	99	100	0,8%	4,2	4,4	5,5%	27,3	28,8	5,4%	1,1	1,2	4,7%
7,1	0,2	100	100	0,0%	4,8	4,8	1,8%	31,1	31,7	1,8%	1,3	1,3	1,7%
8,4	0,2	100	100	0,0%	4,8	4,9	1,4%	31,5	32,0	1,4%	1,3	1,3	1,4%
24,2	0,2	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,0%
50,9	0,4	100	100	0,2%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,3%
99,4	0,2	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,1%
		∅		1,3%	∅		2,3%	∅		2,2%	∅		1,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,2%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	9,2%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,2	1,4%	0,4	0,3	0,2
0,8	0,5	0,3	0,3	2,1%	0,4	0,3	0,3
0,9	0,4	0,3	0,3	8,9%	0,4	0,3	0,8
1,0	0,4	0,3	0,3	1,7%	1,3	0,4	0,8
1,2	0,6	0,3	0,3	2,3%	3,9	0,5	0,8
1,6	0,7	0,4	0,4	6,4%	4,2	0,8	1,0
1,9	0,7	0,5	0,4	5,3%	5,1	1,0	1,1
2,3	0,8	0,6	0,5	8,4%	6,0	1,5	1,3
7,1	0,2	1,5	1,5	3,6%	6,2	3,2	3,2
8,4	0,2	1,8	1,7	2,0%	8,6	3,7	3,7
24,2	0,2	5,0	4,9	0,6%	10,7	7,3	7,2
50,9	0,4	10,2	10,4	1,4%	21,3	16,9	12,6
99,4	0,2	20,3	20,2	0,2%	30,8	27,0	22,5
			∅	4,2%			

Abbildung A-34. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 26

Parameter Versuchsreihe 27

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=5$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	2,3%	0,4	0,4	7,3%	2,6	2,7	7,1%	1,0	1,1	4,8%
0,3	1,5	30	31	4,8%	1,1	1,3	9,9%	7,5	8,2	9,7%	1,0	1,1	4,9%
0,5	1,0	50	52	3,9%	1,9	2,1	8,6%	12,5	13,6	8,8%	1,0	1,1	4,5%
0,8	0,5	80	80	1,0%	3,1	3,2	3,5%	20,1	20,8	3,6%	1,0	1,1	4,6%
0,9	0,5	85	85	0,1%	3,3	3,4	4,5%	21,4	22,3	4,5%	1,0	1,1	4,7%
1,0	0,5	90	90	0,5%	3,5	3,6	4,5%	22,6	23,6	4,4%	1,0	1,1	5,0%
1,3	0,5	95	95	0,5%	3,7	3,9	7,4%	23,9	25,7	7,4%	1,1	1,1	6,8%
1,7	0,6	97	98	0,7%	3,8	4,2	8,8%	25,1	27,2	8,7%	1,1	1,2	8,0%
2,2	0,6	98	99	1,5%	4,0	4,3	8,4%	26,2	28,4	8,2%	1,1	1,2	6,8%
2,5	0,6	99	100	0,4%	4,1	4,4	8,1%	26,8	28,9	8,1%	1,1	1,2	7,7%
6,9	0,2	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,9%	31,4	31,6	0,8%	1,3	1,3	0,9%
8,8	0,1	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,5%	31,9	32,0	0,5%	1,3	1,3	0,5%
23,5	0,1	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,2%	32,9	32,9	0,1%	1,4	1,4	0,2%
52,6	0,1	100	100	0,1%	5,1	5,1	0,2%	33,2	33,2	0,0%	1,4	1,4	0,1%
100,2	0,1	100	100	0,1%	5,1	5,1	0,1%	33,3	33,3	0,0%	1,4	1,4	0,1%
		∅		1,1%	∅		4,9%	∅		4,8%	∅		4,0%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	4,9%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	4,8%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,2	6,5%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	4,2%	0,5	0,4	0,8
0,9	0,5	0,3	0,3	2,2%	0,8	0,4	0,8
1,0	0,5	0,3	0,3	3,9%	1,3	0,5	0,8
1,3	0,5	0,4	0,3	6,6%	2,5	0,6	0,9
1,7	0,6	0,5	0,4	9,2%	3,7	0,8	1,0
2,2	0,6	0,6	0,5	9,7%	4,3	1,2	1,2
2,5	0,6	0,6	0,6	8,2%	4,8	1,4	1,3
6,9	0,2	1,5	1,4	2,3%	5,5	3,0	3,1
8,8	0,1	1,8	1,8	1,3%	6,4	3,6	3,8
23,5	0,1	4,7	4,7	0,7%	14,7	9,1	9,5
52,6	0,1	10,5	10,4	0,8%	26,3	20,1	20,9
100,2	0,1	19,7	19,7	0,1%	45,3	38,0	39,6
				∅			4,4%

Abbildung A-35. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 27

Parameter Versuchsreihe 28Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=5$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	2,3%	0,4	0,4	7,3%	2,6	2,7	7,1%	1,0	1,1	4,8%
0,3	1,5	30	31	4,8%	1,1	1,3	9,9%	7,5	8,2	9,7%	1,0	1,1	4,9%
0,5	1,0	50	52	3,9%	1,9	2,1	8,6%	12,5	13,6	8,8%	1,0	1,1	4,5%
0,8	0,5	80	80	1,0%	3,1	3,2	3,5%	20,1	20,8	3,6%	1,0	1,1	4,6%
0,9	0,5	85	85	0,1%	3,3	3,4	4,5%	21,4	22,3	4,5%	1,0	1,1	4,7%
1,1	0,5	90	90	0,1%	3,5	3,6	5,0%	22,6	23,7	4,9%	1,0	1,1	5,0%
1,4	0,7	95	96	1,4%	3,7	4,0	9,1%	24,0	26,1	9,0%	1,1	1,1	7,5%
1,8	0,7	97	98	1,0%	3,8	4,2	10,3%	25,0	27,5	10,2%	1,1	1,2	9,2%
2,5	0,7	98	100	1,9%	4,0	4,4	10,8%	26,2	29,0	10,8%	1,1	1,2	8,7%
2,9	0,7	99	100	0,7%	4,1	4,5	10,0%	26,7	29,4	10,1%	1,1	1,2	9,3%
7,9	0,2	100	100	0,0%	4,7	4,9	3,4%	30,8	31,9	3,4%	1,3	1,3	3,4%
10,5	0,1	100	100	0,0%	4,8	4,9	2,6%	31,4	32,2	2,4%	1,3	1,3	2,5%
24,2	0,2	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,3%	32,2	32,2	0,1%	1,3	1,3	0,2%
50,9	0,4	100	100	0,2%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,3%
99,4	0,2	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,1%
		∅		1,2%	∅		5,7%	∅		5,6%	∅		4,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	4,9%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	4,8%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,2	6,5%	0,4	0,3	0,2
0,8	0,5	0,3	0,3	4,2%	0,5	0,4	0,3
0,9	0,5	0,3	0,3	2,2%	1,2	0,4	0,8
1,1	0,5	0,3	0,3	6,5%	1,9	0,5	0,8
1,4	0,7	0,4	0,3	8,1%	3,8	0,7	0,9
1,8	0,7	0,5	0,4	9,7%	4,7	0,9	1,0
2,5	0,7	0,7	0,6	12,7%	7,5	1,4	1,3
2,9	0,7	0,7	0,6	9,4%	6,0	1,7	1,5
7,9	0,2	1,7	1,6	4,2%	7,5	3,6	3,4
10,5	0,1	2,2	2,1	2,8%	8,5	4,4	4,4
24,2	0,2	5,0	4,9	0,7%	10,7	7,3	7,2
50,9	0,4	10,2	10,4	1,4%	21,3	16,9	12,6
99,4	0,2	20,3	20,2	0,2%	30,8	27,0	22,5
			∅	5,2%			

Abbildung A-36. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 28

Parameter Versuchsreihe 29

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=4$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	4,3%	0,5	0,5	4,7%	3,1	3,3	4,8%	1,3	1,3	0,4%
0,3	1,5	30	31	4,2%	1,4	1,4	4,6%	9,3	9,8	4,8%	1,3	1,3	0,4%
0,5	1,0	50	51	2,7%	2,3	2,3	3,5%	15,7	16,2	3,2%	1,3	1,3	0,8%
0,8	0,5	80	79	1,5%	3,6	3,6	0,7%	25,1	24,9	0,9%	1,3	1,3	0,7%
0,9	0,5	85	84	1,0%	3,9	3,8	0,3%	26,7	26,5	0,5%	1,3	1,3	0,7%
1,0	0,5	90	90	0,2%	4,1	4,1	1,1%	28,3	28,5	1,0%	1,3	1,3	0,9%
1,3	0,5	95	96	0,9%	4,3	4,4	3,1%	29,9	30,7	3,0%	1,3	1,3	2,2%
1,5	0,5	97	98	0,7%	4,4	4,6	3,4%	30,5	31,5	3,2%	1,3	1,3	2,7%
1,8	0,5	98	99	0,7%	4,5	4,6	3,7%	31,0	32,1	3,7%	1,3	1,4	3,0%
2,5	0,5	99	100	1,0%	4,6	4,8	3,7%	31,8	33,0	3,7%	1,3	1,4	2,7%
4,3	0,3	100	100	0,0%	4,8	4,9	1,2%	33,3	33,7	1,0%	1,4	1,4	1,2%
6,0	0,2	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,5%	33,8	33,9	0,4%	1,4	1,4	0,5%
23,4	0,1	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,1%	34,5	34,5	0,0%	1,4	1,4	0,1%
52,9	0,1	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,1%	34,6	34,6	0,0%	1,4	1,4	0,1%
101,3	0,1	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,2%	34,7	34,7	0,0%	1,4	1,4	0,3%
		∅		1,2%	∅		2,1%	∅		2,0%	∅		1,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,2	0,3	30,8%	0,3	0,3	0,3
0,3	1,5	0,2	0,3	30,8%	0,3	0,3	0,3
0,5	1,0	0,2	0,2	0,0%	0,3	0,3	0,3
0,8	0,5	0,2	0,2	0,5%	0,4	0,3	1,6
0,9	0,5	0,2	0,3	16,9%	0,5	0,3	1,7
1,0	0,5	0,3	0,3	0,0%	0,9	0,4	1,8
1,3	0,5	0,3	0,3	2,5%	2,3	0,5	2,1
1,5	0,5	0,3	0,3	4,4%	4,1	0,6	2,4
1,8	0,5	0,4	0,4	3,5%	5,5	0,7	2,7
2,5	0,5	0,6	0,5	5,5%	8,0	1,2	3,8
4,3	0,3	0,9	0,9	2,7%	13,3	2,4	6,6
6,0	0,2	1,2	1,2	1,4%	15,1	3,9	9,1
23,4	0,1	4,8	4,7	1,2%	45,7	19,5	35,6
52,9	0,1	10,6	10,6	0,5%	90,6	47,7	80,2
101,3	0,1	20,0	20,2	1,2%	167,3	94,9	153,5
			∅	6,8%			

Abbildung A-37. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 29

Parameter Versuchsreihe 30

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=4$) Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	4,3%	0,5	0,4	4,0%	3,1	3,0	3,9%	1,3	1,2	8,0%
0,3	1,5	30	31	4,2%	1,4	1,3	4,1%	9,3	9,0	3,9%	1,3	1,2	8,0%
0,5	1,0	50	51	2,7%	2,3	2,2	2,5%	15,7	15,2	2,8%	1,3	1,2	5,2%
0,8	0,5	80	79	1,5%	3,6	3,5	2,3%	25,1	24,5	2,5%	1,3	1,3	0,9%
0,9	0,5	85	84	1,0%	3,9	3,8	1,2%	26,7	26,3	1,4%	1,3	1,3	0,2%
1,0	0,5	90	90	0,2%	4,1	4,1	1,1%	28,3	28,5	1,0%	1,3	1,3	0,9%
1,3	0,5	95	96	0,9%	4,3	4,4	3,1%	29,9	30,7	3,0%	1,3	1,3	2,2%
1,5	0,5	97	98	0,7%	4,4	4,6	3,4%	30,5	31,5	3,3%	1,3	1,3	2,7%
1,7	0,5	98	99	0,6%	4,5	4,6	3,6%	31,0	32,1	3,5%	1,3	1,4	2,9%
2,4	0,5	99	100	0,9%	4,6	4,8	3,8%	31,8	32,9	3,6%	1,3	1,4	2,9%
4,3	0,3	100	100	0,0%	4,8	4,9	1,2%	33,3	33,7	1,1%	1,4	1,4	1,1%
5,9	0,2	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	33,8	33,9	0,4%	1,4	1,4	0,4%
23,6	0,3	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,2%
50,8	0,4	100	100	0,3%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,4%
100,0	0,1	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,1%
		∅		1,2%	∅		2,1%	∅		2,0%	∅		2,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,2	0,3	30,9%	0,3	0,3	0,3
0,3	1,5	0,2	0,3	30,8%	0,3	0,3	0,3
0,5	1,0	0,2	0,2	5,4%	0,3	0,3	0,2
0,8	0,5	0,2	0,2	0,8%	0,4	0,3	0,2
0,9	0,5	0,2	0,3	17,2%	0,5	0,3	1,7
1,0	0,5	0,3	0,3	0,0%	0,9	0,4	1,8
1,3	0,5	0,3	0,3	2,5%	2,1	0,5	2,1
1,5	0,5	0,3	0,3	4,4%	4,5	0,6	2,4
1,7	0,5	0,4	0,4	4,5%	5,3	0,7	2,7
2,4	0,5	0,5	0,5	6,4%	8,2	1,1	3,6
4,3	0,3	0,9	0,9	3,8%	11,9	2,3	6,5
5,9	0,2	1,2	1,2	2,1%	14,8	3,7	8,9
23,6	0,3	4,8	4,8	0,3%	24,2	11,0	17,9
50,8	0,4	10,1	10,3	1,4%	33,8	17,7	23,4
100,0	0,1	20,3	20,2	0,2%	41,8	27,8	33,4
		∅		7,4%			

Abbildung A-38. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 30

Parameter Versuchsreihe 31

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=5$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	4,8%	0,4	0,5	7,7%	3,1	3,3	6,4%	1,3	1,3	2,8%
0,3	1,5	30	31	4,8%	1,3	1,4	6,8%	9,2	9,8	6,4%	1,3	1,3	1,9%
0,5	1,0	50	52	3,2%	2,2	2,3	4,9%	15,5	16,3	4,8%	1,3	1,3	1,7%
0,8	0,5	80	80	0,1%	3,6	3,6	1,5%	24,8	25,2	1,5%	1,3	1,3	1,6%
0,9	0,5	85	85	0,7%	3,8	3,9	1,1%	26,4	26,6	0,9%	1,3	1,3	1,8%
1,1	0,5	90	91	0,5%	4,0	4,1	2,6%	28,0	28,7	2,4%	1,3	1,3	2,1%
1,3	0,5	95	95	0,4%	4,3	4,4	3,6%	29,6	30,6	3,5%	1,3	1,3	3,2%
1,6	0,5	97	97	0,4%	4,4	4,6	4,2%	30,3	31,5	4,0%	1,3	1,3	3,7%
1,8	0,5	98	98	0,3%	4,5	4,6	4,1%	30,8	32,0	4,1%	1,3	1,4	3,8%
2,8	0,5	99	100	0,8%	4,6	4,8	4,0%	32,0	33,2	3,8%	1,3	1,4	3,2%
4,1	0,3	100	100	0,0%	4,8	4,8	1,2%	33,2	33,6	1,1%	1,4	1,4	1,3%
6,0	0,2	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,5%	33,8	33,9	0,5%	1,4	1,4	0,5%
23,2	0,1	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,1%	34,5	34,5	0,0%	1,4	1,4	0,0%
52,9	0,1	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,1%	34,6	34,6	0,0%	1,4	1,4	0,1%
101,3	0,1	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,2%	34,7	34,7	0,0%	1,4	1,4	0,3%
		∅		1,1%	∅		2,8%	∅		2,6%	∅		1,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,2	0,3	30,7%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,2	0,3	30,5%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,2	0,2	0,7%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,2	0,2	0,7%	0,5	0,3	1,7
0,9	0,5	0,2	0,3	5,2%	0,6	0,4	1,7
1,1	0,5	0,3	0,3	1,3%	1,4	0,4	1,9
1,3	0,5	0,3	0,3	1,7%	2,5	0,5	2,2
1,6	0,5	0,4	0,3	4,8%	4,0	0,6	2,5
1,8	0,5	0,4	0,4	3,4%	6,2	0,7	2,8
2,8	0,5	0,6	0,6	6,0%	8,5	1,4	4,4
4,1	0,3	0,9	0,8	3,7%	11,5	2,2	6,2
6,0	0,2	1,2	1,2	1,4%	15,1	4,0	9,1
23,2	0,1	4,7	4,7	1,4%	45,7	19,1	35,2
52,9	0,1	10,6	10,6	0,5%	90,6	47,7	80,2
101,3	0,1	20,0	20,2	1,2%	167,3	94,9	153,5
			∅	6,2%			

Abbildung A-39. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 31

Parameter Versuchsreihe 32Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=5$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	4,8%	0,4	0,4	1,3%	3,1	3,0	2,4%	1,3	1,2	5,8%
0,3	1,5	30	31	4,8%	1,3	1,3	2,1%	9,2	9,0	2,4%	1,3	1,2	6,6%
0,5	1,0	50	52	3,2%	2,2	2,2	1,3%	15,5	15,3	1,4%	1,3	1,2	4,4%
0,8	0,5	80	80	0,1%	3,6	3,6	0,1%	24,8	24,9	0,1%	1,3	1,3	0,1%
0,9	0,5	85	85	0,7%	3,8	3,8	0,4%	26,4	26,5	0,2%	1,3	1,3	1,0%
1,1	0,5	90	90	0,1%	4,0	4,1	2,2%	28,0	28,6	2,0%	1,3	1,3	2,1%
1,4	0,5	95	96	0,7%	4,3	4,4	4,0%	29,6	30,7	3,9%	1,3	1,3	3,3%
1,6	0,5	97	97	0,3%	4,4	4,5	4,1%	30,3	31,5	4,0%	1,3	1,3	3,7%
1,8	0,5	98	98	0,3%	4,4	4,6	4,3%	30,7	32,0	4,2%	1,3	1,4	4,0%
2,7	0,6	99	100	0,8%	4,6	4,8	4,2%	31,8	33,1	4,2%	1,3	1,4	3,4%
4,5	0,4	100	100	0,0%	4,8	4,9	1,6%	33,2	33,7	1,5%	1,4	1,4	1,6%
6,4	0,3	100	100	0,0%	4,9	4,9	1,0%	33,7	34,0	0,9%	1,4	1,4	1,0%
23,7	0,3	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,3%	34,1	34,2	0,3%	1,4	1,4	0,4%
50,8	0,4	100	100	0,3%	4,9	4,9	0,3%	34,2	34,2	0,2%	1,4	1,4	0,6%
99,8	0,1	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,2%	1,4	1,4	0,1%
		∅		1,1%	∅		1,8%	∅		1,9%	∅		2,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,2	0,3	30,8%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,2	0,3	30,6%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,2	0,2	4,8%	0,4	0,3	0,2
0,8	0,5	0,2	0,2	0,6%	0,5	0,3	0,2
0,9	0,5	0,2	0,3	5,7%	0,6	0,4	1,7
1,1	0,5	0,3	0,3	0,2%	1,1	0,4	1,9
1,4	0,5	0,3	0,3	4,0%	3,0	0,5	2,2
1,6	0,5	0,4	0,3	5,3%	4,2	0,6	2,5
1,8	0,5	0,4	0,4	5,8%	4,7	0,7	2,8
2,7	0,6	0,6	0,6	6,2%	9,6	1,4	4,2
4,5	0,4	1,0	0,9	3,0%	13,5	2,4	6,8
6,4	0,3	1,3	1,3	2,6%	17,5	3,9	9,8
23,7	0,3	4,8	4,8	0,4%	23,4	11,0	18,0
50,8	0,4	10,1	10,3	1,4%	34,2	18,1	23,4
99,8	0,1	20,2	20,2	0,3%	40,9	27,8	33,3
		∅		6,8%			

Abbildung A-40. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 32

Parameter Versuchsreihe 33

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=4$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	2,6%	0,4	0,4	3,7%	2,6	2,5	3,8%	1,0	1,0	1,1%
0,3	1,5	30	31	1,9%	1,1	1,1	0,6%	7,5	7,5	0,5%	1,0	1,0	1,3%
0,5	1,0	50	51	1,8%	1,9	1,9	0,4%	12,4	12,4	0,5%	1,0	1,0	1,4%
0,8	0,5	80	78	2,8%	3,0	2,9	3,9%	19,9	19,1	4,1%	1,0	1,0	1,2%
0,9	0,5	85	84	2,0%	3,2	3,1	3,2%	21,2	20,5	3,4%	1,0	1,0	1,2%
1,1	0,8	90	91	0,8%	3,4	3,4	0,5%	22,5	22,3	0,6%	1,0	1,0	1,3%
1,6	1,2	95	98	3,5%	3,6	3,7	3,2%	23,7	24,5	3,0%	1,0	1,0	0,3%
2,0	1,4	97	99	2,3%	3,7	3,8	2,6%	24,5	25,1	2,5%	1,1	1,1	0,3%
3,3	1,0	98	100	2,4%	3,8	3,9	3,6%	25,3	26,2	3,6%	1,1	1,1	1,2%
4,6	0,9	99	100	0,8%	3,9	4,1	3,4%	26,2	27,1	3,4%	1,1	1,1	2,6%
14,4	0,2	100	100	0,0%	4,5	4,6	0,9%	30,2	30,5	0,9%	1,3	1,3	1,0%
17,0	0,1	100	100	0,1%	4,6	4,7	0,7%	30,8	31,0	0,5%	1,3	1,3	0,7%
28,3	0,1	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,3%	32,0	32,1	0,3%	1,3	1,3	0,3%
55,1	0,1	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,2%	32,9	33,0	0,1%	1,4	1,4	0,2%
101,0	0,0	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,1%	33,4	33,4	0,0%	1,4	1,4	0,1%
		∅		1,4%	∅		1,8%	∅		1,8%	∅		0,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	1,4%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	1,3%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	0,4%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	4,6%	0,6	0,3	0,6
0,9	0,5	0,3	0,3	3,2%	4,5	0,3	0,7
1,1	0,8	0,3	0,3	1,9%	7,2	0,4	0,7
1,6	1,2	0,5	0,4	5,1%	7,8	0,9	0,9
2,0	1,4	0,6	0,5	3,7%	12,0	1,9	1,1
3,3	1,0	0,9	0,8	6,8%	10,2	3,5	1,8
4,6	0,9	1,2	1,1	3,7%	14,2	4,3	2,4
14,4	0,2	3,2	3,1	1,4%	13,8	6,5	6,5
17,0	0,1	3,7	3,7	0,7%	14,5	7,2	7,5
28,3	0,1	5,9	5,9	0,8%	15,0	11,3	12,0
55,1	0,1	11,2	11,1	0,6%	27,5	21,5	22,5
101,0	0,0	20,2	20,1	0,3%	47,6	39,4	40,5
		∅		2,4%			

Abbildung A-41. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 33

Parameter Versuchsreihe 34Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=6$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	2,6%	0,4	0,4	3,7%	2,6	2,5	3,8%	1,0	1,0	1,1%
0,3	1,5	30	31	1,9%	1,1	1,1	0,5%	7,5	7,5	0,5%	1,0	1,0	1,3%
0,5	1,0	50	51	1,5%	1,9	1,9	0,0%	12,4	12,4	0,1%	1,0	1,0	1,4%
0,8	0,5	80	76	5,1%	3,0	2,8	6,2%	19,9	18,7	6,3%	1,0	1,0	1,2%
0,9	0,5	85	82	4,0%	3,2	3,0	5,3%	21,2	20,1	5,4%	1,0	1,0	1,3%
1,1	0,9	90	90	0,3%	3,4	3,3	1,5%	22,5	22,1	1,6%	1,0	1,0	1,2%
1,5	1,5	95	96	1,6%	3,6	3,6	1,4%	23,7	24,0	1,3%	1,0	1,0	0,3%
1,9	1,7	97	98	1,0%	3,7	3,7	1,5%	24,3	24,7	1,5%	1,0	1,0	0,4%
3,0	1,3	98	100	2,1%	3,8	3,9	4,1%	25,0	26,0	4,0%	1,1	1,1	1,9%
4,6	1,1	99	100	0,8%	3,9	4,1	4,0%	26,0	27,0	3,9%	1,1	1,1	3,2%
13,7	0,3	100	100	0,1%	4,3	4,4	1,8%	28,9	29,4	1,6%	1,2	1,2	1,9%
17,0	0,4	100	100	0,1%	4,4	4,4	1,1%	29,1	29,4	1,1%	1,2	1,2	1,2%
32,9	0,4	100	100	0,3%	4,4	4,4	0,6%	29,3	29,4	0,6%	1,2	1,2	0,9%
53,2	0,6	100	100	0,4%	4,4	4,4	0,9%	29,2	29,4	0,8%	1,2	1,2	1,3%
93,0	0,2	100	100	0,0%	4,4	4,4	0,2%	29,4	29,4	0,2%	1,2	1,2	0,2%
		∅		1,5%	∅		2,2%	∅		2,2%	∅		1,3%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	1,4%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	1,3%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	0,0%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	7,1%	0,8	0,3	0,3
0,9	0,5	0,3	0,3	5,5%	2,8	0,3	0,3
1,1	0,9	0,3	0,3	3,5%	6,8	0,4	0,6
1,5	1,5	0,4	0,4	0,8%	10,2	0,8	0,9
1,9	1,7	0,5	0,5	2,1%	10,2	1,1	1,1
3,0	1,3	0,8	0,8	3,0%	9,8	2,1	1,7
4,6	1,1	1,2	1,1	4,3%	13,0	4,0	2,4
13,7	0,3	3,2	3,1	2,3%	14,7	6,6	5,6
17,0	0,4	3,9	3,8	2,6%	14,2	7,5	6,3
32,9	0,4	7,3	7,4	1,7%	16,2	12,7	9,9
53,2	0,6	11,8	12,1	2,0%	29,1	24,5	14,5
93,0	0,2	21,0	21,1	0,1%	30,1	27,7	23,5
		∅		2,5%			

Abbildung A-42. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 34

Parameter Versuchsreihe 35

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=4$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	11	11	1,3%	0,4	0,4	6,1%	2,6	2,8	6,0%	0,9	1,0	7,4%
0,3	1,5	30	31	1,9%	1,0	1,1	9,5%	6,9	7,5	9,4%	1,0	1,0	7,4%
0,5	1,0	50	51	1,9%	1,7	1,9	9,3%	11,4	12,4	9,3%	1,0	1,0	7,3%
0,8	0,5	80	79	1,8%	2,8	2,9	5,3%	18,4	19,4	5,3%	1,0	1,0	7,2%
0,9	0,7	85	85	0,1%	2,9	3,1	7,2%	19,6	20,9	6,9%	1,0	1,0	7,2%
1,1	0,9	90	91	0,5%	3,1	3,3	7,5%	20,7	22,3	7,6%	1,0	1,0	7,0%
1,8	1,2	95	99	4,2%	3,3	3,7	12,3%	22,1	24,8	12,2%	1,0	1,0	7,7%
2,3	1,2	97	100	2,6%	3,5	3,8	10,8%	23,0	25,5	10,8%	1,0	1,1	8,0%
3,0	1,1	98	100	2,3%	3,5	3,9	10,5%	23,5	26,0	10,4%	1,0	1,1	8,0%
4,5	0,9	99	100	1,0%	3,8	4,1	8,3%	25,0	27,0	8,3%	1,1	1,1	7,2%
16,1	0,1	100	100	0,0%	4,6	4,6	0,6%	30,6	30,8	0,6%	1,3	1,3	0,6%
18,7	0,1	100	100	0,1%	4,7	4,7	0,5%	31,1	31,2	0,4%	1,3	1,3	0,6%
28,8	0,0	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,2%	32,1	32,1	0,1%	1,3	1,3	0,3%
56,2	0,0	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,0%	33,0	33,0	0,0%	1,4	1,4	0,0%
101,7	0,0	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,1%	33,4	33,4	0,0%	1,4	1,4	0,1%
		∅		1,2%	∅		5,9%	∅		5,8%	∅		5,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	4,5%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	8,2%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	7,3%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	5,9%	3,8	0,4	0,7
0,9	0,7	0,3	0,3	5,5%	6,1	0,4	0,7
1,1	0,9	0,3	0,3	7,7%	6,0	0,4	0,7
1,8	1,2	0,6	0,5	13,7%	8,7	1,6	1,0
2,3	1,2	0,7	0,6	10,2%	8,8	2,6	1,3
3,0	1,1	0,9	0,8	12,4%	10,5	3,3	1,6
4,5	0,9	1,2	1,1	8,4%	10,4	4,3	2,4
16,1	0,1	3,5	3,5	1,0%	14,6	7,0	7,2
18,7	0,1	4,0	4,0	0,2%	13,7	7,7	8,2
28,8	0,0	6,0	6,0	0,1%	15,9	11,4	12,2
56,2	0,0	11,4	11,4	0,1%	27,3	22,1	22,9
101,7	0,0	20,3	20,3	0,1%	45,2	39,3	40,8
		∅		5,7%			

Abbildung A-43. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 35

Parameter Versuchsreihe 36Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=6$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	11	11	0,9%	0,4	0,4	6,5%	2,6	2,8	6,4%	0,9	1,0	7,4%
0,3	1,5	30	31	2,4%	1,0	1,1	9,9%	6,9	7,5	9,8%	1,0	1,0	7,3%
0,5	1,0	50	51	2,0%	1,7	1,9	9,4%	11,4	12,5	9,5%	1,0	1,0	7,2%
0,8	0,6	80	77	3,8%	2,8	2,8	3,1%	18,4	18,9	3,1%	1,0	1,0	7,2%
0,9	0,7	85	84	2,0%	2,9	3,1	5,0%	19,5	20,5	4,8%	1,0	1,0	7,2%
1,1	1,0	90	91	0,4%	3,1	3,3	7,6%	20,7	22,3	7,6%	1,0	1,0	7,2%
1,8	1,4	95	98	3,2%	3,3	3,7	12,0%	21,9	24,5	11,8%	1,0	1,0	8,5%
2,1	1,5	97	99	1,6%	3,4	3,8	10,7%	22,7	25,1	10,6%	1,0	1,1	9,0%
3,0	1,3	98	100	2,1%	3,5	3,9	11,1%	23,4	26,0	11,1%	1,0	1,1	8,7%
4,5	0,9	99	100	0,7%	3,7	4,1	9,8%	24,6	27,0	9,6%	1,0	1,1	9,0%
14,5	0,3	100	100	0,1%	4,3	4,4	2,5%	28,7	29,4	2,4%	1,2	1,2	2,6%
19,7	0,2	100	100	0,1%	4,4	4,4	1,6%	29,0	29,4	1,5%	1,2	1,2	1,7%
32,6	0,3	100	100	0,2%	4,4	4,4	0,6%	29,3	29,4	0,6%	1,2	1,2	0,9%
53,7	0,5	100	100	0,4%	4,4	4,4	0,9%	29,2	29,4	0,9%	1,2	1,2	1,3%
91,3	0,2	100	100	0,3%	4,4	4,4	0,2%	29,4	29,4	0,2%	1,2	1,2	0,5%
		∅		1,4%	∅		6,1%	∅		6,0%	∅		5,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	4,6%	0,4	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	8,6%	0,4	0,4	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	7,4%	0,4	0,4	0,3
0,8	0,6	0,3	0,3	3,9%	2,6	0,4	0,3
0,9	0,7	0,3	0,3	6,6%	3,8	0,4	0,3
1,1	1,0	0,4	0,3	7,0%	7,7	0,5	0,7
1,8	1,4	0,6	0,5	12,7%	11,3	1,1	1,0
2,1	1,5	0,6	0,6	12,1%	10,3	1,8	1,2
3,0	1,3	0,9	0,8	12,9%	8,9	2,5	1,6
4,5	0,9	1,2	1,1	8,0%	14,3	3,6	2,4
14,5	0,3	3,4	3,3	2,8%	13,8	6,8	5,7
19,7	0,2	4,5	4,5	1,5%	14,1	7,8	6,9
32,6	0,3	7,3	7,4	0,5%	16,8	12,0	9,8
53,7	0,5	12,0	12,2	1,3%	26,5	22,7	14,6
91,3	0,2	20,5	20,7	0,9%	31,1	27,4	23,1
			∅	6,0%			

Abbildung A-44. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 36

Parameter Versuchsreihe 37

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=3$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	3,6%	0,4	0,4	0,1%	2,6	2,6	0,3%	1,1	1,1	3,6%
0,3	1,5	30	31	3,1%	1,2	1,2	1,0%	7,9	7,9	0,9%	1,1	1,1	4,0%
0,5	1,0	50	51	2,9%	2,0	2,0	1,1%	13,2	13,0	1,1%	1,1	1,1	3,9%
0,8	0,5	80	79	1,2%	3,2	3,1	4,7%	21,1	20,1	4,7%	1,1	1,1	3,6%
0,9	0,5	85	85	0,3%	3,4	3,3	3,1%	22,5	21,7	3,2%	1,1	1,1	2,8%
1,0	0,5	90	91	0,8%	3,6	3,6	0,8%	23,8	23,6	1,1%	1,1	1,1	1,6%
1,4	0,8	95	98	3,3%	3,8	4,0	3,9%	25,1	26,1	3,9%	1,1	1,1	0,6%
1,9	0,9	97	100	2,6%	4,0	4,2	5,3%	26,1	27,5	5,3%	1,1	1,2	2,7%
2,0	1,0	98	100	1,7%	4,0	4,2	5,2%	26,4	27,7	5,0%	1,1	1,2	3,4%
2,9	0,9	99	100	0,9%	4,1	4,4	5,4%	27,1	28,6	5,4%	1,1	1,2	4,5%
9,7	0,3	100	100	0,0%	4,6	4,7	2,3%	30,2	30,9	2,2%	1,3	1,3	2,3%
11,6	0,2	100	100	0,0%	4,7	4,7	2,0%	30,6	31,1	1,8%	1,3	1,3	2,0%
25,2	0,1	100	100	0,0%	4,8	4,9	0,9%	31,8	32,1	0,9%	1,3	1,3	0,9%
54,0	0,1	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,4%	32,6	32,7	0,3%	1,4	1,4	0,4%
101,9	0,1	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,1%	33,0	33,0	0,1%	1,4	1,4	0,0%
		∅		1,4%	∅		2,4%	∅		2,4%	∅		2,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,3%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	9,3%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	1,4%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	4,7%	0,4	0,3	0,7
0,9	0,5	0,3	0,3	2,4%	2,0	0,3	0,8
1,0	0,5	0,3	0,3	0,5%	5,2	0,4	0,8
1,4	0,8	0,4	0,3	4,4%	12,1	0,5	1,0
1,9	0,9	0,5	0,5	6,5%	21,7	1,0	1,3
2,0	1,0	0,5	0,5	5,2%	19,8	1,1	1,4
2,9	0,9	0,7	0,7	7,2%	25,0	2,0	1,9
9,7	0,3	2,1	2,1	2,7%	36,6	6,5	5,9
11,6	0,2	2,5	2,4	2,2%	49,6	7,3	7,0
25,2	0,1	5,2	5,1	1,4%	67,2	16,3	14,9
54,0	0,1	11,1	10,8	2,0%	154,3	28,0	31,5
101,9	0,1	20,3	20,3	0,2%	156,0	47,5	59,1
		∅		4,0%			

Abbildung A-45. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 37

Parameter Versuchsreihe 38Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=3$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	3,6%	0,4	0,4	0,1%	2,6	2,6	0,3%	1,1	1,1	3,6%
0,3	1,5	30	31	3,1%	1,2	1,2	1,0%	7,9	7,9	0,9%	1,1	1,1	4,0%
0,5	1,0	50	51	2,9%	2,0	2,0	1,1%	13,2	13,0	1,1%	1,1	1,1	3,9%
0,8	0,5	80	79	1,2%	3,2	3,1	4,7%	21,1	20,1	4,7%	1,1	1,1	3,6%
0,9	0,5	85	85	0,3%	3,4	3,3	3,1%	22,5	21,7	3,2%	1,1	1,1	2,8%
1,0	0,5	90	90	0,3%	3,6	3,6	1,4%	23,8	23,4	1,6%	1,1	1,1	1,7%
1,4	0,8	95	98	3,2%	3,8	4,0	3,8%	25,2	26,1	3,7%	1,1	1,1	0,5%
2,0	0,8	97	100	2,4%	4,0	4,2	5,0%	26,3	27,6	4,9%	1,1	1,2	2,5%
1,9	1,0	98	100	1,6%	4,0	4,2	4,6%	26,3	27,5	4,6%	1,1	1,2	2,9%
2,6	0,8	99	100	0,8%	4,1	4,3	4,2%	27,2	28,2	4,0%	1,1	1,2	3,4%
8,2	0,3	100	100	0,0%	4,6	4,7	1,6%	30,1	30,6	1,6%	1,3	1,3	1,6%
12,9	0,3	100	100	0,0%	4,7	4,7	1,4%	30,5	30,9	1,3%	1,3	1,3	1,4%
28,9	0,2	100	100	0,0%	4,7	4,7	1,4%	30,6	30,9	1,3%	1,3	1,3	1,3%
53,0	0,1	100	100	0,1%	4,7	4,7	1,1%	30,6	30,9	1,0%	1,3	1,3	1,0%
97,3	0,2	100	100	0,0%	4,7	4,7	1,1%	30,6	30,9	1,0%	1,3	1,3	1,2%
		∅		1,3%	∅		2,4%	∅		2,3%	∅		2,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,3%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	9,3%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	1,4%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	4,7%	0,4	0,3	0,3
0,9	0,5	0,3	0,3	2,4%	0,8	0,3	0,3
1,0	0,5	0,3	0,3	2,7%	1,7	0,4	0,3
1,4	0,8	0,4	0,3	2,3%	4,8	0,6	1,0
2,0	0,8	0,5	0,5	5,2%	7,2	1,1	1,3
1,9	1,0	0,5	0,5	5,6%	7,3	1,0	1,3
2,6	0,8	0,6	0,6	5,9%	11,4	1,4	1,7
8,2	0,3	1,8	1,8	1,5%	14,9	3,9	5,1
12,9	0,3	2,8	2,7	2,5%	13,3	5,8	6,7
28,9	0,2	6,3	6,1	2,4%	15,0	9,8	10,1
53,0	0,1	11,5	11,3	2,3%	21,9	15,5	15,2
97,3	0,2	20,8	20,6	0,8%	34,5	28,8	24,6
			∅	3,9%			

Abbildung A-46. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 38

Parameter Versuchsreihe 39

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=10$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	12	6,3%	0,4	0,4	15,4%	2,6	3,0	15,4%	1,0	1,1	8,6%
0,3	1,5	30	32	5,2%	1,1	1,2	14,4%	7,1	8,0	14,0%	1,0	1,1	8,8%
0,5	1,0	50	52	4,3%	1,8	2,0	13,0%	11,7	13,2	13,0%	1,0	1,1	8,3%
0,8	0,5	81	77	4,2%	2,9	3,0	5,1%	18,9	19,8	4,8%	1,0	1,1	9,7%
1,0	0,6	86	84	1,7%	3,1	3,3	8,5%	20,1	21,8	8,6%	1,0	1,1	10,4%
1,3	0,8	90	91	0,6%	3,2	3,7	13,3%	21,3	24,1	13,3%	1,0	1,1	12,7%
1,7	0,9	95	95	0,0%	3,5	3,9	14,2%	22,7	25,9	14,1%	1,0	1,1	14,2%
2,1	0,9	97	97	0,1%	3,6	4,1	15,9%	23,4	27,1	15,7%	1,0	1,2	16,0%
2,8	0,9	98	99	0,9%	3,7	4,3	16,9%	24,1	28,2	16,7%	1,0	1,2	15,8%
3,9	0,9	99	100	0,4%	3,9	4,4	14,9%	25,5	29,2	14,7%	1,1	1,2	14,4%
12,3	0,2	100	100	0,0%	4,6	4,8	4,5%	29,9	31,2	4,3%	1,2	1,3	4,5%
14,8	0,2	100	100	0,1%	4,6	4,8	3,5%	30,4	31,5	3,5%	1,3	1,3	3,6%
25,0	0,2	100	100	0,0%	4,8	4,9	2,0%	31,5	32,1	1,9%	1,3	1,3	2,0%
54,4	0,1	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,4%	32,6	32,7	0,3%	1,4	1,4	0,3%
102,0	0,1	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,1%	33,0	33,0	0,1%	1,4	1,4	0,1%
		∅		1,6%	∅		9,5%	∅		9,3%	∅		8,6%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	3,0%	0,4	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	2,7%	0,4	0,4	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	10,7%	0,4	0,4	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	3,4%	3,3	0,4	0,8
1,0	0,6	0,3	0,3	7,8%	9,2	0,5	0,9
1,3	0,8	0,4	0,3	4,0%	10,7	0,6	1,0
1,7	0,9	0,5	0,4	13,1%	16,7	0,9	1,2
2,1	0,9	0,6	0,5	9,9%	24,7	1,3	1,5
2,8	0,9	0,8	0,7	13,9%	23,8	2,2	1,9
3,9	0,9	1,0	0,9	8,9%	31,4	2,8	2,5
12,3	0,2	2,7	2,6	4,7%	44,8	8,2	7,4
14,8	0,2	3,2	3,1	3,7%	50,2	9,6	8,9
25,0	0,2	5,2	5,1	2,2%	115,6	14,6	14,8
54,4	0,1	11,1	10,9	1,2%	102,3	26,4	31,8
102,0	0,1	20,3	20,3	0,2%	152,0	48,7	59,1
		∅		6,0%			

Abbildung A-47. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 39

Parameter Versuchsreihe 40Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=9$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	12	6,3%	0,4	0,5	15,4%	2,6	3,0	15,4%	1,0	1,1	8,6%
0,3	1,5	30	32	5,2%	1,1	1,2	14,4%	7,1	8,0	14,0%	1,0	1,1	8,8%
0,5	1,0	50	52	4,5%	1,8	2,0	13,2%	11,7	13,2	13,2%	1,0	1,1	8,3%
0,8	0,5	81	78	3,2%	2,9	3,0	6,1%	18,9	20,0	5,9%	1,0	1,1	9,6%
1,0	0,6	86	85	1,0%	3,1	3,3	9,4%	20,1	22,0	9,3%	1,0	1,1	10,5%
1,3	0,8	90	91	1,2%	3,2	3,7	14,0%	21,3	24,3	14,0%	1,0	1,1	12,7%
1,6	1,0	95	95	0,2%	3,4	3,9	13,9%	22,5	25,6	13,9%	1,0	1,1	14,1%
2,1	1,0	97	97	0,1%	3,6	4,1	15,9%	23,4	27,1	15,8%	1,0	1,2	15,8%
2,6	1,0	98	99	0,9%	3,7	4,3	16,5%	24,1	28,0	16,4%	1,0	1,2	15,5%
3,6	0,9	99	100	0,4%	3,9	4,4	14,4%	25,4	29,0	14,3%	1,1	1,2	13,9%
9,9	0,3	100	100	0,1%	4,4	4,7	6,3%	29,1	30,9	6,3%	1,2	1,3	6,4%
15,9	0,3	100	100	0,1%	4,5	4,7	4,7%	29,5	30,9	4,8%	1,2	1,3	4,9%
29,5	0,1	100	100	0,2%	4,5	4,7	4,0%	29,8	30,9	3,9%	1,2	1,3	4,2%
54,3	0,2	100	100	0,0%	4,6	4,7	3,4%	30,0	30,9	3,3%	1,2	1,3	3,3%
97,4	0,3	100	100	0,0%	4,6	4,7	3,1%	30,0	30,9	3,1%	1,2	1,3	3,2%
		∅		1,6%	∅		10,3%	∅		10,2%	∅		9,3%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	3,0%	0,4	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	2,7%	0,4	0,4	0,3
0,5	1,0	0,3	0,2	10,9%	0,4	0,4	0,2
0,8	0,5	0,3	0,3	4,5%	1,1	0,4	0,3
1,0	0,6	0,3	0,3	8,5%	2,4	0,5	0,3
1,3	0,8	0,4	0,3	4,6%	4,8	0,6	0,5
1,6	1,0	0,5	0,4	12,8%	6,8	0,8	1,2
2,1	1,0	0,6	0,5	10,4%	9,0	1,1	1,4
2,6	1,0	0,7	0,6	13,5%	7,9	1,7	1,8
3,6	0,9	0,9	0,8	7,6%	10,2	2,2	2,3
9,9	0,3	2,2	2,1	4,9%	8,5	4,8	6,0
15,9	0,3	3,6	3,4	5,2%	13,6	7,1	7,4
29,5	0,1	6,4	6,2	3,0%	15,8	9,9	10,2
54,3	0,2	12,0	11,5	4,2%	28,2	17,9	15,5
97,4	0,3	21,2	20,7	2,7%	40,8	33,1	24,6
		∅		6,6%			

Abbildung A-48. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 40

Parameter Versuchsreihe 41

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=5$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	11	5,1%	0,4	0,4	4,5%	2,6	2,7	4,2%	1,0	1,0	0,6%
0,3	1,5	30	30	1,8%	1,1	1,1	0,9%	7,3	7,4	1,0%	1,0	1,0	0,8%
0,5	1,0	50	50	1,0%	1,8	1,8	0,4%	12,2	12,2	0,3%	1,0	1,0	0,6%
0,8	0,5	80	77	4,5%	3,0	2,8	5,1%	19,6	18,6	5,2%	1,0	1,0	0,7%
0,9	0,7	85	85	1,0%	3,1	3,1	1,8%	20,9	20,5	1,8%	1,0	1,0	0,9%
1,1	1,2	90	92	1,3%	3,3	3,3	0,6%	22,1	22,2	0,5%	1,0	1,0	0,7%
1,7	1,8	95	98	3,1%	3,5	3,6	2,7%	23,3	24,0	2,7%	1,0	1,0	0,4%
2,4	1,7	97	99	2,3%	3,6	3,7	2,2%	24,1	24,6	2,3%	1,0	1,0	0,1%
3,7	1,2	98	100	2,1%	3,7	3,8	2,8%	24,6	25,2	2,7%	1,0	1,1	0,7%
5,0	1,1	99	100	0,9%	3,8	3,9	2,0%	25,3	25,7	1,8%	1,1	1,1	1,1%
18,9	0,1	100	100	0,1%	4,3	4,4	1,6%	28,6	29,1	1,6%	1,2	1,2	1,7%
21,3	0,1	100	100	0,1%	4,4	4,4	1,8%	29,0	29,4	1,7%	1,2	1,2	1,9%
34,6	0,1	100	100	0,2%	4,6	4,6	1,0%	30,5	30,8	1,0%	1,3	1,3	1,2%
58,0	0,1	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,2%	31,9	32,0	0,2%	1,3	1,3	0,3%
102,7	0,0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,3%	32,8	32,8	0,1%	1,4	1,4	0,2%
		∅		1,6%	∅		1,9%	∅		1,8%	∅		0,8%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	2,5%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	0,1%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	1,1%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	7,1%	1,9	0,3	0,3
0,9	0,7	0,3	0,3	4,0%	12,5	0,3	0,3
1,1	1,2	0,3	0,3	0,5%	12,6	0,4	0,7
1,7	1,8	0,5	0,5	3,8%	17,9	0,6	1,0
2,4	1,7	0,7	0,6	3,8%	15,4	2,4	1,3
3,7	1,2	1,0	1,0	1,8%	19,3	4,9	2,0
5,0	1,1	1,3	1,3	3,9%	23,6	6,1	2,7
18,9	0,1	4,4	4,3	1,3%	26,6	11,9	8,8
21,3	0,1	4,9	4,8	1,0%	29,5	13,0	9,8
34,6	0,1	7,5	7,5	0,3%	36,3	15,2	15,1
58,0	0,1	12,1	12,1	0,3%	40,5	23,5	24,3
102,7	0,0	20,9	20,8	0,3%	48,6	40,5	41,9
		∅		2,1%			

Abbildung A-49. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 41

Parameter Versuchsreihe 42Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=6$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	11	5,1%	0,4	0,4	4,5%	2,6	2,7	4,2%	1,0	1,0	0,6%
0,3	1,5	30	30	1,8%	1,1	1,1	0,9%	7,3	7,4	1,0%	1,0	1,0	0,8%
0,5	1,0	50	50	0,9%	1,8	1,8	0,2%	12,2	12,2	0,1%	1,0	1,0	0,6%
0,8	0,5	80	76	5,6%	3,0	2,8	6,2%	19,6	18,4	6,3%	1,0	1,0	0,7%
0,9	0,8	85	84	1,4%	3,1	3,1	2,3%	20,9	20,4	2,3%	1,0	1,0	0,9%
1,1	1,4	90	91	0,6%	3,3	3,3	0,1%	22,1	22,1	0,2%	1,0	1,0	0,7%
1,6	2,1	95	97	1,6%	3,5	3,6	1,5%	23,3	23,6	1,3%	1,0	1,0	0,1%
2,1	2,0	97	99	1,5%	3,6	3,7	1,9%	23,9	24,3	2,0%	1,0	1,0	0,3%
3,0	1,6	98	100	1,8%	3,7	3,7	2,7%	24,3	24,9	2,7%	1,0	1,0	0,9%
5,4	1,2	99	100	0,8%	3,8	3,9	2,7%	25,1	25,8	2,7%	1,1	1,1	1,8%
16,9	0,5	100	100	0,2%	4,0	4,1	1,8%	26,8	27,2	1,7%	1,1	1,1	2,0%
21,1	0,6	100	100	0,5%	4,0	4,1	1,8%	26,8	27,2	1,7%	1,1	1,1	2,3%
39,7	0,6	101	100	0,7%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,1%	1,1	1,1	2,0%
61,2	0,6	101	100	1,0%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,3%	1,1	1,1	2,3%
94,6	0,4	101	100	0,8%	4,1	4,1	1,0%	27,0	27,2	0,8%	1,1	1,1	1,9%
		∅		1,6%	∅		2,0%	∅		2,0%	∅		1,2%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	2,5%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	0,2%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	1,2%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	8,3%	0,9	0,3	0,3
0,9	0,8	0,3	0,3	2,2%	5,0	0,3	0,3
1,1	1,4	0,4	0,3	1,8%	10,3	0,4	0,7
1,6	2,1	0,5	0,4	2,7%	13,6	0,5	0,9
2,1	2,0	0,6	0,6	0,6%	22,2	0,9	1,2
3,0	1,6	0,8	0,8	5,3%	15,4	2,1	1,7
5,4	1,2	1,4	1,4	1,8%	14,4	5,0	2,8
16,9	0,5	4,1	4,1	0,6%	22,6	9,9	6,7
21,1	0,6	5,0	5,2	3,3%	26,7	12,1	7,7
39,7	0,6	9,3	9,7	4,6%	25,6	19,9	12,3
61,2	0,6	14,4	15,0	4,2%	35,2	31,0	17,5
94,6	0,4	22,6	23,1	2,3%	42,6	38,4	25,7
		∅		2,8%			

Abbildung A-50. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 42

Parameter Versuchsreihe 43

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=7$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,7	12	12	5,1%	0,4	0,4	14,2%	2,6	3,0	14,0%	0,9	1,0	8,7%
0,3	1,5	30	31	1,6%	1,0	1,1	10,2%	6,7	7,4	10,3%	0,9	1,0	8,5%
0,5	1,0	50	50	1,4%	1,7	1,8	10,0%	11,1	12,2	10,1%	0,9	1,0	8,4%
0,8	0,7	81	78	3,6%	2,7	2,8	4,7%	18,0	18,8	4,5%	0,9	1,0	8,7%
1,0	0,9	86	85	0,5%	2,9	3,1	7,7%	19,1	20,6	7,7%	0,9	1,0	8,2%
1,2	1,4	90	92	1,5%	3,1	3,4	9,9%	20,3	22,3	10,0%	0,9	1,0	8,3%
1,9	1,8	95	97	2,9%	3,2	3,6	11,7%	21,4	23,9	11,8%	0,9	1,0	8,5%
3,3	1,4	97	100	2,7%	3,4	3,8	11,2%	22,5	25,0	11,3%	1,0	1,0	8,3%
3,8	1,4	98	100	2,1%	3,4	3,8	11,0%	22,8	25,2	10,9%	1,0	1,1	8,7%
6,5	1,1	99	100	0,9%	3,6	3,9	9,2%	24,0	26,2	9,3%	1,0	1,1	8,2%
23,8	0,1	100	100	0,1%	4,4	4,5	2,7%	29,0	29,8	2,6%	1,2	1,2	2,7%
24,4	0,1	100	100	0,1%	4,4	4,5	2,5%	29,1	29,8	2,4%	1,2	1,2	2,6%
34,1	0,1	100	100	0,1%	4,6	4,6	1,4%	30,4	30,8	1,3%	1,3	1,3	1,5%
58,5	0,1	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,5%	31,9	32,0	0,3%	1,3	1,3	0,5%
102,7	0,0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,3%	32,8	32,8	0,1%	1,4	1,4	0,2%
		∅		1,5%	∅		7,1%	∅		7,1%	∅		6,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,7	0,3	0,3	7,9%	0,4	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	10,1%	0,4	0,4	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	9,0%	0,4	0,4	0,3
0,8	0,7	0,3	0,3	4,3%	9,2	0,4	0,3
1,0	0,9	0,3	0,3	7,0%	8,8	0,4	0,3
1,2	1,4	0,4	0,4	8,3%	12,7	0,5	0,8
1,9	1,8	0,6	0,5	11,3%	23,0	1,2	1,1
3,3	1,4	1,0	0,9	8,8%	21,3	4,7	1,8
3,8	1,4	1,1	1,0	10,3%	26,2	5,7	2,1
6,5	1,1	1,8	1,7	10,1%	25,6	8,1	3,4
23,8	0,1	5,4	5,3	2,2%	33,7	13,5	10,8
24,4	0,1	5,5	5,4	2,0%	29,8	13,8	11,1
34,1	0,1	7,4	7,4	0,8%	38,1	16,1	14,9
58,5	0,1	12,2	12,1	0,4%	41,2	23,5	24,5
102,7	0,0	20,9	20,8	0,3%	48,6	40,4	41,9
			∅	6,2%			

Abbildung A-51. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 43

Parameter Versuchsreihe 44Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=9$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,7	12	12	5,1%	0,4	0,4	14,2%	2,6	3,0	14,0%	0,9	1,0	8,7%
0,3	1,5	30	31	1,5%	1,0	1,1	10,1%	6,7	7,4	10,3%	0,9	1,0	8,5%
0,5	1,0	50	50	1,1%	1,7	1,8	9,6%	11,1	12,2	9,8%	0,9	1,0	8,4%
0,9	0,7	81	77	4,7%	2,7	2,8	3,5%	18,0	18,6	3,3%	0,9	1,0	8,6%
1,0	1,1	86	84	2,1%	2,9	3,0	6,2%	19,1	20,3	6,0%	0,9	1,0	8,5%
1,3	1,8	90	91	0,8%	3,0	3,3	9,4%	20,3	22,1	9,3%	0,9	1,0	8,6%
1,7	2,2	95	95	0,4%	3,2	3,5	9,4%	21,3	23,4	9,4%	0,9	1,0	9,0%
2,3	2,1	97	98	0,8%	3,3	3,6	10,4%	21,9	24,2	10,3%	0,9	1,0	9,6%
3,5	1,5	98	99	1,8%	3,4	3,8	11,6%	22,4	25,0	11,5%	1,0	1,0	9,7%
6,1	1,1	99	100	0,8%	3,5	3,9	10,5%	23,6	26,0	10,5%	1,0	1,1	9,6%
21,6	0,3	100	100	0,2%	4,0	4,1	3,3%	26,4	27,2	3,3%	1,1	1,1	3,5%
24,8	0,3	100	100	0,3%	4,0	4,1	3,1%	26,5	27,2	2,9%	1,1	1,1	3,4%
38,3	0,3	100	100	0,4%	4,0	4,1	2,3%	26,7	27,2	2,1%	1,1	1,1	2,7%
61,4	0,5	101	100	0,7%	4,0	4,1	1,8%	26,8	27,2	1,7%	1,1	1,1	2,5%
94,4	0,3	101	100	0,6%	4,1	4,1	1,0%	26,9	27,2	1,1%	1,1	1,1	1,6%
		∅		1,4%	∅		7,1%	∅		7,0%	∅		6,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,7	0,3	0,3	7,9%	0,4	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	10,1%	0,4	0,4	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	8,7%	0,4	0,4	0,3
0,9	0,7	0,3	0,3	2,2%	4,0	0,4	0,3
1,0	1,1	0,3	0,3	5,4%	10,7	0,4	0,3
1,3	1,8	0,4	0,4	6,9%	12,8	0,4	0,8
1,7	2,2	0,5	0,5	9,3%	15,8	0,7	1,0
2,3	2,1	0,7	0,6	10,3%	16,9	1,4	1,3
3,5	1,5	1,0	0,9	6,2%	13,8	2,9	1,9
6,1	1,1	1,7	1,5	9,7%	20,0	6,3	3,2
21,6	0,3	5,4	5,3	2,4%	25,6	11,1	7,9
24,8	0,3	6,1	6,1	0,4%	22,7	11,9	8,6
38,3	0,3	9,4	9,4	0,1%	27,5	16,8	11,9
61,4	0,5	14,7	15,0	1,8%	33,8	29,1	17,6
94,4	0,3	22,8	23,1	1,2%	42,3	36,8	25,6
			∅	5,5%			

Abbildung A-52. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 44

Parameter Versuchsreihe 45

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=8$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	0,0%	0,4	0,4	3,5%	2,7	2,6	3,5%	1,1	1,0	3,5%
0,3	1,5	30	31	2,7%	1,1	1,1	1,1%	7,8	7,7	1,0%	1,1	1,0	3,7%
0,5	1,0	50	51	2,0%	1,9	1,9	1,7%	12,9	12,7	1,7%	1,1	1,0	3,6%
0,8	0,5	80	75	6,5%	3,0	2,8	9,4%	20,8	18,8	9,5%	1,1	1,0	3,1%
0,9	0,5	85	81	4,8%	3,2	3,0	7,8%	22,2	20,5	7,7%	1,1	1,0	3,2%
1,2	0,8	90	90	0,0%	3,4	3,4	1,2%	23,5	23,2	1,3%	1,1	1,1	1,3%
1,6	1,3	95	95	0,6%	3,6	3,7	1,6%	24,8	25,2	1,5%	1,1	1,1	0,9%
2,3	1,4	97	98	1,2%	3,7	3,9	4,7%	25,5	26,7	4,6%	1,1	1,1	3,4%
2,7	1,1	98	99	1,0%	3,8	4,0	5,5%	25,9	27,4	5,5%	1,1	1,2	4,4%
5,1	0,8	99	100	0,7%	4,0	4,3	6,7%	27,3	29,1	6,7%	1,1	1,2	6,0%
14,5	0,2	100	100	0,0%	4,4	4,6	4,5%	30,2	31,5	4,3%	1,3	1,3	4,5%
15,7	0,2	100	100	0,1%	4,4	4,6	4,4%	30,4	31,7	4,3%	1,3	1,3	4,5%
31,1	0,1	100	100	0,1%	4,7	4,8	2,3%	32,0	32,7	2,3%	1,3	1,4	2,4%
55,4	0,1	100	100	0,0%	4,8	4,9	1,5%	32,9	33,3	1,3%	1,4	1,4	1,5%
101,6	0,0	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,7%	33,6	33,8	0,7%	1,4	1,4	0,7%
		∅		1,3%	∅		3,8%	∅		3,7%	∅		3,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,6%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	9,7%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	4,3%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	9,5%	0,5	0,3	0,3
0,9	0,5	0,3	0,3	7,5%	15,0	0,3	0,3
1,2	0,8	0,3	0,3	2,4%	63,0	0,5	0,9
1,6	1,3	0,4	0,4	0,6%	63,4	0,6	1,1
2,3	1,4	0,6	0,6	6,7%	63,2	1,3	1,5
2,7	1,1	0,7	0,7	2,6%	60,3	1,9	1,7
5,1	0,8	1,2	1,2	1,0%	52,9	4,7	3,0
14,5	0,2	3,2	3,1	2,6%	86,5	13,3	8,1
15,7	0,2	3,4	3,4	1,5%	91,7	14,0	8,7
31,1	0,1	6,6	6,5	0,7%	143,8	25,5	16,8
55,4	0,1	11,5	11,4	1,0%	190,1	43,2	29,3
101,6	0,0	20,5	20,5	0,4%	387,0	87,2	53,0
		∅		4,0%			

Abbildung A-53. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 45

Parameter Versuchsreihe 46

Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=11$) Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	0,0%	0,4	0,4	3,5%	2,7	2,6	3,5%	1,1	1,0	3,5%
0,3	1,5	30	31	2,7%	1,1	1,1	1,2%	7,8	7,7	1,0%	1,1	1,0	3,7%
0,5	1,0	50	51	1,5%	1,9	1,8	2,2%	12,9	12,7	2,1%	1,1	1,0	3,6%
0,8	0,5	80	73	9,1%	3,0	2,7	11,8%	20,8	18,3	11,9%	1,1	1,0	3,0%
0,9	0,5	85	79	7,2%	3,2	2,9	10,0%	22,2	19,9	10,0%	1,1	1,0	3,1%
1,3	1,0	90	91	0,6%	3,4	3,4	0,3%	23,5	23,5	0,3%	1,1	1,1	0,3%
1,8	1,2	95	95	0,1%	3,6	3,7	1,6%	24,8	25,2	1,5%	1,1	1,1	1,6%
2,3	1,4	97	97	0,1%	3,7	3,9	4,1%	25,4	26,4	4,0%	1,1	1,1	4,0%
2,8	1,2	98	98	0,6%	3,8	4,0	4,9%	26,0	27,3	5,0%	1,1	1,2	4,3%
4,0	1,0	99	99	0,2%	4,0	4,2	4,6%	27,2	28,5	4,6%	1,1	1,2	4,3%
12,9	0,4	100	100	0,1%	4,4	4,5	2,8%	30,0	30,8	2,8%	1,2	1,3	2,9%
17,7	0,4	100	100	0,4%	4,4	4,5	3,1%	30,0	30,8	2,9%	1,2	1,3	3,5%
35,3	0,5	101	100	1,0%	4,4	4,5	2,8%	30,0	30,8	2,8%	1,2	1,3	3,8%
60,1	0,2	101	100	0,8%	4,4	4,5	2,6%	30,1	30,8	2,5%	1,2	1,3	3,4%
99,6	0,2	101	100	0,9%	4,4	4,5	2,1%	30,2	30,8	2,0%	1,2	1,3	3,1%
		∅		1,7%	∅		3,8%	∅		3,8%	∅		3,2%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,6%	0,4	0,1	3,0
0,3	1,5	0,3	0,3	9,7%	0,4	0,3	1,5
0,5	1,0	0,3	0,3	4,8%	0,4	0,5	1,0
0,8	0,5	0,3	0,3	12,3%	0,5	0,8	0,5
0,9	0,5	0,3	0,3	10,3%	15,0	0,9	0,5
1,3	1,0	0,4	0,4	4,5%	162,2	1,3	1,0
1,8	1,2	0,5	0,5	1,1%	161,6	1,8	1,2
2,3	1,4	0,5	0,6	12,5%	17,7	2,3	1,4
2,8	1,2	0,7	0,7	8,0%	17,1	2,8	1,2
4,0	1,0	1,0	1,0	2,7%	56,2	4,0	1,0
12,9	0,4	2,9	2,9	0,4%	22,0	12,9	0,4
17,7	0,4	3,8	3,9	4,8%	52,8	17,7	0,4
35,3	0,5	7,4	7,8	6,4%	43,2	35,3	0,5
60,1	0,2	13,1	13,3	1,7%	52,8	60,1	0,2
99,6	0,2	21,8	22,1	1,2%	73,6	99,6	0,2
		∅		6,0%			

Abbildung A-54. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 46

Parameter Versuchsreihe 47
 Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=10$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	11	4,8%	0,4	0,4	6,8%	2,7	2,9	6,8%	1,0	1,0	2,0%
0,3	1,5	30	31	3,2%	1,1	1,1	5,0%	7,4	7,8	5,0%	1,0	1,0	1,8%
0,5	1,0	50	51	2,4%	1,8	1,9	4,1%	12,2	12,8	4,3%	1,0	1,0	1,7%
0,8	0,5	80	75	7,2%	2,9	2,7	5,1%	19,8	18,8	5,1%	1,0	1,0	2,2%
0,9	0,6	85	82	4,0%	3,1	3,0	1,5%	21,0	20,7	1,6%	1,0	1,1	2,6%
1,3	0,9	90	91	1,0%	3,3	3,4	6,1%	22,3	23,6	5,9%	1,0	1,1	5,1%
1,7	1,3	95	95	0,1%	3,4	3,7	6,1%	23,5	25,0	6,2%	1,0	1,1	6,3%
2,3	1,4	97	98	0,6%	3,5	3,9	10,0%	24,3	26,7	9,9%	1,0	1,1	9,4%
3,7	1,0	98	99	1,8%	3,7	4,1	12,2%	25,3	28,3	12,1%	1,1	1,2	10,1%
5,6	0,8	99	100	0,7%	3,9	4,3	11,6%	26,3	29,4	11,6%	1,1	1,2	10,8%
16,8	0,2	100	100	0,0%	4,4	4,6	5,8%	30,0	31,8	5,8%	1,3	1,3	5,8%
18,3	0,2	100	100	0,0%	4,4	4,7	5,3%	30,4	31,9	5,1%	1,3	1,3	5,3%
31,7	0,2	100	100	0,1%	4,6	4,8	3,9%	31,5	32,7	3,8%	1,3	1,4	4,0%
55,2	0,1	100	100	0,0%	4,8	4,9	2,6%	32,5	33,3	2,5%	1,4	1,4	2,6%
100,1	0,1	100	100	0,1%	4,9	4,9	1,5%	33,4	33,8	1,3%	1,4	1,4	1,4%
		∅		1,7%	∅		3,8%	∅		3,8%	∅		3,2%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	1,4%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	1,8%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	3,5%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	7,2%	1,9	0,4	0,3
0,9	0,6	0,3	0,3	0,2%	16,0	0,4	0,3
1,3	0,9	0,4	0,4	2,6%	42,1	0,5	1,0
1,7	1,3	0,5	0,5	6,0%	49,3	0,7	1,2
2,3	1,4	0,6	0,6	4,7%	63,3	1,1	1,5
3,7	1,0	1,0	0,9	10,2%	40,6	3,7	2,3
5,6	0,8	1,4	1,3	4,3%	58,1	5,3	3,3
16,8	0,2	3,7	3,6	2,5%	99,1	14,2	9,3
18,3	0,2	4,0	3,9	2,6%	99,1	15,4	10,1
31,7	0,2	6,9	6,6	3,3%	160,5	27,1	17,1
55,2	0,1	11,5	11,3	1,6%	265,2	46,0	29,2
100,1	0,1	20,3	20,2	0,4%	362,6	82,0	52,2
			∅	3,5%			

Abbildung A-55. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 47

Parameter Versuchsreihe 48Bestandsstreuung: **gering** ($\alpha_1=10$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	11	4,8%	0,4	0,4	6,8%	2,7	2,9	6,8%	1,0	1,0	2,0%
0,3	1,5	30	31	3,2%	1,1	1,1	5,0%	7,4	7,8	5,0%	1,0	1,0	1,8%
0,5	1,0	50	51	2,4%	1,8	1,9	4,1%	12,2	12,8	4,3%	1,0	1,0	1,7%
0,8	0,5	81	75	7,2%	2,9	2,7	5,1%	19,8	18,8	5,1%	1,0	1,0	2,3%
0,9	0,6	85	82	4,0%	3,1	3,0	1,5%	21,0	20,7	1,6%	1,0	1,1	2,7%
1,5	1,1	90	94	3,7%	3,3	3,6	10,3%	22,3	24,5	10,2%	1,0	1,1	6,4%
1,7	1,5	95	95	0,1%	3,4	3,7	6,3%	23,5	25,0	6,3%	1,0	1,1	6,4%
2,5	1,4	97	98	0,8%	3,6	3,9	10,7%	24,3	26,9	10,7%	1,0	1,1	9,8%
3,2	1,3	98	99	1,4%	3,6	4,1	11,8%	24,9	27,9	11,8%	1,1	1,2	10,3%
4,6	1,1	99	100	0,7%	3,8	4,2	10,2%	26,3	28,9	10,2%	1,1	1,2	9,4%
17,5	0,4	100	100	0,3%	4,3	4,5	5,2%	29,3	30,8	5,1%	1,2	1,3	5,6%
22,4	0,6	101	100	0,9%	4,3	4,5	5,7%	29,2	30,8	5,6%	1,2	1,3	6,7%
37,5	0,5	101	100	1,0%	4,3	4,5	5,2%	29,3	30,8	5,1%	1,2	1,3	6,3%
62,5	0,2	101	100	0,8%	4,3	4,5	4,8%	29,5	30,8	4,6%	1,2	1,3	5,6%
100,6	0,4	101	100	1,1%	4,3	4,5	4,3%	29,6	30,8	4,3%	1,2	1,3	5,4%
		∅		2,2%	∅		6,5%	∅		6,5%	∅		5,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	1,4%	0,4	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	1,8%	0,4	0,3	0,3
0,5	1,0	0,3	0,3	3,5%	0,4	0,3	0,3
0,8	0,5	0,3	0,3	7,2%	0,9	0,4	0,3
0,9	0,6	0,3	0,3	0,2%	15,9	0,4	0,7
1,5	1,1	0,4	0,4	17,0%	8,9	0,6	1,1
1,7	1,5	0,5	0,5	7,5%	15,6	0,9	1,2
2,5	1,4	0,6	0,6	3,4%	16,1	1,1	1,6
3,2	1,3	0,8	0,8	1,2%	17,6	2,0	2,0
4,6	1,1	1,2	1,1	8,1%	59,3	3,6	2,8
17,5	0,4	3,9	3,9	0,5%	25,0	8,8	7,4
22,4	0,6	4,7	5,0	6,1%	36,6	10,9	8,5
37,5	0,5	8,1	8,3	3,0%	46,6	16,8	11,8
62,5	0,2	13,9	13,9	0,4%	55,1	23,1	17,4
100,6	0,4	22,4	22,3	0,1%	94,8	42,5	25,8
		∅		4,1%			

Abbildung A-56. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 48

Parameter Versuchsreihe 49

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=23$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	3,3%	0,4	0,4	3,1%	2,7	2,7	2,0%	1,1	1,1	0,2%
0,3	1,6	30	31	4,3%	1,2	1,2	3,5%	7,8	8,1	3,1%	1,1	1,1	0,8%
0,5	1,1	50	53	7,6%	2,0	2,1	6,2%	13,2	14,0	6,3%	1,1	1,1	1,3%
1,1	0,7	80	82	1,8%	3,3	3,3	1,2%	21,4	21,6	1,1%	1,1	1,1	0,6%
1,3	0,7	85	86	0,7%	3,5	3,5	1,3%	22,9	23,2	1,3%	1,1	1,1	0,6%
1,7	0,7	90	90	0,1%	3,7	3,8	2,1%	24,4	24,9	2,1%	1,1	1,2	2,1%
2,2	0,6	94	93	1,5%	4,0	4,1	1,8%	26,1	26,6	1,7%	1,2	1,2	3,4%
2,7	0,6	97	95	1,6%	4,2	4,3	2,2%	27,3	27,9	2,2%	1,2	1,2	3,9%
3,8	0,7	98	97	0,8%	4,4	4,5	3,7%	28,5	29,6	3,7%	1,2	1,3	4,5%
5,4	0,6	99	99	0,6%	4,5	4,7	3,3%	29,8	30,7	3,3%	1,2	1,3	3,9%
6,9	0,7	100	99	0,7%	4,7	4,8	2,4%	30,7	31,4	2,3%	1,3	1,3	3,0%
8,2	0,6	100	100	0,4%	4,8	4,9	1,9%	31,2	31,8	1,9%	1,3	1,3	2,3%
24,5	0,5	100	100	0,1%	5,0	5,0	1,1%	32,6	32,9	1,0%	1,4	1,4	1,0%
51,1	0,3	100	100	0,1%	5,1	5,1	0,1%	33,2	33,2	0,2%	1,4	1,4	0,1%
96,2	0,3	100	100	0,1%	5,1	5,1	0,1%	33,3	33,3	0,1%	1,4	1,4	0,2%
		∅		1,6%	∅		2,3%	∅		2,2%	∅		1,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,2%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,2	2,6%	0,6	0,3	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	1,3%	1,1	0,4	0,3
1,1	0,7	0,3	0,3	0,2%	1,6	0,6	0,9
1,3	0,7	0,4	0,4	0,3%	2,2	0,8	1,0
1,7	0,7	0,4	0,4	0,5%	2,9	1,0	1,1
2,2	0,6	0,6	0,5	2,8%	3,1	1,2	1,3
2,7	0,6	0,7	0,6	4,1%	4,6	1,6	1,5
3,8	0,7	0,9	0,9	5,4%	6,2	2,3	1,9
5,4	0,6	1,2	1,1	4,5%	6,5	3,2	2,5
6,9	0,7	1,5	1,4	3,5%	11,8	3,7	3,1
8,2	0,6	1,7	1,7	1,7%	13,6	4,3	3,6
24,5	0,5	5,0	4,9	2,5%	22,5	13,8	9,9
51,1	0,3	10,2	10,1	0,9%	33,0	23,3	20,4
96,2	0,3	18,8	18,9	0,4%	56,1	42,5	38,0
				∅			2,7%

Abbildung A-57. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 49

Parameter Versuchsreihe 50Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=23$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	3,3%	0,4	0,4	3,1%	2,7	2,7	2,0%	1,1	1,1	0,2%
0,3	1,6	30	31	4,4%	1,2	1,2	3,5%	7,8	8,1	3,1%	1,1	1,1	0,8%
0,5	1,1	50	53	7,6%	2,0	2,1	6,2%	13,2	14,0	6,3%	1,1	1,1	1,3%
1,1	0,7	80	82	1,8%	3,3	3,3	1,2%	21,4	21,6	1,1%	1,1	1,1	0,6%
1,3	0,7	85	86	0,7%	3,5	3,5	1,3%	22,9	23,2	1,4%	1,1	1,1	0,6%
1,7	0,7	90	90	0,2%	3,7	3,8	2,4%	24,4	25,0	2,5%	1,1	1,2	2,2%
2,2	0,6	94	93	1,4%	4,0	4,1	2,3%	26,1	26,7	2,3%	1,2	1,2	3,7%
2,8	0,6	96	95	1,5%	4,1	4,3	2,8%	27,2	27,9	2,7%	1,2	1,2	4,4%
3,6	0,6	98	97	1,1%	4,3	4,5	3,9%	28,2	29,2	3,8%	1,2	1,3	5,0%
6,1	0,7	99	99	0,3%	4,5	4,7	4,8%	29,7	31,1	4,7%	1,2	1,3	5,0%
7,3	0,7	100	99	0,5%	4,7	4,8	3,5%	30,5	31,5	3,3%	1,3	1,3	4,0%
9,3	0,7	100	100	0,3%	4,7	4,9	3,4%	31,0	32,0	3,3%	1,3	1,3	3,7%
25,5	0,6	100	100	0,2%	4,9	4,9	1,3%	31,8	32,2	1,2%	1,3	1,3	1,1%
50,5	0,5	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,5%	32,1	32,2	0,4%	1,3	1,3	0,5%
94,4	0,3	100	100	0,2%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,2%
		∅		1,6%	∅		2,7%	∅		2,5%	∅		2,2%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,2%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,2	2,6%	0,7	0,3	0,2
0,5	1,1	0,3	0,3	1,3%	1,0	0,4	0,3
1,1	0,7	0,3	0,3	0,2%	1,8	0,6	0,9
1,3	0,7	0,4	0,4	0,3%	2,1	0,8	1,0
1,7	0,7	0,5	0,4	0,9%	2,9	1,0	1,1
2,2	0,6	0,6	0,5	1,4%	3,4	1,3	1,3
2,8	0,6	0,7	0,6	3,8%	5,2	1,6	1,5
3,6	0,6	0,8	0,8	5,2%	5,8	2,1	1,8
6,1	0,7	1,4	1,3	5,7%	10,4	3,9	2,8
7,3	0,7	1,6	1,5	3,8%	9,1	4,6	3,2
9,3	0,7	2,0	1,9	2,8%	9,6	5,3	4,0
25,5	0,6	5,4	5,2	3,6%	13,7	10,9	7,4
50,5	0,5	10,3	10,3	0,6%	23,5	19,4	12,5
94,4	0,3	19,1	19,2	0,6%	32,7	29,0	21,5
			∅	2,8%			

Abbildung A-58. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 50

Parameter Versuchsreihe 51

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=22$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	5,0%	0,4	0,4	10,2%	2,5	2,7	9,8%	1,0	1,1	5,0%
0,3	1,6	30	31	5,8%	1,1	1,2	10,6%	7,4	8,2	10,8%	1,0	1,1	4,5%
0,5	1,1	50	54	8,4%	1,9	2,2	13,4%	12,5	14,1	13,4%	1,0	1,1	4,6%
1,1	0,7	80	83	3,0%	3,1	3,4	8,1%	20,3	22,0	8,0%	1,1	1,1	4,9%
1,4	0,7	85	86	1,5%	3,3	3,6	7,4%	21,8	23,4	7,5%	1,1	1,1	5,8%
1,6	0,6	90	90	0,0%	3,6	3,8	6,6%	23,3	24,8	6,7%	1,1	1,2	6,5%
2,1	0,6	94	93	1,9%	3,8	4,0	5,1%	25,1	26,3	5,0%	1,1	1,2	7,2%
2,7	0,6	97	95	1,6%	4,0	4,2	5,4%	26,4	27,8	5,2%	1,1	1,2	7,1%
4,1	0,7	98	98	0,7%	4,3	4,5	5,6%	28,2	29,8	5,6%	1,2	1,3	6,3%
4,4	0,6	99	98	1,2%	4,4	4,6	4,0%	28,9	30,1	4,0%	1,2	1,3	5,3%
5,9	0,8	100	99	0,9%	4,6	4,7	3,2%	30,1	31,1	3,2%	1,3	1,3	4,2%
7,5	0,6	100	100	0,5%	4,7	4,8	2,3%	31,0	31,7	2,3%	1,3	1,3	2,8%
24,4	0,6	100	100	0,1%	5,0	5,0	1,1%	32,6	32,9	1,0%	1,4	1,4	1,0%
51,1	0,3	100	100	0,1%	5,1	5,1	0,1%	33,2	33,2	0,2%	1,4	1,4	0,1%
96,2	0,3	100	100	0,1%	5,1	5,1	0,1%	33,3	33,3	0,1%	1,4	1,4	0,2%
		∅		2,1%	∅		5,6%	∅		5,5%	∅		4,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	4,9%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,0%	0,7	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	2,0%	1,2	0,4	0,3
1,1	0,7	0,4	0,3	5,5%	1,6	0,7	0,9
1,4	0,7	0,4	0,4	5,4%	2,0	0,8	1,0
1,6	0,6	0,5	0,4	4,3%	2,2	1,0	1,1
2,1	0,6	0,5	0,5	5,2%	3,4	1,1	1,2
2,7	0,6	0,7	0,6	6,9%	4,1	1,5	1,5
4,1	0,7	1,0	0,9	7,7%	6,3	2,5	2,0
4,4	0,6	1,0	1,0	4,9%	6,1	2,5	2,1
5,9	0,8	1,3	1,2	4,7%	12,8	3,2	2,7
7,5	0,6	1,6	1,6	2,4%	12,1	3,9	3,3
24,4	0,6	5,0	4,9	2,7%	20,4	13,6	9,9
51,1	0,3	10,2	10,1	1,0%	33,0	23,3	20,4
96,2	0,3	18,8	18,9	0,4%	55,7	42,5	38,0
			∅	3,9%			

Abbildung A-59. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 51

Parameter Versuchsreihe 52Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=24$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	5,0%	0,4	0,4	10,2%	2,5	2,7	9,8%	1,0	1,1	5,0%
0,3	1,6	30	31	5,9%	1,1	1,2	10,6%	7,4	8,2	10,8%	1,0	1,1	4,4%
0,5	1,1	50	54	8,2%	1,9	2,2	13,2%	12,5	14,1	13,2%	1,0	1,1	4,6%
1,2	0,7	80	82	2,7%	3,1	3,3	8,0%	20,3	21,9	8,1%	1,1	1,1	5,1%
1,4	0,7	85	86	1,1%	3,3	3,6	7,7%	21,7	23,4	7,6%	1,1	1,1	6,5%
1,7	0,7	90	90	0,1%	3,5	3,8	7,4%	23,2	24,9	7,4%	1,1	1,2	7,5%
2,2	0,6	94	92	2,0%	3,8	4,0	6,4%	24,9	26,4	6,2%	1,1	1,2	8,6%
2,8	0,6	96	95	1,7%	4,0	4,2	6,8%	26,1	27,9	6,7%	1,1	1,2	8,6%
3,9	0,6	98	97	1,1%	4,2	4,5	7,3%	27,6	29,5	7,2%	1,2	1,3	8,5%
4,8	0,6	99	98	1,1%	4,4	4,6	6,2%	28,5	30,3	6,2%	1,2	1,3	7,5%
7,0	0,7	100	99	0,7%	4,6	4,8	5,2%	29,9	31,4	5,1%	1,2	1,3	5,9%
8,9	0,7	100	100	0,4%	4,7	4,9	4,3%	30,6	31,9	4,3%	1,3	1,3	4,7%
25,9	0,6	100	100	0,2%	4,8	4,9	1,5%	31,8	32,2	1,4%	1,3	1,3	1,3%
50,8	0,5	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,5%	32,1	32,2	0,4%	1,3	1,3	0,5%
94,4	0,3	100	100	0,2%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,2%
		∅		2,0%	∅		6,3%	∅		6,3%	∅		5,3%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]			ZDL _{95%} [BKT]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	0,3	0,3	4,9%	0,6	0,3	56,7%	0,3	0,3	21,5%
0,3	1,6	0,3	0,3	1,0%	0,7	0,3	59,9%	0,4	0,3	25,2%
0,5	1,1	0,3	0,3	2,1%	0,9	0,3	69,2%	0,4	0,3	35,7%
1,2	0,7	0,4	0,3	6,4%	2,3	1,0	58,5%	0,7	1,0	34,2%
1,4	0,7	0,4	0,4	5,7%	2,2	1,0	53,1%	0,8	1,0	21,4%
1,7	0,7	0,5	0,4	4,9%	2,3	1,1	52,4%	1,0	1,1	8,8%
2,2	0,6	0,6	0,5	6,7%	3,5	1,3	63,4%	1,2	1,3	3,9%
2,8	0,6	0,7	0,6	7,5%	4,8	1,5	68,7%	1,6	1,5	7,0%
3,9	0,6	0,9	0,9	8,7%	7,0	1,9	72,3%	2,3	1,9	17,1%
4,8	0,6	1,1	1,0	6,7%	6,5	2,3	65,1%	2,8	2,3	19,4%
7,0	0,7	1,6	1,5	7,1%	8,8	3,1	64,6%	4,4	3,1	28,9%
8,9	0,7	1,9	1,8	4,5%	9,7	3,9	60,2%	5,1	3,9	25,0%
25,9	0,6	5,5	5,3	3,7%	14,5	7,5	48,1%	11,5	7,5	34,5%
50,8	0,5	10,4	10,3	0,6%	23,3	12,6	45,9%	19,2	12,6	34,5%
94,4	0,3	19,1	19,2	0,6%	32,7	21,5	34,3%	29,0	21,5	26,1%
		∅		4,7%	∅		58,2%	∅		22,9%

Abbildung A-60. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 52

Parameter Versuchsreihe 53

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=29$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	4,0%	0,5	0,4	4,1%	3,1	3,0	4,0%	1,3	1,2	7,8%
0,3	1,6	29	31	4,8%	1,3	1,3	3,2%	9,2	8,9	3,3%	1,3	1,2	7,7%
0,5	1,1	50	53	7,0%	2,3	2,3	2,0%	15,6	15,9	2,1%	1,3	1,2	4,8%
1,1	0,7	80	80	0,1%	3,6	3,7	1,4%	25,2	25,5	1,4%	1,3	1,3	1,3%
1,4	0,7	85	84	1,1%	3,9	3,9	1,0%	26,9	27,1	1,0%	1,3	1,3	2,1%
1,9	0,7	90	90	0,3%	4,1	4,2	2,6%	28,6	29,3	2,6%	1,3	1,4	2,9%
3,1	0,9	94	95	0,3%	4,4	4,6	3,6%	30,4	31,5	3,6%	1,3	1,4	3,3%
4,2	0,9	97	97	0,3%	4,5	4,7	3,7%	31,5	32,6	3,5%	1,4	1,4	3,4%
4,7	0,8	98	97	0,4%	4,6	4,8	2,6%	32,1	32,9	2,5%	1,4	1,4	3,0%
8,2	0,9	99	99	0,3%	4,8	4,9	3,1%	32,9	33,9	3,0%	1,4	1,4	2,7%
15,8	1,0	100	100	0,2%	4,9	5,0	2,1%	33,7	34,3	2,0%	1,4	1,4	1,9%
17,1	1,0	100	100	0,1%	4,9	5,0	2,0%	33,8	34,4	1,8%	1,4	1,4	1,9%
24,2	0,6	100	100	0,1%	4,9	5,0	0,9%	34,2	34,5	0,8%	1,4	1,4	0,8%
50,9	0,4	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,3%	34,6	34,6	0,1%	1,4	1,4	0,3%
96,4	0,3	100	100	0,3%	5,0	5,0	0,2%	34,7	34,7	0,0%	1,4	1,4	0,5%
		∅		1,3%	∅		2,2%	∅		2,1%	∅		3,0%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,2	0,3	30,9%	0,5	0,3	0,3
0,3	1,6	0,2	0,3	25,3%	0,6	0,3	0,3
0,5	1,1	0,2	0,2	1,8%	0,9	0,4	0,3
1,1	0,7	0,3	0,3	0,4%	2,6	0,6	2,2
1,4	0,7	0,4	0,3	0,2%	4,9	0,7	2,5
1,9	0,7	0,5	0,4	0,4%	8,0	1,0	3,3
3,1	0,9	0,7	0,7	4,8%	22,1	2,0	5,0
4,2	0,9	0,9	0,9	6,0%	28,8	2,6	6,5
4,7	0,8	1,0	1,0	5,0%	23,5	2,8	7,3
8,2	0,9	1,8	1,7	6,1%	35,6	4,9	12,6
15,8	1,0	3,3	3,2	4,1%	63,2	10,5	24,1
17,1	1,0	3,6	3,4	3,5%	72,5	11,2	26,0
24,2	0,6	5,0	4,9	2,5%	71,9	18,7	36,8
50,9	0,4	10,1	10,2	0,2%	123,4	46,4	77,1
96,4	0,3	18,8	19,2	2,5%	225,9	87,4	146,1
			∅	6,2%			

Abbildung A-61. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 53

Parameter Versuchsreihe 54Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=29$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	4,0%	0,5	0,4	4,1%	3,1	3,0	4,0%	1,3	1,2	7,8%
0,3	1,6	29	31	4,8%	1,3	1,3	3,2%	9,2	8,9	3,3%	1,3	1,2	7,7%
0,5	1,1	50	53	7,0%	2,3	2,3	2,0%	15,6	15,9	2,1%	1,3	1,2	4,8%
1,1	0,7	80	80	0,1%	3,6	3,7	1,4%	25,2	25,5	1,4%	1,3	1,3	1,3%
1,4	0,7	85	84	1,2%	3,9	3,9	0,8%	26,9	27,1	0,8%	1,3	1,3	2,1%
1,9	0,7	90	90	0,3%	4,1	4,2	2,6%	28,6	29,3	2,6%	1,3	1,4	3,0%
3,0	0,9	94	94	0,1%	4,4	4,5	3,6%	30,4	31,5	3,4%	1,3	1,4	3,5%
4,4	0,9	97	97	0,6%	4,5	4,7	4,2%	31,5	32,7	4,0%	1,4	1,4	3,6%
4,9	0,8	98	98	0,2%	4,6	4,8	3,1%	32,0	33,0	3,0%	1,4	1,4	3,3%
10,8	1,1	99	100	0,9%	4,7	4,9	4,2%	32,8	34,1	4,1%	1,4	1,4	3,3%
17,9	1,0	100	100	0,3%	4,8	4,9	2,3%	33,4	34,2	2,2%	1,4	1,4	2,0%
18,4	1,0	100	100	0,2%	4,8	4,9	2,1%	33,5	34,2	2,0%	1,4	1,4	1,9%
26,4	0,6	100	100	0,1%	4,9	4,9	1,0%	34,0	34,2	0,8%	1,4	1,4	0,8%
49,7	0,6	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,5%	34,1	34,2	0,4%	1,4	1,4	0,6%
95,3	0,3	100	100	0,3%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,4%
		∅		1,3%		∅	2,4%		∅	2,3%		∅	3,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,2	0,3	30,9%	0,5	0,3	0,3
0,3	1,6	0,2	0,3	25,3%	0,6	0,3	0,3
0,5	1,1	0,2	0,2	1,8%	0,9	0,4	0,2
1,1	0,7	0,3	0,3	0,4%	2,6	0,6	2,2
1,4	0,7	0,4	0,3	0,7%	4,8	0,7	2,5
1,9	0,7	0,5	0,4	0,4%	8,0	1,0	3,3
3,0	0,9	0,7	0,7	4,0%	24,7	1,8	4,9
4,4	0,9	1,0	0,9	6,1%	21,3	3,0	6,9
4,9	0,8	1,1	1,0	5,2%	24,6	3,1	7,6
10,8	1,1	2,3	2,2	6,6%	21,7	7,7	15,4
17,9	1,0	3,8	3,6	4,2%	27,2	11,8	16,8
18,4	1,0	3,9	3,7	3,5%	26,5	11,7	16,9
26,4	0,6	5,5	5,3	2,1%	25,5	12,0	18,5
49,7	0,6	10,1	10,0	0,3%	37,6	20,4	23,2
95,3	0,3	19,1	19,3	0,8%	46,3	29,8	32,4
			∅	6,1%			

Abbildung A-62. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 54

Parameter Versuchsreihe 55

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=27$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	4,7%	0,4	0,5	7,7%	3,1	3,3	6,4%	1,3	1,3	2,9%
0,3	1,6	29	31	5,5%	1,3	1,4	7,0%	9,1	9,8	7,2%	1,3	1,3	1,5%
0,5	1,1	50	53	7,7%	2,2	2,4	9,6%	15,4	16,8	9,4%	1,3	1,3	1,8%
1,2	0,7	80	81	1,1%	3,6	3,7	3,6%	25,0	25,8	3,5%	1,3	1,3	2,5%
1,4	0,7	85	85	0,1%	3,8	4,0	3,1%	26,6	27,4	2,9%	1,3	1,3	3,2%
1,9	0,7	90	90	0,0%	4,1	4,2	3,7%	28,3	29,4	3,6%	1,3	1,4	3,7%
2,8	0,8	94	94	0,1%	4,4	4,5	3,8%	30,2	31,3	3,7%	1,3	1,4	3,9%
3,5	0,8	97	96	0,4%	4,5	4,7	3,2%	31,2	32,2	3,1%	1,3	1,4	3,6%
4,2	0,7	98	97	0,6%	4,6	4,7	2,8%	31,9	32,7	2,7%	1,4	1,4	3,4%
6,9	0,8	99	99	0,0%	4,7	4,9	2,9%	32,8	33,7	2,8%	1,4	1,4	3,0%
15,2	1,0	100	100	0,1%	4,9	5,0	2,3%	33,6	34,3	2,1%	1,4	1,4	2,1%
16,8	1,0	100	100	0,1%	4,9	5,0	1,9%	33,7	34,3	1,8%	1,4	1,4	1,9%
24,5	0,6	100	100	0,1%	4,9	5,0	0,9%	34,2	34,5	0,8%	1,4	1,4	0,8%
50,9	0,4	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,3%	34,6	34,6	0,1%	1,4	1,4	0,3%
96,4	0,3	100	100	0,3%	5,0	5,0	0,2%	34,7	34,7	0,0%	1,4	1,4	0,5%
		∅		1,4%	∅		3,5%	∅		3,3%	∅		2,3%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,2	0,3	30,7%	0,5	0,3	0,3
0,3	1,6	0,2	0,3	25,1%	0,6	0,3	0,3
0,5	1,1	0,2	0,3	20,1%	0,9	0,4	0,3
1,2	0,7	0,3	0,3	3,7%	2,6	0,6	2,2
1,4	0,7	0,4	0,3	3,2%	4,9	0,7	2,5
1,9	0,7	0,4	0,4	1,0%	6,6	0,9	3,2
2,8	0,8	0,7	0,6	4,7%	20,6	1,5	4,6
3,5	0,8	0,8	0,8	5,2%	27,8	2,0	5,6
4,2	0,7	0,9	0,9	5,3%	22,1	2,4	6,6
6,9	0,8	1,5	1,4	5,0%	29,8	4,1	10,7
15,2	1,0	3,2	3,1	4,2%	69,1	10,0	23,1
16,8	1,0	3,5	3,4	4,0%	73,0	10,7	25,5
24,5	0,6	5,0	4,9	2,6%	71,9	19,1	37,2
50,9	0,4	10,1	10,2	0,2%	123,4	46,4	77,1
96,4	0,3	18,8	19,2	2,5%	225,9	87,4	146,1
			∅	7,8%			

Abbildung A-63. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 55

Parameter Versuchsreihe 56Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=29$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	4,6%	0,4	0,4	1,4%	3,1	3,0	2,5%	1,3	1,2	5,7%
0,3	1,6	29	31	5,4%	1,3	1,3	1,9%	9,1	9,0	1,8%	1,3	1,2	6,9%
0,5	1,1	50	53	7,5%	2,2	2,3	3,7%	15,4	15,9	3,5%	1,3	1,2	3,6%
1,2	0,7	80	81	0,5%	3,6	3,7	2,9%	24,9	25,6	2,8%	1,3	1,3	2,4%
1,4	0,7	85	85	0,6%	3,8	3,9	2,6%	26,6	27,3	2,5%	1,3	1,3	3,3%
1,9	0,7	90	90	0,0%	4,1	4,3	4,0%	28,3	29,4	3,9%	1,3	1,4	3,9%
2,8	0,8	94	94	0,4%	4,4	4,5	3,5%	30,2	31,2	3,4%	1,3	1,4	4,0%
3,7	0,8	97	96	0,5%	4,5	4,7	3,2%	31,2	32,2	3,2%	1,3	1,4	3,8%
4,5	0,8	98	97	0,5%	4,6	4,7	3,1%	31,9	32,8	2,9%	1,4	1,4	3,6%
7,5	0,9	99	99	0,1%	4,7	4,9	3,6%	32,6	33,7	3,4%	1,4	1,4	3,4%
16,7	1,0	100	100	0,2%	4,8	4,9	2,5%	33,3	34,2	2,5%	1,4	1,4	2,3%
18,3	1,0	100	100	0,2%	4,8	4,9	2,3%	33,5	34,2	2,2%	1,4	1,4	2,1%
26,1	0,6	100	100	0,2%	4,9	4,9	1,2%	33,9	34,2	1,0%	1,4	1,4	1,0%
49,6	0,6	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,5%	34,1	34,2	0,5%	1,4	1,4	0,6%
95,2	0,3	100	100	0,2%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,4%
		∅		1,4%		∅	2,4%		∅	2,4%		∅	3,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,2	0,3	30,8%	0,5	0,3	0,3
0,3	1,6	0,2	0,3	25,1%	0,6	0,3	0,3
0,5	1,1	0,2	0,3	20,1%	0,9	0,4	0,3
1,2	0,7	0,3	0,3	3,1%	2,6	0,6	2,2
1,4	0,7	0,4	0,4	2,0%	4,9	0,7	2,6
1,9	0,7	0,5	0,5	0,8%	7,6	1,0	3,3
2,8	0,8	0,7	0,6	3,7%	18,4	1,6	4,6
3,7	0,8	0,8	0,8	5,3%	24,7	2,2	5,8
4,5	0,8	1,0	1,0	5,2%	24,8	2,8	7,1
7,5	0,9	1,6	1,5	5,9%	21,7	4,9	11,5
16,7	1,0	3,6	3,4	4,9%	27,7	11,1	16,6
18,3	1,0	3,9	3,7	4,4%	26,9	11,7	16,9
26,1	0,6	5,4	5,3	2,9%	25,1	11,8	18,4
49,6	0,6	10,1	10,0	0,4%	36,0	20,1	23,2
95,2	0,3	19,1	19,3	0,6%	46,2	29,7	32,4
			∅	7,7%			

Abbildung A-64. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 56

Parameter Versuchsreihe 57

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=26$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	0,4%	0,4	0,4	1,1%	2,5	2,5	1,1%	1,0	1,0	1,4%
0,3	1,6	30	30	3,1%	1,1	1,1	2,0%	7,3	7,5	1,8%	1,0	1,0	1,0%
0,5	1,1	50	53	6,5%	1,9	1,9	5,1%	12,3	12,9	5,1%	1,0	1,0	1,3%
1,1	0,7	80	81	0,8%	3,0	3,0	0,2%	20,0	19,9	0,3%	1,0	1,0	1,0%
1,4	0,7	85	85	0,3%	3,2	3,2	0,4%	21,3	21,2	0,5%	1,0	1,0	0,6%
1,8	0,8	90	90	0,0%	3,4	3,4	0,0%	22,7	22,6	0,1%	1,0	1,0	0,0%
2,5	0,8	95	93	1,4%	3,6	3,6	0,5%	24,2	24,0	0,8%	1,1	1,1	0,9%
3,5	0,8	96	96	0,2%	3,8	3,8	1,1%	25,1	25,4	0,9%	1,1	1,1	1,4%
6,2	0,7	98	99	0,3%	4,0	4,1	2,9%	26,8	27,5	2,8%	1,1	1,2	2,6%
6,4	0,7	99	99	0,4%	4,1	4,2	1,8%	27,2	27,7	1,8%	1,1	1,2	2,3%
12,8	0,4	100	100	0,3%	4,4	4,5	1,5%	29,6	30,0	1,3%	1,2	1,3	1,8%
15,6	0,3	100	100	0,2%	4,6	4,6	0,6%	30,3	30,5	0,5%	1,3	1,3	0,9%
29,6	0,3	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,8%	31,9	32,1	0,8%	1,3	1,3	0,8%
55,1	0,3	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,4%	32,8	33,0	0,3%	1,4	1,4	0,3%
97,5	0,2	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,3%	33,3	33,4	0,1%	1,4	1,4	0,2%
		∅		0,9%	∅		1,2%	∅		1,2%	∅		1,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	1,5%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	4,5%	1,0	0,3	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	4,2%	1,4	0,4	0,3
1,1	0,7	0,4	0,4	2,9%	4,4	0,6	0,8
1,4	0,7	0,4	0,4	2,0%	4,6	0,9	0,9
1,8	0,8	0,5	0,5	3,4%	7,1	1,5	1,2
2,5	0,8	0,7	0,7	1,9%	8,3	2,1	1,5
3,5	0,8	0,9	0,9	0,8%	8,7	3,1	1,9
6,2	0,7	1,6	1,5	6,4%	13,2	4,8	3,1
6,4	0,7	1,6	1,5	3,7%	13,1	5,0	3,2
12,8	0,4	2,9	2,8	2,4%	14,4	6,9	5,9
15,6	0,3	3,4	3,4	0,9%	14,7	7,7	7,0
29,6	0,3	6,2	6,1	0,9%	22,8	14,1	12,5
55,1	0,3	11,3	11,1	1,1%	34,4	24,5	22,5
97,5	0,2	19,5	19,4	0,3%	56,9	42,5	39,1
			∅	2,5%			

Abbildung A-65. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 57

Parameter Versuchsreihe 58Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=28$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	0,4%	0,4	0,4	1,1%	2,5	2,5	1,1%	1,0	1,0	1,4%
0,3	1,5	30	31	6,3%	1,1	1,2	5,2%	7,3	7,7	4,9%	1,0	1,0	1,0%
0,5	1,1	50	53	6,2%	1,9	1,9	4,7%	12,3	12,9	4,8%	1,0	1,0	1,4%
1,1	0,7	80	80	0,1%	3,0	3,0	0,9%	20,0	19,8	1,0%	1,0	1,0	1,0%
1,4	0,7	85	85	0,3%	3,2	3,2	0,8%	21,3	21,1	0,9%	1,0	1,0	0,5%
1,9	0,8	90	90	0,0%	3,4	3,4	0,2%	22,7	22,7	0,1%	1,0	1,1	0,2%
2,5	0,8	95	93	1,7%	3,6	3,6	0,9%	24,1	23,9	1,0%	1,1	1,1	0,9%
3,6	0,8	96	96	0,4%	3,8	3,8	1,4%	25,1	25,4	1,2%	1,1	1,1	1,8%
6,3	0,8	98	99	0,4%	4,0	4,1	4,3%	26,5	27,6	4,2%	1,1	1,2	3,9%
7,2	0,9	99	99	0,3%	4,0	4,2	4,4%	26,9	28,1	4,2%	1,1	1,2	4,6%
13,8	0,6	100	100	0,1%	4,3	4,4	2,8%	28,6	29,4	2,7%	1,2	1,2	2,9%
17,9	0,6	100	100	0,2%	4,3	4,4	2,7%	28,6	29,4	2,6%	1,2	1,2	2,8%
32,1	0,6	100	100	0,0%	4,4	4,4	1,6%	29,0	29,4	1,5%	1,2	1,2	1,6%
52,4	0,7	100	100	0,1%	4,4	4,4	1,3%	29,0	29,4	1,3%	1,2	1,2	1,5%
87,2	0,4	100	100	0,4%	4,4	4,4	0,2%	29,4	29,4	0,2%	1,2	1,2	0,6%
		∅		1,1%	∅		2,2%	∅		2,1%	∅		1,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	1,5%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	0,9%	0,8	0,3	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	3,9%	1,3	0,4	0,3
1,1	0,7	0,4	0,4	0,9%	2,0	0,8	0,8
1,4	0,7	0,4	0,4	3,3%	2,5	0,9	1,0
1,9	0,8	0,5	0,6	5,2%	4,1	1,4	1,2
2,5	0,8	0,7	0,7	3,5%	7,3	1,7	1,5
3,6	0,8	1,0	0,9	1,3%	10,3	2,6	2,0
6,3	0,8	1,6	1,5	7,2%	13,8	4,7	3,2
7,2	0,9	1,8	1,7	6,2%	12,6	5,8	3,6
13,8	0,6	3,3	3,1	3,9%	14,6	7,6	5,6
17,9	0,6	4,2	4,0	3,9%	14,7	9,8	6,5
32,1	0,6	7,5	7,3	2,6%	19,6	14,9	9,7
52,4	0,7	12,0	11,8	1,3%	29,3	25,2	14,3
87,2	0,4	19,4	19,7	1,5%	37,9	33,9	22,2
			∅	3,1%			

Abbildung A-66. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 58

Parameter Versuchsreihe 59

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=28$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	11	11	2,2%	0,4	0,4	9,4%	2,5	2,8	9,9%	1,0	1,0	7,1%
0,3	1,5	30	32	6,6%	1,0	1,2	14,1%	6,8	7,7	14,4%	1,0	1,0	7,0%
0,5	1,1	50	53	6,8%	1,7	1,9	14,7%	11,3	13,0	14,5%	1,0	1,0	7,4%
1,2	0,7	81	81	0,8%	2,8	3,0	8,0%	18,5	20,0	8,1%	1,0	1,0	7,2%
1,4	0,7	85	86	0,2%	3,0	3,2	7,9%	19,8	21,3	7,7%	1,0	1,0	7,7%
1,8	0,7	90	89	1,0%	3,2	3,4	6,7%	21,0	22,4	6,5%	1,0	1,0	7,7%
2,4	0,8	95	93	2,2%	3,4	3,6	5,4%	22,6	23,8	5,3%	1,0	1,1	7,8%
3,7	0,8	97	96	0,4%	3,6	3,8	6,6%	23,9	25,5	6,6%	1,0	1,1	7,0%
6,5	0,6	99	99	0,1%	3,9	4,2	6,1%	26,1	27,7	6,0%	1,1	1,2	6,0%
5,7	0,8	99	98	0,9%	3,9	4,1	6,0%	25,7	27,2	5,8%	1,1	1,2	7,0%
14,5	0,4	100	100	0,2%	4,5	4,6	1,5%	29,9	30,3	1,4%	1,2	1,3	1,7%
17,2	0,3	100	100	0,2%	4,6	4,6	0,8%	30,5	30,7	0,8%	1,3	1,3	1,0%
29,9	0,3	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,8%	31,9	32,2	0,8%	1,3	1,3	0,8%
55,1	0,3	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,4%	32,8	32,9	0,4%	1,4	1,4	0,3%
97,4	0,2	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,3%	33,3	33,4	0,1%	1,4	1,4	0,2%
		∅		1,4%	∅		5,9%	∅		5,9%	∅		5,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	4,6%	0,7	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	7,5%	1,1	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	13,4%	1,2	0,5	0,3
1,2	0,7	0,4	0,4	7,3%	4,1	0,7	0,8
1,4	0,7	0,5	0,5	6,1%	4,7	1,1	1,0
1,8	0,7	0,6	0,5	3,8%	6,1	1,5	1,1
2,4	0,8	0,7	0,7	5,3%	8,5	2,2	1,5
3,7	0,8	1,0	1,0	8,1%	8,8	3,4	2,0
6,5	0,6	1,7	1,6	7,7%	14,7	4,9	3,3
5,7	0,8	1,5	1,4	7,5%	11,0	5,0	2,9
14,5	0,4	3,3	3,2	2,4%	15,9	7,4	6,5
17,2	0,3	3,7	3,7	1,3%	15,9	8,2	7,6
29,9	0,3	6,2	6,2	1,0%	21,4	14,2	12,6
55,1	0,3	11,2	11,1	1,0%	34,5	24,8	22,5
97,4	0,2	19,5	19,4	0,3%	56,8	42,5	39,1
		∅		5,2%			

Abbildung A-67. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 59

Parameter Versuchsreihe 60Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=27$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	11	11	2,2%	0,4	0,4	9,4%	2,5	2,8	9,8%	1,0	1,0	7,1%
0,3	1,5	30	32	6,6%	1,0	1,2	14,0%	6,8	7,7	14,4%	1,0	1,0	7,0%
0,5	1,1	50	52	5,0%	1,7	1,9	12,8%	11,3	12,8	12,6%	1,0	1,0	7,4%
1,2	0,7	81	82	1,3%	2,8	3,0	8,7%	18,5	20,1	8,7%	1,0	1,0	7,3%
1,5	0,7	85	86	0,7%	3,0	3,2	8,4%	19,7	21,4	8,3%	1,0	1,0	7,7%
1,8	0,8	90	89	0,6%	3,2	3,4	7,3%	21,0	22,5	7,3%	1,0	1,0	7,9%
2,5	0,9	95	93	1,7%	3,4	3,6	6,7%	22,5	23,9	6,5%	1,0	1,1	8,6%
3,4	0,8	96	96	0,8%	3,5	3,8	7,4%	23,4	25,2	7,4%	1,0	1,1	8,2%
5,8	0,7	99	99	0,0%	3,8	4,1	8,0%	25,3	27,3	7,9%	1,1	1,2	8,0%
6,2	1,0	99	99	0,4%	3,8	4,1	9,1%	25,3	27,5	8,9%	1,1	1,2	9,6%
14,7	0,5	100	100	0,3%	4,3	4,4	3,8%	28,3	29,4	3,7%	1,2	1,2	4,1%
19,9	0,6	100	100	0,2%	4,3	4,4	2,9%	28,6	29,4	2,8%	1,2	1,2	3,1%
32,5	0,6	100	100	0,0%	4,3	4,4	1,8%	28,9	29,4	1,7%	1,2	1,2	1,8%
52,4	0,6	100	100	0,1%	4,4	4,4	1,6%	29,0	29,4	1,4%	1,2	1,2	1,7%
87,6	0,4	100	100	0,4%	4,4	4,4	0,2%	29,4	29,4	0,2%	1,2	1,2	0,5%
		∅		1,4%	∅		6,8%	∅		6,8%	∅		6,0%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	4,6%	0,7	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	7,5%	0,8	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	13,5%	1,5	0,5	0,3
1,2	0,7	0,4	0,4	7,1%	2,1	0,9	0,8
1,5	0,7	0,5	0,5	6,0%	3,5	1,1	1,0
1,8	0,8	0,6	0,5	4,9%	5,6	1,3	1,1
2,5	0,9	0,7	0,7	5,6%	10,6	1,8	1,5
3,4	0,8	1,0	0,9	7,8%	10,3	2,4	1,9
5,8	0,7	1,6	1,4	9,6%	11,3	4,3	3,0
6,2	1,0	1,7	1,5	10,6%	13,7	5,6	3,1
14,7	0,5	3,5	3,3	4,4%	15,0	7,8	5,8
19,9	0,6	4,7	4,5	4,1%	14,3	10,3	7,0
32,5	0,6	7,6	7,4	3,2%	17,5	14,6	9,8
52,4	0,6	12,1	11,9	1,5%	27,3	23,5	14,3
87,6	0,4	19,6	19,8	1,2%	36,8	33,3	22,3
			∅	6,1%			

Abbildung A-68. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 60

Parameter Versuchsreihe 61

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=25$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	3,5%	0,4	0,4	2,3%	2,6	2,7	1,7%	1,1	1,1	1,2%
0,3	1,5	30	32	7,4%	1,2	1,3	5,8%	7,8	8,3	5,6%	1,1	1,1	1,5%
0,5	1,1	50	53	7,5%	2,0	2,1	5,6%	13,1	13,9	5,8%	1,1	1,1	1,8%
1,1	0,7	80	81	1,5%	3,2	3,2	0,6%	21,2	21,3	0,4%	1,1	1,1	0,9%
1,3	0,7	85	85	0,1%	3,5	3,5	0,1%	22,7	22,7	0,1%	1,1	1,1	0,1%
1,9	0,8	90	91	0,8%	3,7	3,8	3,5%	24,1	24,9	3,3%	1,1	1,1	2,7%
2,5	0,7	94	94	0,6%	3,9	4,0	3,1%	25,8	26,5	3,0%	1,1	1,2	3,8%
3,2	0,7	96	96	0,6%	4,1	4,2	3,7%	26,7	27,7	3,6%	1,2	1,2	4,3%
4,1	0,7	98	97	0,5%	4,2	4,4	3,9%	27,6	28,6	3,7%	1,2	1,2	4,3%
6,6	0,7	99	99	0,2%	4,4	4,6	4,1%	28,8	30,0	4,0%	1,2	1,3	4,3%
8,3	0,6	100	99	0,5%	4,5	4,6	2,6%	29,8	30,5	2,5%	1,2	1,3	3,0%
10,2	0,5	100	100	0,3%	4,6	4,7	2,3%	30,2	30,9	2,2%	1,3	1,3	2,6%
26,7	0,4	100	100	0,1%	4,8	4,9	1,1%	31,8	32,1	0,9%	1,3	1,3	1,1%
53,2	0,3	100	100	0,1%	5,0	5,0	0,6%	32,5	32,7	0,4%	1,4	1,4	0,5%
98,2	0,2	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,3%	32,9	33,0	0,1%	1,4	1,4	0,3%
		∅		1,6%	∅		2,6%	∅		2,5%	∅		2,2%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,3%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	4,9%	0,6	0,3	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	1,4%	1,0	0,4	0,3
1,1	0,7	0,3	0,3	2,3%	3,9	0,6	1,0
1,3	0,7	0,4	0,4	1,4%	4,7	0,7	1,1
1,9	0,8	0,5	0,5	6,5%	8,2	1,0	1,4
2,5	0,7	0,6	0,6	3,3%	13,0	1,5	1,8
3,2	0,7	0,8	0,8	1,4%	15,4	2,1	2,2
4,1	0,7	1,0	0,9	5,8%	21,6	3,0	2,7
6,6	0,7	1,5	1,4	3,5%	55,7	4,5	4,2
8,3	0,6	1,8	1,8	2,2%	26,9	5,7	5,1
10,2	0,5	2,2	2,2	1,8%	42,4	6,8	6,2
26,7	0,4	5,6	5,5	2,3%	68,7	15,3	15,8
53,2	0,3	10,8	10,7	1,4%	94,5	27,9	31,1
98,2	0,2	19,5	19,5	0,1%	125,1	48,6	57,0
		∅		3,2%			

Abbildung A-69. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 61

Parameter Versuchsreihe 62Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=26$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	3,5%	0,4	0,4	0,0%	2,6	2,6	0,6%	1,1	1,1	3,4%
0,3	1,5	30	32	7,4%	1,2	1,2	3,3%	7,8	8,1	3,2%	1,1	1,1	3,7%
0,5	1,1	50	53	7,4%	2,0	2,1	3,2%	13,1	13,5	3,3%	1,1	1,1	4,0%
1,1	0,7	80	81	1,2%	3,2	3,2	0,2%	21,2	21,2	0,0%	1,1	1,1	0,9%
1,3	0,7	85	85	0,2%	3,5	3,4	0,0%	22,7	22,6	0,1%	1,1	1,1	0,2%
1,9	0,8	90	90	0,5%	3,7	3,8	3,0%	24,1	24,8	2,8%	1,1	1,1	2,5%
2,5	0,7	94	94	0,7%	3,9	4,0	2,8%	25,8	26,5	2,7%	1,1	1,2	3,6%
3,4	0,7	96	96	0,4%	4,1	4,2	3,7%	26,9	27,8	3,6%	1,2	1,2	4,2%
4,5	0,7	98	98	0,3%	4,2	4,4	4,1%	27,8	28,9	3,9%	1,2	1,2	4,4%
7,0	0,8	99	99	0,1%	4,4	4,6	4,8%	28,8	30,1	4,7%	1,2	1,3	4,9%
11,2	0,8	100	100	0,2%	4,5	4,7	4,0%	29,7	30,9	4,0%	1,2	1,3	4,2%
12,8	0,8	100	100	0,2%	4,5	4,7	3,9%	29,8	30,9	3,8%	1,2	1,3	4,1%
28,8	0,5	100	100	0,0%	4,7	4,7	1,4%	30,6	30,9	1,3%	1,3	1,3	1,3%
52,6	0,3	100	100	0,0%	4,7	4,7	1,1%	30,6	30,9	1,0%	1,3	1,3	1,2%
94,7	0,4	100	100	0,2%	4,7	4,7	0,9%	30,7	30,9	0,8%	1,3	1,3	1,1%
		∅		1,5%	∅		2,4%	∅		2,4%	∅		2,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	9,3%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	5,0%	0,7	0,3	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	1,4%	1,2	0,4	0,3
1,1	0,7	0,3	0,3	2,6%	1,9	0,7	1,0
1,3	0,7	0,4	0,4	2,2%	2,2	0,8	1,1
1,9	0,8	0,5	0,5	8,7%	3,3	1,0	1,4
2,5	0,7	0,6	0,6	4,3%	7,0	1,4	1,8
3,4	0,7	0,8	0,8	0,8%	7,1	2,1	2,3
4,5	0,7	1,1	1,0	2,1%	11,2	2,9	3,0
7,0	0,8	1,6	1,5	4,8%	11,1	4,7	4,4
11,2	0,8	2,5	2,4	5,1%	13,0	7,2	6,3
12,8	0,8	2,9	2,7	5,5%	15,5	8,4	6,7
28,8	0,5	6,3	6,1	2,6%	18,5	12,3	10,1
52,6	0,3	11,3	11,2	1,5%	28,9	20,3	15,2
94,7	0,4	20,1	20,1	0,2%	41,4	35,7	24,1
		∅		3,7%			

Abbildung A-70. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 62

Parameter Versuchsreihe 63

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=31$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	12	9,6%	0,4	0,5	21,3%	2,5	3,0	21,5%	1,0	1,1	10,7%
0,3	1,5	30	32	9,2%	1,1	1,3	21,2%	7,0	8,4	21,1%	1,0	1,1	11,0%
0,5	1,1	50	54	8,2%	1,8	2,1	20,1%	11,6	13,9	20,0%	1,0	1,1	10,9%
1,2	0,7	81	81	0,8%	2,9	3,3	12,5%	19,0	21,4	12,4%	1,0	1,1	11,5%
1,6	0,9	85	87	1,7%	3,1	3,6	15,6%	20,3	23,5	15,7%	1,0	1,1	13,7%
1,9	0,8	90	90	0,1%	3,3	3,8	14,7%	21,6	24,8	14,5%	1,0	1,2	14,8%
2,4	0,8	95	92	2,9%	3,5	4,0	12,0%	23,2	26,0	11,8%	1,0	1,2	15,4%
3,5	0,7	97	95	1,2%	3,7	4,2	13,0%	24,6	27,7	12,9%	1,1	1,2	14,3%
5,5	0,7	99	98	0,8%	4,0	4,5	10,6%	26,5	29,3	10,6%	1,1	1,2	11,4%
5,4	0,6	99	98	1,5%	4,1	4,5	9,8%	26,7	29,2	9,6%	1,1	1,2	11,5%
9,6	0,5	100	99	0,6%	4,4	4,7	6,0%	29,0	30,7	5,9%	1,2	1,3	6,7%
12,0	0,5	100	100	0,4%	4,5	4,7	4,8%	29,7	31,1	4,7%	1,2	1,3	5,2%
27,1	0,4	100	100	0,0%	4,8	4,9	1,8%	31,6	32,1	1,7%	1,3	1,3	1,7%
54,1	0,3	100	100	0,1%	4,9	5,0	0,8%	32,5	32,7	0,7%	1,4	1,4	0,7%
98,4	0,2	100	100	0,0%	5,0	5,0	0,3%	32,9	33,0	0,2%	1,4	1,4	0,3%
		∅		2,5%	∅		11,0%	∅		10,9%	∅		9,3%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	3,2%	0,7	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	6,3%	0,7	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	8,4%	1,1	0,5	0,3
1,2	0,7	0,4	0,4	8,8%	5,0	0,7	1,1
1,6	0,9	0,5	0,4	3,6%	7,2	0,9	1,3
1,9	0,8	0,5	0,5	3,1%	12,2	1,2	1,5
2,4	0,8	0,6	0,6	3,1%	15,7	1,5	1,8
3,5	0,7	0,9	0,8	8,4%	15,3	2,6	2,4
5,5	0,7	1,4	1,2	8,4%	36,9	4,0	3,6
5,4	0,6	1,3	1,2	7,1%	23,8	4,0	3,5
9,6	0,5	2,2	2,1	5,7%	65,8	6,4	5,9
12,0	0,5	2,7	2,5	4,2%	90,1	7,6	7,3
27,1	0,4	5,7	5,5	2,1%	89,2	15,9	16,0
54,1	0,3	11,1	10,9	1,9%	123,5	27,9	31,6
98,4	0,2	19,6	19,6	0,3%	175,8	48,1	57,1
		∅		5,0%			

Abbildung A-71. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 63

Parameter Versuchsreihe 64Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=31$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	12	9,6%	0,4	0,5	18,6%	2,5	3,0	18,7%	1,0	1,1	8,2%
0,3	1,5	30	32	9,2%	1,1	1,3	18,5%	7,0	8,2	18,4%	1,0	1,1	8,5%
0,5	1,1	50	54	8,2%	1,8	2,1	17,4%	11,6	13,6	17,4%	1,0	1,1	8,5%
1,2	0,7	80	81	0,7%	2,9	3,3	12,2%	19,0	21,3	12,1%	1,0	1,1	11,4%
1,6	0,9	85	87	2,0%	3,1	3,6	16,1%	20,3	23,6	16,2%	1,0	1,1	13,8%
1,9	0,8	90	89	0,3%	3,3	3,8	14,3%	21,6	24,7	14,0%	1,0	1,1	14,7%
2,4	0,8	95	92	3,0%	3,5	3,9	11,2%	23,2	25,8	11,2%	1,0	1,2	14,6%
3,7	0,7	97	96	0,9%	3,8	4,3	12,5%	24,9	28,0	12,5%	1,1	1,2	13,5%
5,3	0,7	99	98	0,9%	4,0	4,5	11,6%	26,2	29,2	11,5%	1,1	1,2	12,5%
5,2	0,7	99	98	1,7%	4,0	4,4	9,9%	26,5	29,1	9,9%	1,1	1,2	11,8%
12,1	0,7	100	100	0,4%	4,4	4,7	6,8%	28,9	30,8	6,9%	1,2	1,3	7,2%
15,8	0,7	100	100	0,3%	4,4	4,7	6,0%	29,2	30,9	5,8%	1,2	1,3	6,3%
31,3	0,5	100	100	0,1%	4,5	4,7	4,5%	29,6	30,9	4,4%	1,2	1,3	4,6%
52,4	0,3	100	100	0,1%	4,6	4,7	3,4%	30,0	30,9	3,3%	1,2	1,3	3,5%
94,3	0,4	100	100	0,2%	4,6	4,7	3,1%	30,0	30,9	3,1%	1,2	1,3	3,4%
		∅		2,5%	∅		11,1%	∅		11,0%	∅		9,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	3,0%	0,7	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	6,1%	0,9	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	8,4%	1,2	0,5	0,3
1,2	0,7	0,4	0,4	9,3%	2,1	0,8	1,1
1,6	0,9	0,5	0,4	2,8%	2,9	1,0	1,3
1,9	0,8	0,5	0,5	2,4%	4,4	1,2	1,5
2,4	0,8	0,6	0,6	2,0%	4,9	1,4	1,7
3,7	0,7	1,0	0,9	8,2%	7,7	2,5	2,5
5,3	0,7	1,3	1,2	9,2%	10,3	3,8	3,4
5,2	0,7	1,3	1,2	6,6%	8,2	3,4	3,4
12,1	0,7	2,8	2,6	7,4%	16,4	7,4	6,6
15,8	0,7	3,6	3,4	6,6%	15,1	9,0	7,3
31,3	0,5	7,0	6,6	4,5%	21,2	13,5	10,6
52,4	0,3	11,5	11,1	3,6%	26,0	19,0	15,1
94,3	0,4	20,5	20,0	2,3%	43,2	35,8	24,0
				5,5%			

Abbildung A-72. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 64

Parameter Versuchsreihe 65

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=32$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	1,5%	0,4	0,4	2,5%	2,5	2,5	2,2%	1,0	1,0	1,0%
0,3	1,6	30	30	2,6%	1,1	1,1	2,3%	7,2	7,4	1,8%	1,0	1,0	0,3%
0,5	1,1	50	52	4,9%	1,8	1,9	4,4%	12,1	12,6	4,2%	1,0	1,0	0,5%
1,2	0,8	81	81	0,0%	3,0	2,9	0,6%	19,7	19,6	0,6%	1,0	1,0	0,6%
1,5	0,8	86	85	0,1%	3,2	3,1	0,3%	21,0	20,9	0,4%	1,0	1,0	0,3%
2,2	0,9	90	91	0,4%	3,4	3,4	0,4%	22,3	22,4	0,4%	1,0	1,0	0,0%
3,4	1,0	95	95	0,1%	3,6	3,6	0,7%	23,7	23,8	0,5%	1,0	1,0	0,8%
4,6	1,0	97	97	0,3%	3,7	3,7	1,3%	24,5	24,8	1,3%	1,1	1,1	1,0%
6,5	0,8	98	98	0,6%	3,8	3,9	1,7%	25,4	25,8	1,6%	1,1	1,1	1,1%
7,5	0,8	99	99	0,2%	3,9	3,9	1,5%	25,8	26,2	1,4%	1,1	1,1	1,7%
17,6	0,3	100	100	0,3%	4,3	4,3	1,4%	28,3	28,7	1,4%	1,2	1,2	1,7%
20,4	0,3	100	100	0,2%	4,3	4,4	1,4%	28,8	29,1	1,3%	1,2	1,2	1,6%
34,5	0,2	100	100	0,2%	4,6	4,6	1,5%	30,5	30,8	1,3%	1,3	1,3	1,6%
59,1	0,2	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,5%	31,9	32,0	0,6%	1,3	1,3	0,6%
99,9	0,2	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	32,7	32,8	0,3%	1,4	1,4	0,4%
		∅		0,8%	∅		1,4%	∅		1,3%	∅		0,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	0,1%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	3,0%	1,0	0,3	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	2,0%	1,4	0,4	0,3
1,2	0,8	0,4	0,4	4,5%	4,4	0,6	0,8
1,5	0,8	0,5	0,5	5,9%	9,9	1,1	1,0
2,2	0,9	0,6	0,6	8,9%	15,1	2,0	1,3
3,4	1,0	0,8	0,9	12,3%	18,4	3,5	1,9
4,6	1,0	1,1	1,2	8,4%	18,4	5,1	2,5
6,5	0,8	1,7	1,7	3,1%	19,9	6,6	3,4
7,5	0,8	2,0	1,9	2,4%	24,7	7,5	3,9
17,6	0,3	4,1	4,0	1,6%	28,9	11,2	8,3
20,4	0,3	4,7	4,6	1,0%	41,1	12,3	9,4
34,5	0,2	7,5	7,4	0,6%	31,8	16,6	15,1
59,1	0,2	12,4	12,3	0,8%	42,8	26,4	24,8
99,9	0,2	20,4	20,3	0,6%	51,6	42,1	40,8
			∅	3,7%			

Abbildung A-73. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 65

Parameter Versuchsreihe 66Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=34$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	1,5%	0,4	0,4	2,5%	2,5	2,5	2,2%	1,0	1,0	1,0%
0,3	1,6	30	30	2,6%	1,1	1,1	2,3%	7,2	7,3	1,9%	1,0	1,0	0,3%
0,5	1,1	50	52	4,6%	1,8	1,9	4,1%	12,1	12,6	3,8%	1,0	1,0	0,5%
1,2	0,8	81	80	1,2%	3,0	2,9	1,8%	19,7	19,3	1,8%	1,0	1,0	0,6%
1,5	0,8	86	85	0,5%	3,2	3,1	0,7%	21,0	20,8	0,9%	1,0	1,0	0,2%
2,4	1,0	90	91	1,1%	3,4	3,4	1,4%	22,3	22,6	1,2%	1,0	1,0	0,3%
4,3	1,2	95	96	1,5%	3,6	3,7	3,5%	23,7	24,5	3,3%	1,0	1,1	1,9%
5,2	1,0	97	97	0,8%	3,7	3,8	2,6%	24,5	25,1	2,5%	1,1	1,1	1,7%
6,5	1,1	98	98	0,5%	3,7	3,9	3,3%	24,9	25,7	3,2%	1,1	1,1	2,8%
8,7	1,1	99	99	0,2%	3,8	4,0	4,5%	25,5	26,6	4,4%	1,1	1,1	4,3%
21,8	0,7	100	100	0,2%	4,0	4,1	2,7%	26,5	27,2	2,6%	1,1	1,1	2,9%
25,3	0,7	100	100	0,4%	4,0	4,1	2,5%	26,6	27,2	2,4%	1,1	1,1	2,9%
38,6	0,6	100	100	0,4%	4,0	4,1	2,0%	26,7	27,2	1,9%	1,1	1,1	2,5%
59,3	0,6	101	100	0,7%	4,0	4,1	1,8%	26,8	27,2	1,6%	1,1	1,1	2,5%
91,7	0,5	101	100	1,0%	4,1	4,1	0,8%	27,0	27,2	0,7%	1,1	1,1	1,8%
		∅		1,1%	∅		2,4%	∅		2,3%	∅		1,8%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	0,0%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	2,9%	0,8	0,3	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	1,7%	1,1	0,4	0,3
1,2	0,8	0,4	0,4	4,7%	2,5	0,8	0,8
1,5	0,8	0,5	0,5	4,7%	4,5	1,1	1,0
2,4	1,0	0,6	0,7	9,7%	9,4	1,9	1,5
4,3	1,2	1,0	1,2	13,6%	18,1	3,7	2,4
5,2	1,0	1,4	1,4	0,4%	19,5	4,8	2,9
6,5	1,1	1,7	1,7	3,1%	17,6	6,9	3,4
8,7	1,1	2,3	2,2	6,0%	20,3	9,0	4,5
21,8	0,7	5,4	5,3	2,2%	20,5	13,5	7,9
25,3	0,7	6,2	6,2	0,1%	25,9	14,7	8,8
38,6	0,6	9,4	9,4	0,1%	30,0	21,2	12,0
59,3	0,6	14,2	14,5	1,7%	36,1	31,2	17,1
91,7	0,5	21,8	22,4	3,0%	49,9	43,6	25,0
		∅		3,6%			

Abbildung A-74. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 66

Parameter Versuchsreihe 67

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=34$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	11	11	0,8%	0,4	0,4	7,5%	2,5	2,7	7,8%	0,9	1,0	8,4%
0,3	1,6	30	30	2,5%	1,0	1,1	11,9%	6,6	7,4	11,3%	0,9	1,0	9,2%
0,5	1,1	50	52	5,2%	1,7	1,9	14,4%	11,1	12,6	14,3%	0,9	1,0	8,7%
1,2	0,8	81	81	0,2%	2,7	2,9	8,8%	18,0	19,6	8,7%	0,9	1,0	8,6%
1,6	0,8	85	86	0,1%	2,9	3,1	8,8%	19,2	20,9	8,7%	0,9	1,0	8,7%
2,0	0,9	90	89	1,3%	3,1	3,3	7,1%	20,4	21,9	7,2%	0,9	1,0	8,5%
2,9	1,1	95	93	1,8%	3,3	3,5	6,7%	21,8	23,3	6,7%	1,0	1,0	8,7%
4,8	0,9	96	97	0,5%	3,5	3,7	8,3%	22,9	24,8	8,3%	1,0	1,1	7,8%
6,8	0,8	98	98	0,2%	3,6	3,9	7,5%	24,1	25,9	7,5%	1,0	1,1	7,3%
7,3	0,9	99	99	0,6%	3,7	3,9	6,8%	24,4	26,1	6,8%	1,0	1,1	7,4%
19,8	0,3	100	100	0,2%	4,2	4,4	2,9%	28,2	29,0	2,8%	1,2	1,2	3,1%
22,5	0,2	100	100	0,2%	4,3	4,4	2,2%	28,8	29,4	2,2%	1,2	1,2	2,4%
35,5	0,2	100	100	0,1%	4,6	4,6	1,3%	30,5	30,9	1,3%	1,3	1,3	1,4%
59,0	0,2	100	100	0,0%	4,8	4,8	0,5%	31,9	32,0	0,6%	1,3	1,3	0,6%
99,8	0,2	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,4%	32,7	32,8	0,3%	1,4	1,4	0,3%
		∅		0,9%	∅		6,3%	∅		6,3%	∅		6,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	7,7%	0,7	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	12,6%	1,1	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	11,1%	1,3	0,5	0,3
1,2	0,8	0,4	0,4	5,2%	7,9	0,8	0,9
1,6	0,8	0,5	0,5	3,5%	11,5	1,3	1,0
2,0	0,9	0,6	0,6	2,3%	18,3	1,8	1,2
2,9	1,1	0,9	0,8	4,9%	16,6	3,3	1,7
4,8	0,9	1,4	1,3	8,3%	21,0	5,6	2,6
6,8	0,8	1,9	1,8	9,2%	23,9	7,3	3,6
7,3	0,9	2,0	1,9	7,6%	24,1	8,0	3,8
19,8	0,3	4,6	4,5	3,1%	28,0	12,2	9,1
22,5	0,2	5,2	5,0	2,6%	27,2	12,9	10,3
35,5	0,2	7,7	7,6	0,7%	34,5	16,7	15,5
59,0	0,2	12,3	12,3	0,7%	41,4	26,3	24,7
99,8	0,2	20,4	20,2	0,6%	51,1	42,1	40,7
			∅	5,3%			

Abbildung A-75. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 67

Parameter Versuchsreihe 68Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=34$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	11	11	0,9%	0,4	0,4	7,5%	2,5	2,7	7,8%	0,9	1,0	8,4%
0,3	1,5	30	31	5,6%	1,0	1,1	15,3%	6,6	7,6	14,7%	0,9	1,0	9,2%
0,5	1,1	50	52	5,2%	1,7	1,9	14,4%	11,1	12,6	14,3%	0,9	1,0	8,7%
1,2	0,8	81	80	0,0%	2,7	2,9	8,5%	18,0	19,6	8,6%	0,9	1,0	8,6%
1,6	0,9	85	86	0,5%	2,9	3,2	9,3%	19,2	21,0	9,2%	0,9	1,0	8,8%
2,0	1,1	90	89	0,9%	3,1	3,3	8,1%	20,4	22,0	7,9%	0,9	1,0	9,1%
3,2	1,2	95	94	0,9%	3,3	3,5	7,9%	21,8	23,5	8,0%	1,0	1,0	8,8%
4,8	1,0	96	97	0,4%	3,4	3,7	9,1%	22,8	24,8	9,0%	1,0	1,1	8,8%
6,1	1,0	98	98	0,0%	3,5	3,8	9,1%	23,4	25,5	8,9%	1,0	1,1	9,0%
7,4	1,1	99	99	0,5%	3,6	3,9	9,3%	23,9	26,1	9,1%	1,0	1,1	9,8%
20,9	0,6	100	100	0,3%	3,9	4,1	4,5%	26,0	27,2	4,5%	1,1	1,1	4,8%
24,0	0,5	100	100	0,3%	3,9	4,1	3,8%	26,2	27,2	3,7%	1,1	1,1	4,2%
36,8	0,5	100	100	0,4%	4,0	4,1	2,6%	26,6	27,2	2,5%	1,1	1,1	2,9%
58,0	0,5	101	100	0,6%	4,0	4,1	2,6%	26,6	27,2	2,4%	1,1	1,1	3,1%
91,5	0,4	101	100	0,6%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,2%	1,1	1,1	1,9%
		∅		1,1%	∅		7,5%	∅		7,4%	∅		7,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	7,7%	0,7	0,4	0,3
0,3	1,5	0,3	0,3	10,5%	1,0	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	11,1%	1,1	0,5	0,3
1,2	0,8	0,4	0,4	3,6%	2,6	0,9	0,9
1,6	0,9	0,5	0,5	3,9%	7,7	1,2	1,1
2,0	1,1	0,6	0,6	4,2%	17,0	1,5	1,3
3,2	1,2	0,9	0,9	4,2%	12,1	2,6	1,8
4,8	1,0	1,4	1,3	8,8%	16,4	4,4	2,6
6,1	1,0	1,8	1,6	10,4%	21,3	5,9	3,3
7,4	1,1	2,1	1,9	10,0%	17,5	8,0	3,8
20,9	0,6	5,3	5,1	4,2%	24,3	13,0	7,7
24,0	0,5	6,0	5,9	2,3%	25,3	13,1	8,4
36,8	0,5	9,1	9,0	1,0%	25,9	18,7	11,6
58,0	0,5	14,2	14,2	0,2%	36,4	29,2	16,7
91,5	0,4	22,2	22,4	0,9%	47,4	40,9	24,9
		∅		5,5%			

Abbildung A-76. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 68

Parameter Versuchsreihe 69

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=34$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	2,7%	0,4	0,4	0,9%	2,6	2,6	0,9%	1,1	1,0	3,5%
0,3	1,6	30	32	6,8%	1,1	1,2	3,2%	7,7	7,9	3,0%	1,1	1,0	3,3%
0,6	1,1	50	53	7,6%	1,9	2,0	3,8%	12,9	13,4	3,8%	1,1	1,0	3,6%
1,3	0,8	80	81	1,2%	3,1	3,1	0,6%	20,9	21,0	0,4%	1,1	1,1	0,7%
1,7	1,0	85	87	1,8%	3,3	3,4	3,1%	22,3	23,0	3,1%	1,1	1,1	1,3%
2,1	0,9	90	90	0,0%	3,5	3,6	2,8%	23,7	24,3	2,6%	1,1	1,1	2,8%
2,8	0,9	95	93	1,9%	3,7	3,8	1,9%	25,3	25,8	2,0%	1,1	1,2	3,8%
3,9	0,8	96	96	1,0%	3,8	4,0	4,0%	26,2	27,3	4,0%	1,1	1,2	5,1%
6,6	0,7	98	98	0,0%	4,0	4,3	6,1%	27,7	29,3	5,9%	1,2	1,2	6,1%
7,5	0,6	99	99	0,6%	4,1	4,3	5,3%	28,3	29,8	5,4%	1,2	1,3	6,0%
12,8	0,4	100	100	0,3%	4,4	4,6	4,0%	30,0	31,2	3,9%	1,2	1,3	4,4%
16,1	0,4	100	100	0,3%	4,5	4,6	3,5%	30,5	31,6	3,4%	1,3	1,3	3,8%
31,9	0,3	100	100	0,0%	4,7	4,8	2,6%	32,0	32,7	2,4%	1,3	1,4	2,6%
55,1	0,2	100	100	0,0%	4,8	4,9	1,5%	32,9	33,3	1,4%	1,4	1,4	1,5%
98,7	0,2	100	100	0,1%	4,9	4,9	0,6%	33,6	33,8	0,6%	1,4	1,4	0,5%
		∅		1,6%	∅		2,9%	∅		2,9%	∅		3,3%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	5,6%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,8%	55,6	0,3	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	1,5%	29,6	0,4	0,3
1,3	0,8	0,4	0,4	8,0%	17,6	0,6	1,1
1,7	1,0	0,4	0,5	17,5%	16,3	0,8	1,3
2,1	0,9	0,5	0,6	15,1%	16,7	1,3	1,5
2,8	0,9	0,7	0,7	11,5%	23,3	2,0	1,9
3,9	0,8	0,9	1,0	4,0%	28,8	3,1	2,5
6,6	0,7	1,7	1,5	8,6%	195,7	5,5	3,9
7,5	0,6	1,8	1,7	1,8%	76,0	6,6	4,4
12,8	0,4	2,9	2,8	2,0%	59,1	10,8	7,2
16,1	0,4	3,6	3,5	2,1%	82,0	13,9	8,9
31,9	0,3	6,8	6,7	1,3%	136,1	25,6	17,1
55,1	0,2	11,4	11,3	1,1%	192,1	44,2	29,0
98,7	0,2	20,1	20,0	0,7%	212,3	71,4	51,4
			∅	5,5%			

Abbildung A-77. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 69

Parameter Versuchsreihe 70Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=31$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,0	10	10	2,7%	0,4	0,4	0,9%	2,6	2,6	0,9%	1,1	1,0	3,5%
0,3	1,6	30	32	6,9%	1,1	1,2	3,3%	7,7	7,9	3,1%	1,1	1,0	3,3%
0,6	1,1	50	54	7,9%	1,9	2,0	4,1%	12,9	13,4	4,1%	1,1	1,0	3,5%
1,3	0,8	80	83	2,9%	3,1	3,1	2,4%	20,9	21,4	2,2%	1,1	1,1	0,5%
1,5	0,8	85	86	0,6%	3,3	3,3	0,9%	22,3	22,5	0,8%	1,1	1,1	0,3%
1,9	0,8	90	89	0,6%	3,5	3,5	0,7%	23,7	23,9	0,7%	1,1	1,1	1,3%
2,5	0,8	95	92	2,4%	3,7	3,7	0,2%	25,3	25,4	0,2%	1,1	1,1	2,7%
3,5	0,8	96	95	1,3%	3,9	3,9	2,2%	26,3	26,9	2,3%	1,1	1,2	3,6%
6,1	0,8	98	98	0,1%	4,0	4,3	5,7%	27,6	29,2	5,6%	1,2	1,2	5,6%
7,8	0,8	99	99	0,3%	4,1	4,4	5,6%	28,4	29,9	5,6%	1,2	1,3	6,0%
13,2	0,7	100	100	0,4%	4,3	4,5	4,5%	29,4	30,7	4,5%	1,2	1,3	4,9%
16,5	0,7	100	100	0,4%	4,3	4,5	3,8%	29,7	30,8	3,7%	1,2	1,3	4,3%
32,1	0,5	100	100	0,3%	4,4	4,5	2,8%	30,0	30,8	2,7%	1,2	1,3	3,1%
59,2	0,4	101	100	0,6%	4,4	4,5	2,1%	30,2	30,8	2,1%	1,2	1,3	2,7%
97,2	0,4	101	100	1,0%	4,4	4,5	2,1%	30,2	30,8	1,9%	1,2	1,3	3,1%
		∅		1,9%	∅		2,8%	∅		2,7%	∅		3,2%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,0	0,3	0,3	5,6%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,8%	55,6	0,3	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	1,4%	29,6	0,4	0,3
1,3	0,8	0,4	0,4	5,9%	65,9	0,7	1,1
1,5	0,8	0,4	0,5	5,6%	61,6	0,9	1,2
1,9	0,8	0,5	0,5	7,6%	59,0	1,2	1,4
2,5	0,8	0,7	0,7	4,3%	59,1	1,5	1,7
3,5	0,8	0,9	0,9	0,5%	59,4	2,3	2,3
6,1	0,8	1,5	1,4	6,7%	59,5	4,8	3,6
7,8	0,8	1,8	1,8	3,0%	16,9	5,9	4,5
13,2	0,7	2,9	2,9	0,2%	23,1	8,4	6,4
16,5	0,7	3,7	3,7	0,5%	24,0	9,8	7,1
32,1	0,5	7,2	7,1	0,5%	29,1	15,8	10,6
59,2	0,4	13,1	13,2	0,5%	40,7	25,1	16,6
97,2	0,4	21,3	21,6	1,5%	86,0	42,0	25,0
			∅	3,0%			

Abbildung A-78. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 70

Parameter Versuchsreihe 71

Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=40$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	11	8,0%	0,4	0,4	9,7%	2,6	2,9	10,2%	1,0	1,0	1,6%
0,3	1,6	30	32	7,1%	1,1	1,2	9,6%	7,3	8,0	9,1%	1,0	1,0	2,3%
0,5	1,1	50	52	5,8%	1,8	1,9	7,7%	12,2	13,1	7,7%	1,0	1,0	1,8%
1,3	0,8	81	81	0,1%	2,9	3,0	5,0%	19,9	20,8	4,8%	1,0	1,1	4,9%
1,8	1,0	85	86	0,8%	3,1	3,3	7,9%	21,2	22,9	7,7%	1,0	1,1	7,0%
2,2	1,0	90	89	0,9%	3,3	3,5	7,0%	22,6	24,2	7,1%	1,0	1,1	8,0%
2,8	0,9	95	92	3,3%	3,5	3,7	5,6%	24,1	25,4	5,5%	1,1	1,2	9,2%
4,1	0,8	96	95	1,6%	3,7	4,0	8,4%	25,1	27,2	8,3%	1,1	1,2	10,1%
8,5	0,7	99	99	0,0%	4,0	4,4	9,9%	27,4	30,0	9,7%	1,2	1,3	9,9%
6,6	0,8	99	98	1,5%	3,9	4,3	8,3%	27,0	29,2	8,4%	1,1	1,2	9,9%
14,0	0,4	100	100	0,4%	4,3	4,6	6,0%	29,6	31,3	6,0%	1,2	1,3	6,4%
16,9	0,4	100	100	0,3%	4,4	4,6	5,6%	30,1	31,7	5,6%	1,3	1,3	5,9%
32,5	0,3	100	100	0,1%	4,6	4,8	3,5%	31,7	32,7	3,3%	1,3	1,4	3,7%
55,8	0,3	100	100	0,1%	4,8	4,9	1,7%	32,8	33,3	1,7%	1,4	1,4	1,7%
97,6	0,2	100	100	0,2%	4,9	4,9	1,2%	33,4	33,8	1,3%	1,4	1,4	1,1%
		∅		2,0%	∅		6,5%	∅		6,4%	∅		5,6%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	1,4%	0,6	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,7%	58,2	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	9,0%	31,0	0,5	0,3
1,3	0,8	0,4	0,4	3,3%	18,2	0,7	1,0
1,8	1,0	0,5	0,5	11,9%	16,8	1,0	1,3
2,2	1,0	0,6	0,6	10,6%	17,2	1,4	1,5
2,8	0,9	0,7	0,8	7,3%	22,9	2,0	1,8
4,1	0,8	1,0	1,0	1,0%	30,2	3,6	2,5
8,5	0,7	2,1	1,9	7,7%	62,1	7,9	4,6
6,6	0,8	1,6	1,6	4,1%	40,0	6,0	3,7
14,0	0,4	3,2	3,1	4,0%	66,3	11,8	7,2
16,9	0,4	3,8	3,7	3,1%	97,6	14,0	8,6
32,5	0,3	6,9	6,8	2,2%	115,3	26,9	15,9
55,8	0,3	11,7	11,5	1,7%	172,1	44,3	26,7
97,6	0,2	20,1	19,7	1,6%	307,8	88,4	45,9
			∅	4,7%			

Abbildung A-79. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 71

Parameter Versuchsreihe 72Bestandsstreuung: **mittel** ($\alpha_1=35$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,8	11	11	8,1%	0,4	0,4	9,7%	2,6	2,9	10,2%	1,0	1,0	1,6%
0,3	1,6	30	32	7,3%	1,1	1,2	9,8%	7,3	8,0	9,2%	1,0	1,0	2,3%
0,5	1,1	50	53	6,7%	1,8	1,9	8,6%	12,2	13,2	8,6%	1,0	1,0	1,8%
1,3	0,8	80	83	2,5%	2,9	3,1	7,5%	19,9	21,4	7,5%	1,0	1,1	4,9%
1,6	0,8	85	85	0,1%	3,1	3,3	5,9%	21,2	22,5	5,9%	1,0	1,1	5,8%
2,0	0,8	90	89	1,1%	3,3	3,5	5,6%	22,6	23,8	5,6%	1,0	1,1	6,7%
2,7	0,9	95	92	2,4%	3,5	3,7	5,9%	24,2	25,6	5,7%	1,1	1,2	8,5%
4,1	0,8	97	96	0,6%	3,7	4,0	8,6%	25,4	27,6	8,3%	1,1	1,2	9,3%
7,3	0,8	98	99	0,1%	3,9	4,3	10,6%	26,9	29,7	10,5%	1,1	1,3	10,5%
7,1	1,1	99	98	0,8%	3,9	4,3	9,9%	26,9	29,6	9,9%	1,1	1,3	10,8%
16,5	0,7	100	100	0,4%	4,2	4,5	6,7%	28,8	30,8	6,8%	1,2	1,3	7,2%
20,7	0,7	100	100	0,4%	4,2	4,5	6,3%	28,9	30,8	6,4%	1,2	1,3	6,7%
33,9	0,6	101	100	1,0%	4,3	4,5	5,9%	29,1	30,8	5,9%	1,2	1,3	6,9%
59,3	0,5	101	100	1,1%	4,3	4,5	4,4%	29,5	30,8	4,4%	1,2	1,3	5,6%
93,5	0,6	102	100	1,5%	4,3	4,5	4,2%	29,6	30,8	4,2%	1,2	1,3	5,8%
		∅		2,3%	∅		7,3%	∅		7,3%	∅		6,3%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,8	0,3	0,3	1,4%	0,6	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,8%	58,1	0,4	0,3
0,5	1,1	0,3	0,3	9,8%	31,0	0,5	0,3
1,3	0,8	0,4	0,4	2,0%	67,4	0,8	1,1
1,6	0,8	0,5	0,5	1,7%	64,3	1,0	1,2
2,0	0,8	0,6	0,6	2,7%	62,6	1,2	1,4
2,7	0,9	0,7	0,7	1,2%	62,2	1,7	1,9
4,1	0,8	1,1	1,0	6,8%	65,3	3,2	2,6
7,3	0,8	1,8	1,7	7,7%	16,0	5,8	4,3
7,1	1,1	1,8	1,6	6,6%	19,8	6,7	4,2
16,5	0,7	3,8	3,7	2,4%	24,6	10,5	7,1
20,7	0,7	4,7	4,6	2,7%	27,1	13,2	8,1
33,9	0,6	7,4	7,5	2,1%	43,6	17,7	11,0
59,3	0,5	13,0	13,2	1,6%	54,0	27,0	16,6
93,5	0,6	20,6	20,8	1,1%	54,9	46,0	24,2
		∅		3,4%			

Abbildung A-80. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 72

Parameter Versuchsreihe 73

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=42$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	4,4%	0,4	0,4	2,4%	2,6	2,7	3,2%	1,1	1,1	2,0%
0,3	1,6	30	32	9,4%	1,2	1,3	8,5%	7,8	8,5	8,0%	1,1	1,1	0,8%
0,6	1,2	50	55	9,4%	2,0	2,2	8,2%	13,3	14,4	8,2%	1,1	1,1	1,1%
1,5	0,8	81	83	2,4%	3,3	3,5	3,5%	21,9	22,6	3,4%	1,1	1,1	1,0%
1,9	0,8	86	86	0,9%	3,6	3,7	3,2%	23,5	24,3	3,3%	1,1	1,2	2,3%
2,4	0,8	90	90	0,1%	3,8	4,0	3,7%	25,1	26,0	3,8%	1,2	1,2	3,8%
3,5	0,8	94	94	0,8%	4,1	4,3	4,3%	27,1	28,2	4,1%	1,2	1,3	5,1%
4,2	0,8	97	95	2,1%	4,3	4,4	2,7%	28,2	28,9	2,6%	1,2	1,3	4,9%
4,9	0,8	98	96	2,0%	4,4	4,5	2,8%	29,0	29,8	2,8%	1,2	1,3	4,9%
6,6	0,8	99	98	1,4%	4,6	4,7	3,3%	29,8	30,8	3,2%	1,3	1,3	4,7%
19,7	0,6	100	100	0,1%	4,9	5,0	1,9%	32,1	32,7	2,0%	1,3	1,4	2,0%
22,4	0,6	100	100	0,1%	4,9	5,0	1,9%	32,2	32,8	1,8%	1,3	1,4	2,1%
16,5	0,6	100	100	0,3%	4,9	5,0	1,7%	32,0	32,6	1,8%	1,3	1,4	2,0%
43,3	0,5	100	100	0,2%	5,0	5,1	0,8%	32,9	33,2	0,8%	1,4	1,4	1,0%
100,8	0,5	101	100	0,8%	5,1	5,1	0,1%	33,3	33,3	0,1%	1,4	1,4	0,9%
		∅		2,3%	∅		3,3%	∅		3,3%	∅		2,6%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	9,2%	0,7	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	0,8%	1,1	0,4	0,3
0,6	1,2	0,3	0,3	3,5%	1,5	0,5	0,3
1,5	0,8	0,4	0,4	2,7%	3,0	1,0	1,1
1,9	0,8	0,5	0,5	0,2%	3,4	1,3	1,2
2,4	0,8	0,6	0,6	0,6%	4,7	1,6	1,4
3,5	0,8	0,9	0,8	4,8%	5,7	2,4	1,8
4,2	0,8	1,0	0,9	4,2%	6,6	2,7	2,1
4,9	0,8	1,1	1,1	4,0%	8,6	3,1	2,4
6,6	0,8	1,5	1,4	5,0%	12,2	4,2	3,0
19,7	0,6	4,1	3,9	3,4%	19,7	10,8	8,0
22,4	0,6	4,6	4,5	2,1%	22,8	12,1	9,0
16,5	0,6	3,4	3,3	2,4%	20,7	9,7	6,8
43,3	0,5	8,4	8,6	1,7%	35,4	23,3	17,2
100,8	0,5	19,2	19,8	3,0%	72,0	54,4	39,4
		∅		3,2%			

Abbildung A-81. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 73

Parameter Versuchsreihe 74Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=44$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	5,4%	0,4	0,4	3,3%	2,6	2,7	4,2%	1,1	1,1	2,0%
0,3	1,6	30	33	10,3%	1,2	1,3	9,3%	7,8	8,5	9,0%	1,1	1,1	0,9%
0,6	1,1	50	55	10,2%	2,0	2,2	9,1%	13,3	14,5	9,1%	1,1	1,1	1,2%
1,5	0,8	81	82	1,7%	3,3	3,4	2,9%	21,9	22,5	2,8%	1,1	1,1	1,1%
1,8	0,8	86	86	0,3%	3,6	3,7	2,8%	23,4	24,1	2,7%	1,1	1,2	2,6%
2,5	0,8	90	90	0,3%	3,8	4,0	4,0%	25,1	26,0	3,9%	1,2	1,2	4,3%
3,7	0,8	94	94	0,6%	4,1	4,3	4,8%	27,1	28,4	4,8%	1,2	1,3	5,5%
4,6	0,8	97	95	1,4%	4,3	4,5	4,4%	28,1	29,4	4,3%	1,2	1,3	5,9%
5,4	0,9	98	96	1,7%	4,4	4,6	4,1%	28,9	30,0	4,0%	1,2	1,3	5,9%
7,6	0,9	99	98	1,1%	4,6	4,7	4,4%	29,8	31,1	4,3%	1,3	1,3	5,5%
20,6	0,7	100	100	0,0%	4,8	4,9	2,4%	31,4	32,2	2,4%	1,3	1,3	2,4%
23,2	0,7	100	100	0,1%	4,8	4,9	2,2%	31,5	32,2	2,2%	1,3	1,3	2,3%
17,4	0,8	100	100	0,2%	4,8	4,9	2,3%	31,4	32,1	2,3%	1,3	1,3	2,5%
43,9	0,6	100	100	0,4%	4,9	4,9	0,7%	32,0	32,2	0,7%	1,3	1,3	1,0%
99,3	0,5	101	100	0,8%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,9%
		∅		2,3%	∅		3,8%	∅		3,8%	∅		2,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	9,2%	0,7	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	0,8%	1,2	0,4	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	5,9%	1,5	0,5	0,3
1,5	0,8	0,4	0,4	0,9%	3,1	1,0	1,1
1,8	0,8	0,5	0,5	1,0%	4,5	1,2	1,2
2,5	0,8	0,6	0,6	0,7%	6,5	1,7	1,4
3,7	0,8	0,9	0,9	5,8%	5,8	2,6	1,9
4,6	0,8	1,1	1,0	5,8%	8,3	3,2	2,3
5,4	0,9	1,2	1,2	5,8%	7,7	3,8	2,6
7,6	0,9	1,7	1,6	6,7%	9,5	5,3	3,4
20,6	0,7	4,4	4,2	3,9%	15,1	9,8	6,4
23,2	0,7	4,9	4,7	2,5%	15,5	10,4	7,0
17,4	0,8	3,7	3,6	3,1%	16,1	10,0	5,8
43,9	0,6	8,6	8,9	3,5%	21,3	17,7	11,2
99,3	0,5	19,4	20,2	4,1%	40,6	37,6	22,5
		∅		4,0%			

Abbildung A-82. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 74

Parameter Versuchsreihe 75
 Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=37$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	6,5%	0,4	0,4	10,3%	2,5	2,7	11,7%	1,1	1,1	3,6%
0,3	1,6	29	33	12,1%	1,1	1,3	17,9%	7,4	8,7	17,4%	1,0	1,1	5,1%
0,6	1,1	50	56	11,6%	1,9	2,2	17,0%	12,6	14,7	16,9%	1,0	1,1	4,7%
1,4	0,8	81	84	3,4%	3,2	3,5	9,3%	20,9	22,8	9,3%	1,1	1,1	5,7%
1,8	0,8	85	87	1,6%	3,4	3,7	8,2%	22,4	24,3	8,2%	1,1	1,2	6,5%
2,2	0,8	90	90	0,1%	3,7	3,9	7,0%	24,0	25,7	6,9%	1,1	1,2	7,1%
3,1	0,7	94	93	0,9%	4,0	4,2	6,2%	26,2	27,8	6,2%	1,2	1,2	7,2%
3,6	0,7	97	95	2,4%	4,2	4,3	4,0%	27,4	28,5	3,9%	1,2	1,3	6,6%
4,1	0,7	98	95	2,6%	4,3	4,4	3,7%	28,0	29,1	3,7%	1,2	1,3	6,5%
5,3	0,7	99	97	1,9%	4,5	4,6	3,6%	29,2	30,2	3,5%	1,2	1,3	5,6%
14,1	0,6	100	100	0,3%	4,8	5,0	2,3%	31,8	32,5	2,2%	1,3	1,4	2,6%
16,8	0,6	100	100	0,2%	4,9	5,0	2,0%	32,0	32,6	2,0%	1,3	1,4	2,2%
13,3	0,6	100	100	0,4%	4,9	4,9	1,9%	31,8	32,4	1,9%	1,3	1,4	2,3%
42,1	0,5	100	100	0,2%	5,0	5,1	0,8%	32,9	33,2	0,8%	1,4	1,4	1,0%
100,3	0,5	101	100	0,7%	5,1	5,1	0,1%	33,3	33,3	0,1%	1,4	1,4	0,8%
		∅		3,0%	∅		6,3%	∅		6,3%	∅		4,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	1,0%	0,8	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	3,1%	1,3	0,5	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	8,6%	1,5	0,6	0,3
1,4	0,8	0,5	0,4	8,0%	2,7	1,0	1,1
1,8	0,8	0,5	0,5	4,9%	3,3	1,2	1,2
2,2	0,8	0,6	0,6	4,6%	4,4	1,4	1,3
3,1	0,7	0,8	0,7	6,1%	5,3	2,0	1,7
3,6	0,7	0,9	0,8	4,9%	6,0	2,2	1,9
4,1	0,7	1,0	0,9	4,1%	7,7	2,5	2,0
5,3	0,7	1,2	1,1	4,7%	9,1	3,1	2,5
14,1	0,6	2,9	2,8	3,4%	18,2	7,8	5,9
16,8	0,6	3,5	3,4	2,6%	20,0	9,1	7,0
13,3	0,6	2,8	2,7	2,4%	18,3	7,6	5,6
42,1	0,5	8,2	8,3	1,2%	35,9	22,6	16,9
100,3	0,5	19,2	19,7	2,6%	70,5	53,6	39,6
			∅	4,2%			

Abbildung A-83. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 75

Parameter Versuchsreihe 76Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=40$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	11	6,6%	0,4	0,4	10,4%	2,5	2,8	11,8%	1,1	1,1	3,6%
0,3	1,6	29	33	12,0%	1,1	1,3	17,8%	7,4	8,7	17,2%	1,0	1,1	5,2%
0,6	1,1	50	56	11,2%	1,9	2,2	16,5%	12,6	14,7	16,6%	1,0	1,1	4,7%
1,5	0,8	81	83	2,9%	3,2	3,5	9,7%	20,7	22,7	9,6%	1,1	1,1	6,5%
1,8	0,8	86	87	1,3%	3,4	3,7	8,9%	22,3	24,3	8,9%	1,1	1,2	7,5%
2,3	0,8	90	90	0,3%	3,6	3,9	8,2%	23,9	25,8	8,1%	1,1	1,2	8,5%
3,3	0,8	94	94	0,9%	4,0	4,3	8,2%	25,9	28,0	8,0%	1,1	1,2	9,2%
3,9	0,7	97	95	2,4%	4,1	4,4	6,0%	27,1	28,7	5,9%	1,2	1,3	8,5%
4,5	0,7	98	96	2,3%	4,2	4,5	5,9%	27,8	29,4	5,9%	1,2	1,3	8,4%
5,8	0,8	99	97	1,7%	4,4	4,6	5,9%	28,8	30,5	5,8%	1,2	1,3	7,7%
15,2	0,6	100	100	0,2%	4,8	4,9	3,1%	31,2	32,1	3,1%	1,3	1,3	3,4%
17,9	0,6	100	100	0,1%	4,8	4,9	2,8%	31,3	32,2	2,7%	1,3	1,3	3,0%
13,6	0,7	100	100	0,4%	4,7	4,9	3,2%	31,1	32,1	3,1%	1,3	1,3	3,6%
42,7	0,6	100	100	0,3%	4,9	4,9	0,9%	32,0	32,2	0,8%	1,3	1,3	1,2%
99,3	0,5	101	100	0,8%	4,9	4,9	0,0%	32,2	32,2	0,0%	1,3	1,3	0,9%
		∅		2,9%	∅		7,2%	∅		7,2%	∅		5,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	1,0%	0,8	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	3,1%	1,3	0,5	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	8,6%	1,5	0,6	0,3
1,5	0,8	0,5	0,4	8,4%	2,9	1,0	1,1
1,8	0,8	0,5	0,5	6,1%	4,0	1,2	1,2
2,3	0,8	0,6	0,6	5,2%	4,5	1,5	1,4
3,3	0,8	0,8	0,8	8,1%	7,2	2,2	1,8
3,9	0,7	1,0	0,9	7,5%	6,2	2,5	2,0
4,5	0,7	1,1	1,0	6,9%	7,2	2,9	2,2
5,8	0,8	1,4	1,3	7,3%	7,7	3,7	2,7
15,2	0,6	3,2	3,1	4,4%	13,3	7,5	5,3
17,9	0,6	3,8	3,6	3,8%	14,7	8,8	5,9
13,6	0,7	2,9	2,8	3,9%	13,2	7,4	5,0
42,7	0,6	8,5	8,7	2,6%	20,1	16,8	10,9
99,3	0,5	19,4	20,2	4,1%	40,6	37,6	22,5
		∅		5,4%			

Abbildung A-84. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 76

Parameter Versuchsreihe 77

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=69$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	5,9%	0,4	0,4	2,0%	3,1	3,0	2,2%	1,3	1,2	7,5%
0,3	1,6	29	32	9,5%	1,3	1,4	1,7%	9,2	9,4	1,4%	1,3	1,2	7,3%
0,6	1,1	50	54	8,4%	2,3	2,4	4,3%	15,6	16,3	4,4%	1,3	1,3	3,8%
1,6	0,9	81	80	1,0%	3,7	3,8	1,5%	25,7	26,0	1,5%	1,3	1,4	2,5%
2,2	1,0	86	85	1,1%	4,0	4,0	2,2%	27,4	28,0	2,1%	1,3	1,4	3,3%
3,8	1,0	90	91	0,7%	4,2	4,4	4,6%	29,2	30,5	4,5%	1,3	1,4	3,8%
8,2	1,2	95	97	1,8%	4,5	4,8	6,1%	31,1	32,9	6,0%	1,4	1,4	4,2%
12,0	1,1	97	98	1,3%	4,6	4,9	5,0%	32,1	33,6	4,9%	1,4	1,4	3,7%
15,5	1,0	98	99	0,9%	4,7	4,9	4,3%	32,6	34,0	4,1%	1,4	1,4	3,4%
24,6	1,0	99	100	0,7%	4,8	5,0	3,1%	33,4	34,4	3,0%	1,4	1,4	2,5%
36,9	0,8	100	100	0,3%	4,9	5,0	2,0%	33,8	34,5	2,0%	1,4	1,4	2,4%
39,0	0,8	100	100	0,5%	4,9	5,0	2,1%	33,9	34,5	1,9%	1,4	1,4	2,6%
38,6	0,8	100	100	0,5%	4,9	5,0	1,8%	33,9	34,5	1,8%	1,4	1,4	2,3%
47,8	0,6	100	100	0,5%	5,0	5,0	0,6%	34,4	34,6	0,4%	1,4	1,4	1,0%
100,7	0,5	101	100	0,9%	5,0	5,0	0,2%	34,7	34,7	0,0%	1,4	1,4	1,1%
		∅		2,3%	∅		2,8%	∅		2,7%	∅		3,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,2	0,3	25,2%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,2	0,3	19,1%	0,8	0,4	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	8,4%	1,7	0,5	0,4
1,6	0,9	0,4	0,4	0,7%	10,3	0,9	3,1
2,2	1,0	0,6	0,6	0,2%	11,9	1,4	4,0
3,8	1,0	0,9	0,9	1,2%	22,1	2,4	6,4
8,2	1,2	1,9	1,7	7,6%	50,7	6,1	12,9
12,0	1,1	2,7	2,5	7,8%	66,5	7,4	18,6
15,5	1,0	3,4	3,2	7,1%	67,6	9,7	23,9
24,6	1,0	5,2	5,0	4,6%	98,3	16,0	37,5
36,9	0,8	7,4	7,4	0,2%	111,8	30,8	56,1
39,0	0,8	7,6	7,8	3,0%	116,8	28,5	59,1
38,6	0,8	7,7	7,7	0,8%	122,7	30,8	58,6
47,8	0,6	9,5	9,6	1,2%	157,8	40,3	72,6
100,7	0,5	19,0	20,1	5,6%	247,1	86,2	152,7
		∅		6,2%			

Abbildung A-85. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 77

Parameter Versuchsreihe 78Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=68$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	5,9%	0,4	0,4	2,0%	3,1	3,0	2,2%	1,3	1,2	7,5%
0,3	1,6	29	32	9,5%	1,3	1,4	1,7%	9,2	9,4	1,5%	1,3	1,2	7,3%
0,6	1,2	50	54	7,9%	2,3	2,3	3,8%	15,6	16,2	3,8%	1,3	1,3	3,9%
1,6	0,9	81	80	0,8%	3,7	3,8	1,7%	25,7	26,1	1,8%	1,3	1,4	2,5%
2,2	1,0	86	85	0,9%	4,0	4,1	2,4%	27,4	28,0	2,3%	1,3	1,4	3,3%
3,8	1,1	90	91	0,9%	4,2	4,4	4,8%	29,2	30,6	4,7%	1,3	1,4	3,8%
9,3	1,3	95	97	2,4%	4,5	4,8	7,0%	31,1	33,2	6,9%	1,4	1,4	4,5%
14,0	1,2	97	99	1,7%	4,6	4,9	5,4%	32,1	33,8	5,3%	1,4	1,4	3,6%
19,9	1,1	98	99	1,4%	4,7	4,9	4,4%	32,6	34,0	4,3%	1,4	1,4	2,9%
30,9	1,0	99	100	0,6%	4,8	4,9	3,1%	33,1	34,2	3,1%	1,4	1,4	2,5%
44,1	0,8	100	100	0,6%	4,8	4,9	2,1%	33,5	34,2	2,1%	1,4	1,4	2,7%
45,6	0,8	101	100	0,7%	4,9	4,9	1,9%	33,6	34,2	1,9%	1,4	1,4	2,6%
42,7	0,8	101	100	0,6%	4,9	4,9	1,7%	33,6	34,2	1,7%	1,4	1,4	2,3%
51,6	0,7	101	100	0,6%	4,9	4,9	0,5%	34,1	34,2	0,5%	1,4	1,4	1,1%
101,1	0,5	101	100	0,7%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,9%
		∅		2,3%		∅	2,9%		∅	2,8%		∅	3,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,2	0,3	25,2%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,2	0,3	19,1%	0,8	0,4	0,3
0,6	1,2	0,3	0,3	7,9%	1,7	0,5	0,3
1,6	0,9	0,4	0,4	1,0%	10,6	0,9	0,7
2,2	1,0	0,6	0,6	0,4%	12,5	1,4	0,9
3,8	1,1	0,9	0,9	0,4%	21,1	2,6	1,2
9,3	1,3	2,1	1,9	8,2%	24,4	8,0	2,4
14,0	1,2	3,1	2,9	7,8%	26,5	10,5	3,4
19,9	1,1	4,3	4,1	6,4%	31,2	14,0	4,5
30,9	1,0	6,3	6,3	0,9%	34,2	18,7	6,7
44,1	0,8	8,5	8,9	4,5%	38,6	21,2	9,4
45,6	0,8	8,8	9,2	4,9%	39,0	21,6	9,7
42,7	0,8	8,3	8,6	4,4%	36,4	20,7	9,1
51,6	0,7	9,9	10,4	5,2%	39,0	22,3	10,9
101,1	0,5	19,7	20,4	3,7%	53,4	36,7	20,9
			∅	6,7%			

Abbildung A-86. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 78

Parameter Versuchsreihe 79

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=66$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **3**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	6,6%	0,4	0,5	7,6%	3,0	3,3	8,5%	1,3	1,3	1,0%
0,3	1,6	29	32	10,3%	1,3	1,5	12,0%	9,1	10,2	12,1%	1,3	1,3	1,5%
0,6	1,1	50	54	8,8%	2,2	2,5	10,6%	15,5	17,1	10,7%	1,3	1,3	1,6%
1,6	0,9	81	80	0,9%	3,7	3,8	2,5%	25,4	26,0	2,4%	1,3	1,4	3,3%
2,2	1,0	86	85	1,0%	3,9	4,0	3,0%	27,2	27,9	2,9%	1,3	1,4	4,1%
3,5	1,0	90	91	0,5%	4,2	4,4	4,8%	29,0	30,4	4,8%	1,3	1,4	4,3%
7,5	1,2	95	96	1,7%	4,5	4,7	6,4%	30,9	32,8	6,3%	1,4	1,4	4,7%
10,2	1,0	97	98	0,9%	4,6	4,8	5,1%	31,9	33,4	4,9%	1,4	1,4	4,1%
14,7	1,0	98	99	0,9%	4,7	4,9	4,7%	32,5	34,0	4,5%	1,4	1,4	3,7%
21,3	1,0	99	100	0,6%	4,8	5,0	3,2%	33,3	34,3	3,0%	1,4	1,4	2,6%
34,2	0,8	100	100	0,3%	4,9	5,0	2,2%	33,8	34,5	2,0%	1,4	1,4	2,5%
36,5	0,7	100	100	0,4%	4,9	5,0	2,0%	33,9	34,5	2,0%	1,4	1,4	2,5%
36,9	0,8	100	100	0,4%	4,9	5,0	1,8%	33,9	34,5	1,7%	1,4	1,4	2,3%
47,8	0,6	100	100	0,5%	5,0	5,0	0,6%	34,4	34,6	0,5%	1,4	1,4	1,1%
100,7	0,5	101	100	0,9%	5,0	5,0	0,2%	34,7	34,7	0,0%	1,4	1,4	1,1%
		∅		2,3%	∅		4,4%	∅		4,4%	∅		2,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,2	0,3	25,0%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,2	0,3	18,5%	0,8	0,4	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	8,7%	1,7	0,5	0,4
1,6	0,9	0,4	0,4	1,7%	9,6	0,9	3,1
2,2	1,0	0,5	0,5	1,0%	12,4	1,3	3,9
3,5	1,0	0,8	0,8	1,5%	17,6	2,3	5,9
7,5	1,2	1,7	1,6	7,7%	51,0	5,3	11,9
10,2	1,0	2,3	2,1	7,6%	49,0	6,7	15,9
14,7	1,0	3,2	3,0	7,6%	61,9	8,7	22,5
21,3	1,0	4,6	4,3	5,6%	92,2	14,1	32,5
34,2	0,8	6,8	6,9	0,3%	113,5	26,0	52,0
36,5	0,7	7,3	7,3	0,5%	115,4	28,2	55,5
36,9	0,8	7,2	7,4	2,8%	118,1	26,1	56,1
47,8	0,6	9,5	9,6	0,7%	157,3	40,5	72,5
100,7	0,5	19,0	20,1	5,6%	247,1	86,2	152,7
		∅		6,3%			

Abbildung A-87. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 79

Parameter Versuchsreihe 80Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=66$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **3**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	6,4%	0,4	0,4	1,5%	3,0	3,0	0,7%	1,3	1,2	7,4%
0,3	1,6	29	32	10,2%	1,3	1,4	3,0%	9,1	9,4	3,2%	1,3	1,2	6,6%
0,6	1,1	50	54	8,7%	2,2	2,4	5,6%	15,5	16,4	5,7%	1,3	1,3	3,0%
1,6	0,9	81	80	0,8%	3,7	3,8	2,6%	25,4	26,0	2,6%	1,3	1,4	3,4%
2,2	1,0	86	85	0,9%	3,9	4,0	3,3%	27,2	28,0	3,1%	1,3	1,4	4,2%
3,6	1,0	90	91	0,7%	4,2	4,4	5,4%	29,0	30,5	5,2%	1,3	1,4	4,6%
8,9	1,3	95	97	2,4%	4,5	4,8	7,6%	30,9	33,2	7,5%	1,4	1,4	5,1%
11,1	1,1	97	98	1,1%	4,6	4,8	5,3%	31,8	33,5	5,4%	1,4	1,4	4,2%
17,0	1,1	98	99	1,2%	4,7	4,9	4,9%	32,4	33,9	4,8%	1,4	1,4	3,6%
27,0	1,0	99	100	0,7%	4,8	4,9	3,3%	33,1	34,2	3,3%	1,4	1,4	2,6%
41,1	0,8	100	100	0,5%	4,8	4,9	2,3%	33,4	34,2	2,3%	1,4	1,4	2,8%
42,8	0,8	101	100	0,6%	4,8	4,9	2,1%	33,5	34,2	2,1%	1,4	1,4	2,7%
41,0	0,8	100	100	0,6%	4,9	4,9	1,9%	33,6	34,2	1,9%	1,4	1,4	2,5%
52,7	0,7	101	100	0,6%	4,9	4,9	0,7%	34,0	34,2	0,6%	1,4	1,4	1,4%
101,0	0,5	101	100	0,7%	4,9	4,9	0,1%	34,2	34,2	0,1%	1,4	1,4	0,9%
		∅		2,4%		∅	3,3%		∅	3,2%		∅	3,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,2	0,3	25,1%	0,6	0,3	0,3
0,3	1,6	0,2	0,3	18,9%	0,8	0,4	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	8,6%	1,7	0,5	0,3
1,6	0,9	0,4	0,4	1,2%	9,6	0,9	0,7
2,2	1,0	0,6	0,5	1,7%	12,9	1,3	0,8
3,6	1,0	0,8	0,8	0,8%	20,9	2,4	1,1
8,9	1,3	2,0	1,9	9,0%	23,4	8,0	2,3
11,1	1,1	2,5	2,3	7,8%	25,2	8,3	2,8
17,0	1,1	3,8	3,5	7,7%	26,7	11,3	4,0
27,0	1,0	5,6	5,5	3,0%	33,9	16,7	6,0
41,1	0,8	8,0	8,3	3,6%	37,2	19,8	8,8
42,8	0,8	8,3	8,7	3,8%	37,6	20,1	9,1
41,0	0,8	8,0	8,3	4,1%	36,1	19,8	8,8
52,7	0,7	10,1	10,7	5,1%	39,5	22,8	11,1
101,0	0,5	19,7	20,4	3,7%	53,4	37,0	20,9
			∅	6,9%			

Abbildung A-88. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 80

Parameter Versuchsreihe 81

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=46$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	3,4%	0,4	0,4	1,8%	2,5	2,5	1,9%	1,0	1,0	1,6%
0,3	1,6	30	32	9,2%	1,1	1,2	7,8%	7,3	7,9	7,9%	1,0	1,0	1,3%
0,6	1,2	50	55	8,8%	1,9	2,0	7,5%	12,5	13,4	7,4%	1,0	1,0	1,2%
1,5	0,8	81	82	1,4%	3,0	3,1	0,6%	20,2	20,4	0,6%	1,0	1,0	0,7%
1,9	0,8	86	86	0,0%	3,3	3,2	0,2%	21,6	21,6	0,2%	1,1	1,1	0,2%
2,7	0,9	90	90	0,0%	3,5	3,5	1,0%	23,1	23,3	1,0%	1,1	1,1	1,0%
4,0	0,8	95	94	0,7%	3,7	3,8	1,2%	24,8	25,1	1,1%	1,1	1,1	1,9%
4,6	0,8	97	95	1,8%	3,8	3,9	0,6%	25,6	25,7	0,5%	1,1	1,1	2,5%
5,0	0,7	98	96	2,3%	3,9	3,9	0,1%	26,1	26,1	0,1%	1,1	1,1	2,3%
6,4	0,6	99	97	1,9%	4,1	4,1	0,7%	27,0	27,2	0,7%	1,1	1,2	2,6%
12,0	0,4	100	99	0,9%	4,4	4,5	1,7%	29,2	29,7	1,6%	1,2	1,2	2,6%
14,8	0,4	100	100	0,6%	4,5	4,6	1,9%	29,9	30,5	1,7%	1,2	1,3	2,5%
13,0	0,4	100	99	0,8%	4,5	4,5	1,2%	29,6	30,0	1,1%	1,2	1,3	2,0%
45,3	0,3	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,8%	32,5	32,7	0,6%	1,4	1,4	0,8%
99,6	0,3	100	100	0,4%	5,0	5,0	0,3%	33,3	33,4	0,2%	1,4	1,4	0,7%
		∅		2,2%	∅		1,8%	∅		1,8%	∅		1,6%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	2,7%	0,8	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	4,1%	1,4	0,5	0,3
0,6	1,2	0,3	0,3	7,9%	2,5	0,5	0,3
1,5	0,8	0,5	0,5	0,1%	5,6	1,2	1,0
1,9	0,8	0,6	0,6	2,2%	6,8	1,6	1,2
2,7	0,9	0,7	0,8	6,9%	7,0	2,3	1,6
4,0	0,8	1,0	1,0	0,9%	9,1	3,3	2,2
4,6	0,8	1,2	1,2	0,1%	13,0	3,7	2,5
5,0	0,7	1,3	1,3	1,3%	9,1	3,7	2,7
6,4	0,6	1,6	1,6	0,0%	11,3	4,5	3,3
12,0	0,4	2,7	2,7	1,4%	14,0	6,5	5,6
14,8	0,4	3,3	3,2	1,2%	13,9	7,8	6,7
13,0	0,4	2,9	2,9	1,3%	12,4	6,8	5,9
45,3	0,3	9,3	9,2	0,4%	34,1	20,8	18,6
99,6	0,3	19,6	19,9	1,6%	64,2	48,5	39,9
			∅	2,1%			

Abbildung A-89. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 81

Parameter Versuchsreihe 82Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=48$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	3,4%	0,4	0,4	1,8%	2,5	2,5	1,9%	1,0	1,0	1,6%
0,3	1,6	30	32	9,2%	1,1	1,2	7,8%	7,3	7,9	7,8%	1,0	1,0	1,3%
0,6	1,1	50	54	8,6%	1,9	2,0	7,3%	12,5	13,4	7,3%	1,0	1,0	1,2%
1,5	0,9	81	82	1,0%	3,0	3,1	0,4%	20,2	20,3	0,3%	1,0	1,0	0,7%
1,9	0,9	86	86	0,1%	3,3	3,3	0,2%	21,7	21,7	0,0%	1,1	1,1	0,1%
2,7	1,0	90	90	0,1%	3,5	3,5	1,2%	23,1	23,4	1,2%	1,1	1,1	1,3%
4,2	0,9	95	94	0,6%	3,7	3,8	1,9%	24,8	25,2	1,8%	1,1	1,1	2,5%
5,1	0,8	97	96	1,3%	3,9	3,9	1,9%	25,6	26,1	1,9%	1,1	1,1	3,2%
5,7	0,8	98	96	1,7%	3,9	4,0	2,0%	26,1	26,6	1,9%	1,1	1,2	3,8%
6,9	0,7	99	97	1,7%	4,0	4,1	2,2%	26,9	27,5	2,3%	1,1	1,2	4,0%
17,1	0,6	100	100	0,4%	4,3	4,4	2,9%	28,5	29,3	2,8%	1,2	1,2	3,3%
17,5	0,7	100	100	0,4%	4,3	4,4	2,9%	28,5	29,3	2,7%	1,2	1,2	3,3%
23,7	0,7	100	100	0,3%	4,3	4,4	2,4%	28,7	29,4	2,3%	1,2	1,2	2,6%
47,7	0,5	100	100	0,4%	4,4	4,4	0,6%	29,2	29,4	0,6%	1,2	1,2	1,1%
92,8	0,4	101	100	0,6%	4,4	4,4	0,2%	29,4	29,4	0,2%	1,2	1,2	0,8%
		∅		2,0%	∅		2,4%	∅		2,3%	∅		2,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	2,7%	0,8	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	4,1%	0,9	0,5	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	7,7%	1,9	0,6	0,3
1,5	0,9	0,5	0,5	1,0%	3,5	1,1	1,0
1,9	0,9	0,6	0,6	3,4%	7,1	1,4	1,3
2,7	1,0	0,7	0,8	6,9%	10,5	2,0	1,7
4,2	0,9	1,1	1,1	0,9%	10,9	3,2	2,3
5,1	0,8	1,3	1,3	1,2%	11,6	3,8	2,7
5,7	0,8	1,4	1,4	1,4%	12,6	4,0	3,0
6,9	0,7	1,7	1,7	1,8%	11,7	4,7	3,5
17,1	0,6	4,0	3,9	3,5%	15,5	9,4	6,3
17,5	0,7	4,1	4,0	3,0%	16,3	10,1	6,4
23,7	0,7	5,5	5,4	3,1%	18,5	12,8	7,8
47,7	0,5	10,5	10,8	3,0%	23,6	19,8	13,2
92,8	0,4	20,4	21,0	3,0%	38,6	35,7	23,5
			∅	3,1%			

Abbildung A-90. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 82

Parameter Versuchsreihe 83

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=43$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	4,0%	0,3	0,4	11,5%	2,3	2,5	11,7%	1,0	1,0	7,2%
0,3	1,6	30	32	9,7%	1,0	1,2	18,2%	6,8	7,9	17,7%	0,9	1,0	7,7%
0,6	1,2	50	55	9,2%	1,7	2,0	17,5%	11,5	13,5	17,3%	1,0	1,0	7,5%
1,5	0,8	81	83	2,3%	2,8	3,1	9,8%	18,8	20,6	9,6%	1,0	1,0	7,3%
1,9	0,8	86	86	0,7%	3,0	3,3	8,2%	20,1	21,8	8,1%	1,0	1,1	7,4%
2,5	0,9	90	90	0,2%	3,2	3,5	8,1%	21,5	23,2	8,0%	1,0	1,1	7,9%
3,4	0,7	95	93	1,5%	3,5	3,7	5,6%	23,2	24,5	5,5%	1,0	1,1	7,3%
3,9	0,7	97	94	2,6%	3,6	3,8	3,8%	24,2	25,1	3,9%	1,0	1,1	6,6%
4,3	0,6	98	95	3,2%	3,7	3,8	3,3%	24,7	25,5	3,2%	1,0	1,1	6,6%
5,4	0,6	99	96	2,7%	3,8	4,0	3,8%	25,6	26,5	3,5%	1,1	1,1	6,6%
8,6	0,4	100	98	1,6%	4,2	4,3	2,6%	27,8	28,5	2,6%	1,2	1,2	4,3%
8,6	0,4	100	98	1,7%	4,2	4,3	2,7%	27,8	28,5	2,6%	1,2	1,2	4,4%
11,5	0,4	100	99	1,0%	4,4	4,4	2,2%	29,0	29,6	2,1%	1,2	1,2	3,2%
45,1	0,3	100	100	0,0%	4,9	4,9	0,8%	32,5	32,7	0,6%	1,4	1,4	0,8%
99,6	0,3	100	100	0,4%	5,0	5,0	0,3%	33,3	33,4	0,2%	1,4	1,4	0,7%
		∅		2,7%	∅		6,6%	∅		6,4%	∅		5,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	7,6%	0,9	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	13,2%	1,7	0,5	0,3
0,6	1,2	0,4	0,3	16,4%	2,4	0,6	0,3
1,5	0,8	0,5	0,5	7,4%	5,2	1,3	1,0
1,9	0,8	0,6	0,6	5,2%	7,7	1,7	1,2
2,5	0,9	0,7	0,7	0,4%	9,6	2,3	1,6
3,4	0,7	1,0	0,9	5,9%	8,2	2,9	1,9
3,9	0,7	1,1	1,0	5,4%	10,0	3,2	2,2
4,3	0,6	1,2	1,1	3,8%	9,4	3,3	2,4
5,4	0,6	1,4	1,3	2,4%	11,4	3,8	2,8
8,6	0,4	2,0	2,0	1,4%	10,6	5,1	4,2
8,6	0,4	2,0	2,0	1,3%	12,1	5,2	4,2
11,5	0,4	2,6	2,6	1,9%	15,6	6,5	5,4
45,1	0,3	9,2	9,2	0,5%	34,1	21,0	18,6
99,6	0,3	19,5	19,9	1,8%	62,5	47,7	39,9
			∅	5,0%			

Abbildung A-91. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 83

Parameter Versuchsreihe 84Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=46$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	4,0%	0,3	0,4	11,5%	2,3	2,5	11,7%	1,0	1,0	7,2%
0,3	1,6	30	32	9,6%	1,0	1,2	18,1%	6,8	7,9	17,6%	0,9	1,0	7,8%
0,6	1,1	50	55	9,6%	1,7	2,0	17,9%	11,5	13,5	17,7%	0,9	1,0	7,5%
1,5	0,8	81	82	1,6%	2,8	3,1	9,0%	18,8	20,5	8,9%	1,0	1,0	7,2%
1,9	0,8	86	86	0,1%	3,0	3,2	7,9%	20,1	21,6	7,6%	1,0	1,1	7,8%
2,7	1,0	90	91	0,4%	3,2	3,5	9,0%	21,5	23,4	8,9%	1,0	1,1	8,5%
3,8	0,8	94	94	0,7%	3,5	3,7	7,4%	23,2	24,9	7,2%	1,0	1,1	8,2%
4,1	0,7	97	94	2,5%	3,6	3,8	5,3%	24,0	25,2	5,1%	1,0	1,1	8,0%
4,7	0,6	98	95	2,9%	3,7	3,9	4,7%	24,7	25,8	4,5%	1,0	1,1	7,7%
5,6	0,6	99	96	2,8%	3,8	4,0	4,6%	25,4	26,6	4,6%	1,1	1,2	7,7%
9,4	0,5	100	99	1,6%	4,1	4,3	5,5%	27,2	28,7	5,5%	1,1	1,2	7,2%
10,0	0,5	100	99	1,5%	4,1	4,3	5,4%	27,4	28,8	5,3%	1,1	1,2	7,0%
19,9	0,6	100	100	0,3%	4,3	4,4	3,0%	28,5	29,4	3,0%	1,2	1,2	3,4%
47,9	0,5	100	100	0,4%	4,4	4,4	0,9%	29,2	29,4	0,7%	1,2	1,2	1,3%
92,6	0,4	101	100	0,6%	4,4	4,4	0,2%	29,4	29,4	0,2%	1,2	1,2	0,8%
		∅		2,6%	∅		7,4%	∅		7,2%	∅		6,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	7,6%	0,9	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	13,2%	1,1	0,5	0,3
0,6	1,1	0,4	0,3	15,5%	1,8	0,6	0,3
1,5	0,8	0,5	0,5	6,8%	3,6	1,2	1,0
1,9	0,8	0,6	0,6	6,2%	5,9	1,4	1,2
2,7	1,0	0,8	0,8	0,9%	7,3	2,1	1,6
3,8	0,8	1,1	1,0	8,2%	7,9	3,1	2,1
4,1	0,7	1,2	1,1	6,4%	8,4	3,0	2,3
4,7	0,6	1,3	1,2	4,6%	8,6	3,2	2,5
5,6	0,6	1,4	1,4	2,5%	8,5	3,5	2,9
9,4	0,5	2,3	2,2	4,9%	12,4	5,5	4,5
10,0	0,5	2,4	2,3	3,5%	13,3	5,8	4,7
19,9	0,6	4,7	4,5	4,3%	17,0	11,2	7,0
47,9	0,5	10,6	10,9	2,6%	23,5	19,5	13,3
92,6	0,4	20,3	21,0	3,1%	38,6	35,7	23,4
			∅	6,0%			

Abbildung A-92. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 84

Parameter Versuchsreihe 85

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=44$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	5,4%	0,4	0,4	5,0%	2,6	2,7	3,8%	1,1	1,1	0,4%
0,3	1,6	30	33	10,1%	1,2	1,3	8,3%	7,8	8,5	8,3%	1,1	1,1	1,6%
0,6	1,1	50	55	9,6%	2,0	2,2	7,8%	13,3	14,3	7,8%	1,1	1,1	1,7%
1,6	1,0	81	84	4,3%	3,3	3,5	6,1%	21,6	22,9	6,0%	1,1	1,1	1,8%
2,0	0,9	86	87	1,7%	3,5	3,7	4,4%	23,1	24,1	4,5%	1,1	1,2	2,7%
2,6	0,9	90	90	0,0%	3,8	3,9	3,7%	24,7	25,6	3,7%	1,1	1,2	3,7%
3,8	0,8	95	94	0,8%	4,0	4,2	3,8%	26,5	27,4	3,8%	1,2	1,2	4,5%
4,6	0,8	97	95	1,3%	4,2	4,3	3,5%	27,4	28,3	3,3%	1,2	1,2	4,9%
5,6	0,8	98	97	1,4%	4,3	4,4	3,4%	28,1	29,0	3,2%	1,2	1,2	4,8%
7,0	0,8	99	98	1,2%	4,4	4,5	3,2%	28,8	29,7	3,1%	1,2	1,3	4,5%
18,6	0,5	100	100	0,2%	4,7	4,8	2,1%	31,0	31,7	2,1%	1,3	1,3	2,2%
20,7	0,5	100	100	0,2%	4,8	4,8	1,9%	31,2	31,8	1,9%	1,3	1,3	2,1%
15,3	0,6	100	100	0,4%	4,7	4,8	2,0%	30,8	31,4	1,9%	1,3	1,3	2,4%
44,0	0,4	100	100	0,1%	4,9	5,0	0,8%	32,3	32,5	0,7%	1,3	1,4	0,8%
101,1	0,4	100	100	0,5%	5,0	5,0	0,3%	32,9	33,0	0,2%	1,4	1,4	0,8%
		∅		2,5%	∅		3,8%	∅		3,6%	∅		2,6%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	9,3%	0,7	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,0%	1,4	0,4	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	6,2%	1,6	0,5	0,3
1,6	1,0	0,4	0,5	6,7%	7,6	1,0	1,4
2,0	0,9	0,5	0,5	5,6%	11,6	1,2	1,6
2,6	0,9	0,6	0,7	4,2%	14,7	1,7	1,9
3,8	0,8	0,9	0,9	0,5%	16,4	2,7	2,6
4,6	0,8	1,1	1,1	1,3%	21,5	3,4	3,1
5,6	0,8	1,3	1,3	1,7%	22,0	4,2	3,6
7,0	0,8	1,6	1,6	2,7%	51,9	5,0	4,5
18,6	0,5	4,0	3,9	2,9%	52,6	11,2	11,1
20,7	0,5	4,4	4,3	2,7%	54,0	12,2	12,3
15,3	0,6	3,3	3,2	2,1%	42,7	9,9	9,2
44,0	0,4	8,9	8,9	0,3%	126,3	25,3	25,7
101,1	0,4	19,8	20,1	1,6%	144,3	53,1	58,6
		∅		3,3%			

Abbildung A-93. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 85

Parameter Versuchsreihe 86Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=44$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	5,4%	0,4	0,4	2,6%	2,6	2,6	1,4%	1,1	1,1	2,6%
0,3	1,6	30	33	10,1%	1,2	1,3	5,8%	7,8	8,3	5,8%	1,1	1,1	3,8%
0,6	1,2	50	55	9,5%	2,0	2,1	5,6%	13,3	14,0	5,6%	1,1	1,1	3,8%
1,6	1,0	81	84	4,2%	3,3	3,5	6,0%	21,6	22,9	5,8%	1,1	1,1	1,7%
2,0	1,0	86	87	1,8%	3,5	3,7	4,7%	23,2	24,2	4,5%	1,1	1,2	2,8%
2,5	0,9	90	90	0,1%	3,8	3,9	3,5%	24,7	25,6	3,3%	1,1	1,2	3,7%
3,7	0,8	95	94	0,9%	4,0	4,2	3,3%	26,5	27,4	3,3%	1,2	1,2	4,3%
4,9	0,9	97	96	0,8%	4,2	4,3	4,3%	27,4	28,5	4,1%	1,2	1,2	5,2%
6,0	1,0	98	97	0,9%	4,3	4,4	4,7%	27,9	29,2	4,5%	1,2	1,3	5,7%
10,1	0,9	99	99	0,2%	4,4	4,6	5,0%	29,1	30,5	4,9%	1,2	1,3	5,2%
21,6	0,7	100	100	0,1%	4,6	4,7	3,2%	30,0	30,9	3,0%	1,2	1,3	3,3%
24,3	0,7	100	100	0,2%	4,6	4,7	3,0%	30,1	30,9	2,8%	1,2	1,3	3,3%
21,8	0,8	100	100	0,2%	4,6	4,7	3,0%	30,1	30,9	2,8%	1,2	1,3	3,2%
48,0	0,6	100	100	0,3%	4,6	4,7	1,6%	30,5	30,9	1,4%	1,3	1,3	1,9%
99,0	0,5	100	100	0,4%	4,7	4,7	1,1%	30,6	30,9	1,0%	1,3	1,3	1,6%
		∅		2,4%	∅		3,8%	∅		3,6%	∅		3,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	9,3%	0,8	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,2%	1,4	0,4	0,3
0,6	1,2	0,3	0,3	6,2%	1,6	0,5	0,3
1,6	1,0	0,4	0,5	6,3%	3,9	1,0	1,4
2,0	1,0	0,5	0,5	6,4%	5,3	1,2	1,6
2,5	0,9	0,6	0,7	6,9%	6,0	1,6	1,9
3,7	0,8	0,9	0,9	1,4%	7,7	2,4	2,6
4,9	0,9	1,2	1,1	2,1%	9,3	3,6	3,3
6,0	1,0	1,4	1,3	3,7%	11,4	4,7	3,9
10,1	0,9	2,3	2,2	5,9%	15,5	7,3	6,0
21,6	0,7	4,8	4,6	4,1%	17,2	11,2	8,6
24,3	0,7	5,2	5,1	1,3%	18,8	11,8	9,1
21,8	0,8	4,8	4,6	2,9%	20,6	12,4	8,6
48,0	0,6	10,0	10,2	1,7%	29,4	21,3	14,2
99,0	0,5	20,6	21,0	1,8%	45,2	40,1	25,0
		∅		4,1%			

Abbildung A-94. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 86

Parameter Versuchsreihe 87

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=45$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **9**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	11	7,3%	0,4	0,4	20,2%	2,3	2,8	19,0%	1,0	1,1	12,0%
0,3	1,6	30	33	12,3%	1,1	1,3	24,4%	6,9	8,7	24,7%	1,0	1,1	10,7%
0,6	1,2	50	55	10,3%	1,8	2,2	22,7%	11,8	14,4	22,5%	1,0	1,1	11,1%
1,7	1,0	81	85	4,7%	3,0	3,5	18,9%	19,4	23,1	18,8%	1,0	1,1	13,6%
2,0	0,9	86	87	2,1%	3,2	3,7	16,5%	20,8	24,2	16,4%	1,0	1,2	14,2%
2,5	0,9	90	90	0,1%	3,4	3,9	14,2%	22,3	25,4	14,2%	1,0	1,2	14,1%
3,3	0,7	95	93	1,9%	3,7	4,1	11,5%	24,1	26,9	11,5%	1,1	1,2	13,6%
4,1	0,7	97	94	2,9%	3,8	4,2	10,1%	25,2	27,7	9,9%	1,1	1,2	13,3%
4,4	0,7	98	95	3,3%	3,9	4,3	8,7%	25,8	28,0	8,6%	1,1	1,2	12,3%
5,8	0,6	99	97	2,3%	4,1	4,4	8,2%	26,9	29,0	8,1%	1,1	1,3	10,8%
15,8	0,5	100	100	0,4%	4,6	4,8	4,1%	30,2	31,4	4,1%	1,3	1,3	4,5%
16,7	0,5	100	100	0,4%	4,6	4,8	4,4%	30,2	31,5	4,3%	1,3	1,3	4,8%
11,1	0,4	100	99	1,1%	4,5	4,7	4,2%	29,5	30,8	4,2%	1,2	1,3	5,4%
43,7	0,4	100	100	0,1%	4,9	5,0	1,2%	32,2	32,5	1,2%	1,3	1,4	1,3%
101,9	0,4	100	100	0,4%	5,0	5,0	0,3%	32,9	33,0	0,2%	1,4	1,4	0,8%
		∅		3,3%	∅		11,3%	∅		11,2%	∅		9,5%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	5,9%	0,8	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	12,4%	1,2	0,5	0,3
0,6	1,2	0,3	0,3	16,7%	1,8	0,6	0,3
1,7	1,0	0,5	0,5	4,5%	8,4	1,2	1,4
2,0	0,9	0,6	0,5	4,1%	7,1	1,4	1,6
2,5	0,9	0,7	0,6	4,1%	8,7	1,9	1,9
3,3	0,7	0,9	0,8	6,4%	18,5	2,3	2,3
4,1	0,7	1,0	1,0	6,1%	28,9	2,8	2,8
4,4	0,7	1,1	1,0	5,1%	22,0	3,1	3,0
5,8	0,6	1,4	1,3	5,9%	22,2	3,9	3,7
15,8	0,5	3,4	3,3	4,0%	58,4	9,8	9,5
16,7	0,5	3,6	3,5	3,7%	92,3	10,5	10,0
11,1	0,4	2,5	2,4	3,8%	34,6	7,2	6,8
43,7	0,4	8,9	8,8	1,1%	103,8	23,9	25,6
101,9	0,4	20,0	20,3	1,6%	141,1	52,7	59,1
		∅		5,7%			

Abbildung A-95. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 87

Parameter Versuchsreihe 88Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=45$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **9**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	11	7,3%	0,4	0,4	17,5%	2,3	2,7	16,3%	1,0	1,1	9,5%
0,3	1,6	30	33	12,3%	1,1	1,3	21,6%	7,0	8,5	21,7%	1,0	1,1	8,2%
0,6	1,1	50	56	11,0%	1,8	2,2	21,1%	11,8	14,2	21,0%	1,0	1,1	8,8%
1,7	1,0	81	85	4,7%	3,0	3,5	18,9%	19,5	23,1	18,7%	1,0	1,1	13,5%
2,0	1,0	86	87	2,1%	3,2	3,7	16,5%	20,8	24,2	16,5%	1,0	1,2	14,1%
2,5	0,9	90	90	0,1%	3,4	3,9	14,3%	22,2	25,4	14,4%	1,0	1,2	14,2%
3,4	0,8	95	93	1,7%	3,7	4,1	12,2%	24,1	26,9	11,9%	1,1	1,2	14,1%
4,1	0,7	97	94	2,8%	3,9	4,2	9,7%	25,3	27,7	9,7%	1,1	1,2	12,8%
4,7	0,8	98	95	2,9%	3,9	4,3	9,3%	25,9	28,3	9,2%	1,1	1,2	12,5%
6,2	0,7	99	97	2,0%	4,1	4,5	8,7%	26,9	29,3	8,7%	1,1	1,3	11,0%
15,1	0,6	100	100	0,5%	4,4	4,7	6,0%	29,1	30,8	5,9%	1,2	1,3	6,5%
17,9	0,6	100	100	0,4%	4,4	4,7	6,1%	29,1	30,9	6,1%	1,2	1,3	6,6%
17,7	0,8	100	100	0,4%	4,4	4,7	6,1%	29,1	30,9	6,0%	1,2	1,3	6,6%
45,7	0,5	100	100	0,5%	4,5	4,7	3,8%	29,8	30,9	3,7%	1,2	1,3	4,3%
97,0	0,3	100	100	0,4%	4,6	4,7	2,9%	30,1	30,9	2,8%	1,2	1,3	3,3%
		∅		3,3%	∅		11,6%	∅		11,5%	∅		9,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	5,9%	1,0	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	12,2%	1,0	0,5	0,3
0,6	1,1	0,3	0,3	16,2%	1,5	0,6	0,4
1,7	1,0	0,5	0,5	4,5%	3,6	1,1	1,4
2,0	1,0	0,6	0,5	4,1%	4,5	1,4	1,6
2,5	0,9	0,7	0,6	3,8%	5,9	1,7	1,9
3,4	0,8	0,9	0,8	6,1%	7,2	2,3	2,4
4,1	0,7	1,0	1,0	5,9%	9,5	2,7	2,8
4,7	0,8	1,2	1,1	5,9%	10,1	3,0	3,1
6,2	0,7	1,5	1,4	6,8%	10,8	3,9	4,0
15,1	0,6	3,4	3,2	5,9%	14,3	7,8	7,2
17,9	0,6	4,1	3,8	5,8%	17,7	9,5	7,8
17,7	0,8	4,0	3,8	5,9%	17,9	11,2	7,7
45,7	0,5	9,7	9,7	0,0%	25,9	19,6	13,7
97,0	0,3	20,7	20,6	0,6%	45,8	34,5	24,6
		∅		6,0%			

Abbildung A-96. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 88

Parameter Versuchsreihe 89

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=56$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	3,0%	0,4	0,4	3,1%	2,4	2,5	2,4%	1,0	1,0	0,0%
0,3	1,6	30	32	8,5%	1,1	1,2	7,9%	7,2	7,8	7,7%	1,0	1,0	0,5%
0,6	1,2	50	55	9,9%	1,8	2,0	9,5%	12,3	13,4	9,2%	1,0	1,0	0,5%
1,6	0,9	81	82	0,8%	3,0	3,0	0,4%	19,9	20,0	0,3%	1,0	1,0	0,4%
2,1	0,9	86	86	0,0%	3,2	3,2	0,1%	21,2	21,2	0,1%	1,0	1,0	0,0%
3,8	1,1	91	92	1,7%	3,4	3,5	2,8%	22,7	23,3	2,7%	1,0	1,1	1,1%
5,2	0,9	95	95	0,1%	3,6	3,7	1,0%	24,2	24,4	1,1%	1,1	1,1	1,1%
6,1	0,8	97	96	0,8%	3,8	3,8	0,4%	25,0	25,0	0,2%	1,1	1,1	1,2%
6,6	0,7	98	96	1,7%	3,8	3,8	0,0%	25,3	25,3	0,1%	1,1	1,1	1,7%
7,8	0,6	99	97	1,8%	3,9	3,9	0,1%	25,9	25,8	0,1%	1,1	1,1	1,8%
14,6	0,4	100	99	0,9%	4,2	4,2	1,2%	27,7	28,1	1,2%	1,2	1,2	2,1%
15,7	0,4	100	99	0,9%	4,2	4,3	1,5%	27,9	28,3	1,5%	1,2	1,2	2,4%
18,8	0,3	100	100	0,6%	4,3	4,4	1,5%	28,6	29,0	1,3%	1,2	1,2	2,1%
48,8	0,2	100	100	0,1%	4,7	4,8	0,8%	31,4	31,6	0,7%	1,3	1,3	0,9%
100,2	0,3	100	100	0,2%	4,9	4,9	0,4%	32,7	32,8	0,4%	1,4	1,4	0,6%
		∅		2,1%	∅		2,0%	∅		1,9%	∅		1,1%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	3,7%	0,8	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	7,3%	1,3	0,5	0,3
0,6	1,2	0,3	0,3	5,9%	2,4	0,5	0,3
1,6	0,9	0,5	0,5	2,5%	10,1	1,4	1,1
2,1	0,9	0,6	0,7	3,8%	14,5	2,1	1,4
3,8	1,1	1,0	1,1	10,5%	13,4	3,9	2,2
5,2	0,9	1,3	1,4	6,6%	16,6	5,2	2,9
6,1	0,8	1,7	1,6	1,2%	18,1	6,1	3,4
6,6	0,7	1,7	1,7	3,9%	22,0	5,9	3,5
7,8	0,6	1,9	2,0	2,9%	18,5	6,7	4,1
14,6	0,4	3,5	3,5	0,3%	24,7	9,9	7,1
15,7	0,4	3,7	3,7	0,1%	23,3	10,6	7,5
18,8	0,3	4,3	4,3	0,3%	26,1	11,6	8,8
48,8	0,2	10,3	10,3	0,7%	34,9	22,4	20,7
100,2	0,3	20,2	20,3	0,7%	61,5	45,5	40,9
		∅		3,4%			

Abbildung A-97. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 89

Parameter Versuchsreihe 90Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=63$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	3,0%	0,4	0,4	3,1%	2,4	2,5	2,4%	1,0	1,0	0,0%
0,3	1,6	30	32	8,3%	1,1	1,2	7,7%	7,2	7,7	7,5%	1,0	1,0	0,5%
0,6	1,2	50	55	9,3%	1,8	2,0	8,8%	12,3	13,3	8,5%	1,0	1,0	0,5%
1,6	0,9	81	80	0,5%	3,0	3,0	1,0%	19,9	19,7	1,0%	1,0	1,0	0,5%
2,2	1,0	86	85	0,8%	3,2	3,2	0,8%	21,2	21,1	0,8%	1,0	1,0	0,0%
4,0	1,1	91	92	1,2%	3,4	3,5	2,7%	22,7	23,3	2,7%	1,0	1,1	1,4%
6,4	0,9	95	96	0,5%	3,6	3,8	3,6%	24,2	25,0	3,5%	1,1	1,1	3,1%
8,7	0,9	97	97	0,3%	3,7	3,9	5,1%	24,9	26,1	4,9%	1,1	1,1	4,7%
10,7	0,9	98	98	0,0%	3,8	4,0	4,8%	25,3	26,6	4,8%	1,1	1,1	4,8%
15,6	0,8	99	99	0,1%	3,9	4,1	4,3%	25,9	27,0	4,1%	1,1	1,1	4,3%
27,0	0,7	100	100	0,6%	4,0	4,1	2,9%	26,5	27,2	2,7%	1,1	1,1	3,5%
28,3	0,7	101	100	0,7%	4,0	4,1	2,6%	26,5	27,2	2,6%	1,1	1,1	3,4%
36,9	0,7	101	100	0,8%	4,0	4,1	2,2%	26,6	27,2	2,2%	1,1	1,1	3,0%
57,9	0,6	101	100	0,9%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,2%	1,1	1,1	2,2%
95,3	0,5	101	100	0,7%	4,1	4,1	1,0%	27,0	27,2	0,9%	1,1	1,1	1,8%
		∅		1,9%	∅		3,5%	∅		3,3%	∅		2,3%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	3,7%	0,8	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	7,3%	1,1	0,5	0,3
0,6	1,2	0,3	0,3	5,2%	2,1	0,6	0,3
1,6	0,9	0,5	0,5	3,3%	7,5	1,2	1,1
2,2	1,0	0,7	0,7	3,8%	13,6	1,7	1,4
4,0	1,1	1,0	1,1	12,7%	16,3	3,5	2,3
6,4	0,9	1,7	1,7	3,4%	14,7	5,6	3,5
8,7	0,9	2,3	2,2	2,9%	17,9	7,4	4,6
10,7	0,9	2,8	2,7	4,0%	19,7	9,4	5,2
15,6	0,8	4,0	3,8	4,3%	26,0	11,7	6,4
27,0	0,7	6,4	6,6	2,6%	21,7	15,4	9,2
28,3	0,7	6,7	6,9	3,7%	24,8	16,1	9,5
36,9	0,7	8,7	9,0	4,2%	29,4	21,0	11,6
57,9	0,6	13,5	14,2	4,8%	36,5	30,8	16,7
95,3	0,5	22,7	23,3	2,7%	51,3	45,4	25,9
		∅		4,6%			

Abbildung A-98. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 90

Parameter Versuchsreihe 91

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=51$) Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	2,8%	0,3	0,4	12,8%	2,2	2,5	11,5%	0,9	1,0	9,7%
0,3	1,6	30	32	8,6%	1,0	1,2	18,2%	6,6	7,8	18,0%	0,9	1,0	8,8%
0,6	1,1	50	55	8,9%	1,7	2,0	18,5%	11,2	13,2	18,3%	0,9	1,0	8,8%
1,5	0,9	81	82	1,2%	2,7	3,0	10,0%	18,2	20,0	9,8%	0,9	1,0	8,8%
2,0	0,9	86	86	0,1%	2,9	3,2	8,8%	19,5	21,1	8,6%	0,9	1,0	8,7%
3,3	1,0	90	92	1,5%	3,1	3,5	10,2%	20,9	23,0	10,3%	1,0	1,0	8,6%
4,2	0,8	95	94	0,8%	3,3	3,6	7,6%	22,2	23,9	7,5%	1,0	1,1	8,5%
4,5	0,7	97	94	2,6%	3,5	3,6	4,8%	23,0	24,1	4,8%	1,0	1,1	7,6%
5,6	0,7	98	96	1,9%	3,5	3,7	5,6%	23,6	24,9	5,4%	1,0	1,1	7,7%
7,5	0,6	99	97	1,9%	3,7	3,9	5,2%	24,6	25,8	5,0%	1,0	1,1	7,2%
11,5	0,4	100	99	1,3%	3,9	4,1	4,6%	26,1	27,3	4,5%	1,1	1,1	5,9%
11,4	0,4	100	99	1,4%	3,9	4,1	3,9%	26,2	27,2	4,0%	1,1	1,1	5,4%
20,8	0,3	100	100	0,4%	4,3	4,4	3,1%	28,5	29,3	3,0%	1,2	1,2	3,6%
48,7	0,2	100	100	0,1%	4,7	4,8	0,8%	31,4	31,6	0,8%	1,3	1,3	0,9%
100,2	0,3	100	100	0,2%	4,9	4,9	0,4%	32,7	32,8	0,4%	1,4	1,4	0,6%
		∅		2,2%	∅		7,6%	∅		7,5%	∅		6,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	7,6%	0,9	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	13,1%	1,4	0,5	0,3
0,6	1,1	0,4	0,3	16,2%	2,7	0,6	0,3
1,5	0,9	0,5	0,5	5,1%	9,2	1,4	1,1
2,0	0,9	0,7	0,6	5,2%	11,1	2,1	1,3
3,3	1,0	0,9	1,0	2,2%	17,9	3,8	2,0
4,2	0,8	1,2	1,2	0,2%	15,8	4,5	2,4
4,5	0,7	1,3	1,2	3,9%	15,5	4,5	2,5
5,6	0,7	1,6	1,5	5,9%	20,0	5,6	3,1
7,5	0,6	2,0	1,9	1,7%	18,7	6,5	4,0
11,5	0,4	2,9	2,8	2,1%	24,5	8,8	5,8
11,4	0,4	2,8	2,8	0,8%	21,8	8,6	5,7
20,8	0,3	4,8	4,7	2,5%	26,7	12,2	9,6
48,7	0,2	10,3	10,2	0,7%	37,0	22,0	20,7
100,2	0,3	20,2	20,3	0,7%	61,5	45,4	40,9
		∅		4,5%			

Abbildung A-99. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 91

Parameter Versuchsreihe 92Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=52$)Aufteilung der Rüstfamilien: **homogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/BKT]			L _m [Std/BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	3,1	10	10	2,8%	0,3	0,4	12,8%	2,2	2,5	11,5%	0,9	1,0	9,7%
0,3	1,6	30	32	8,6%	1,0	1,2	18,2%	6,6	7,8	17,9%	0,9	1,0	8,9%
0,6	1,1	50	55	8,9%	1,7	2,0	18,4%	11,2	13,2	18,2%	0,9	1,0	8,7%
1,6	0,9	81	82	1,1%	2,7	3,0	10,0%	18,2	20,0	9,9%	0,9	1,0	8,8%
2,0	0,9	86	86	0,0%	2,9	3,2	8,8%	19,4	21,1	8,8%	0,9	1,0	8,8%
3,2	1,1	91	91	0,9%	3,1	3,4	10,5%	20,8	22,9	10,3%	1,0	1,0	9,5%
4,2	0,9	95	94	1,3%	3,3	3,6	7,7%	22,2	23,9	7,7%	1,0	1,1	9,1%
5,0	0,7	97	95	1,9%	3,5	3,7	6,3%	23,0	24,4	6,2%	1,0	1,1	8,3%
6,2	0,7	98	96	1,5%	3,6	3,8	6,5%	23,6	25,1	6,6%	1,0	1,1	8,1%
8,0	0,7	99	98	1,7%	3,7	3,9	7,1%	24,3	26,0	6,9%	1,0	1,1	8,9%
13,7	0,6	100	99	1,0%	3,8	4,1	6,0%	25,5	27,0	6,0%	1,1	1,1	7,1%
14,3	0,6	100	99	1,0%	3,9	4,1	5,5%	25,7	27,0	5,3%	1,1	1,1	6,6%
24,7	0,5	100	100	0,5%	3,9	4,1	3,7%	26,2	27,2	3,6%	1,1	1,1	4,2%
53,6	0,5	101	100	0,7%	4,0	4,1	2,0%	26,7	27,2	2,0%	1,1	1,1	2,7%
93,9	0,5	101	100	0,6%	4,0	4,1	1,3%	26,9	27,2	1,2%	1,1	1,1	1,9%
		∅		2,2%	∅		8,3%	∅		8,1%	∅		7,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	3,1	0,3	0,3	7,6%	1,0	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	13,1%	1,3	0,5	0,3
0,6	1,1	0,4	0,3	13,7%	1,8	0,6	0,3
1,6	0,9	0,5	0,5	4,5%	5,9	1,3	1,1
2,0	0,9	0,7	0,6	4,3%	10,0	1,6	1,3
3,2	1,1	0,9	0,9	3,9%	10,7	2,7	1,9
4,2	0,9	1,2	1,2	1,9%	11,3	3,3	2,4
5,0	0,7	1,5	1,4	6,3%	12,1	4,0	2,8
6,2	0,7	1,8	1,6	6,9%	16,9	4,9	3,4
8,0	0,7	2,1	2,0	3,7%	18,9	5,8	4,2
13,7	0,6	3,5	3,4	3,0%	19,8	9,2	6,0
14,3	0,6	3,6	3,5	2,1%	22,8	9,4	6,1
24,7	0,5	6,2	6,0	2,8%	22,2	13,3	8,6
53,6	0,5	12,9	13,1	1,8%	34,2	24,6	15,7
93,9	0,5	22,5	22,9	1,9%	49,5	43,0	25,5
		∅		5,2%			

Abbildung A-100. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 92

Parameter Versuchsreihe 93

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=52$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	10	11	15,1%	0,4	0,4	12,0%	2,6	2,8	11,2%	1,1	1,0	2,7%
0,3	1,6	30	33	12,5%	1,1	1,2	8,5%	7,7	8,3	8,5%	1,1	1,0	3,5%
0,7	1,2	50	57	13,0%	1,9	2,1	9,8%	13,0	14,3	9,7%	1,1	1,0	3,1%
1,6	0,9	81	83	2,2%	3,1	3,2	2,6%	21,2	21,8	2,6%	1,1	1,1	0,3%
2,0	0,9	86	86	0,2%	3,3	3,4	2,1%	22,7	23,1	2,0%	1,1	1,1	1,8%
2,9	0,9	90	90	0,1%	3,5	3,7	3,6%	24,3	25,1	3,4%	1,1	1,2	3,6%
4,6	0,8	94	94	0,1%	3,8	4,0	5,0%	26,1	27,4	4,9%	1,1	1,2	5,0%
5,2	0,8	97	95	1,6%	3,9	4,1	3,6%	26,9	27,9	3,6%	1,2	1,2	5,3%
5,5	0,7	98	96	2,4%	4,0	4,1	2,7%	27,4	28,1	2,7%	1,2	1,2	5,2%
7,2	0,7	99	97	1,8%	4,1	4,3	3,4%	28,3	29,2	3,4%	1,2	1,3	5,3%
16,5	0,5	100	100	0,5%	4,5	4,6	3,7%	30,5	31,6	3,6%	1,3	1,3	4,2%
19,2	0,4	100	100	0,4%	4,5	4,7	3,5%	30,8	31,9	3,4%	1,3	1,3	3,9%
18,0	0,4	100	100	0,5%	4,5	4,6	3,4%	30,8	31,8	3,2%	1,3	1,3	3,9%
45,1	0,3	100	100	0,0%	4,7	4,8	2,1%	32,5	33,1	2,0%	1,4	1,4	2,1%
100,9	0,3	100	100	0,3%	4,9	4,9	0,9%	33,6	33,8	0,8%	1,4	1,4	1,2%
		∅		3,4%	∅		4,5%	∅		4,3%	∅		3,4%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	1,5%	125,2	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,5%	46,3	0,4	0,3
0,7	1,2	0,4	0,3	13,6%	137,8	0,5	0,4
1,6	0,9	0,5	0,5	5,5%	66,7	1,1	1,3
2,0	0,9	0,6	0,6	4,7%	61,2	1,5	1,5
2,9	0,9	0,8	0,8	4,0%	73,2	2,3	2,0
4,6	0,8	1,2	1,2	3,7%	62,0	4,0	2,9
5,2	0,8	1,3	1,3	3,0%	72,1	4,4	3,2
5,5	0,7	1,4	1,3	1,9%	57,8	4,5	3,4
7,2	0,7	1,7	1,7	3,0%	67,1	6,2	4,3
16,5	0,5	3,6	3,6	2,1%	93,7	13,1	9,1
19,2	0,4	4,2	4,1	1,7%	77,0	14,7	10,5
18,0	0,4	3,9	3,9	1,6%	109,6	14,9	9,9
45,1	0,3	9,4	9,3	1,2%	105,4	35,5	23,9
100,9	0,3	20,1	20,4	1,6%	273,9	78,0	52,5
		∅		3,4%			

Abbildung A-101. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 93

Parameter Versuchsreihe 94Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=53$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **nur zwischen Aufträgen**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	10	11	15,1%	0,4	0,4	12,0%	2,6	2,8	11,2%	1,1	1,0	2,7%
0,3	1,6	30	33	12,4%	1,1	1,2	8,5%	7,7	8,3	8,4%	1,1	1,0	3,5%
0,7	1,2	50	57	12,8%	1,9	2,1	9,7%	13,0	14,3	9,5%	1,1	1,0	3,0%
1,6	0,9	81	82	2,0%	3,1	3,2	2,3%	21,2	21,7	2,4%	1,1	1,1	0,3%
2,0	0,9	86	86	0,1%	3,3	3,4	1,5%	22,7	23,0	1,3%	1,1	1,1	1,6%
2,9	1,0	90	90	0,1%	3,6	3,7	3,7%	24,3	25,2	3,7%	1,1	1,2	3,6%
3,9	0,8	95	93	1,6%	3,8	3,9	2,4%	26,1	26,6	2,3%	1,1	1,2	4,1%
5,3	0,8	97	95	1,5%	4,0	4,1	3,4%	27,1	27,9	3,3%	1,2	1,2	4,9%
5,6	0,8	98	96	2,3%	4,0	4,1	2,1%	27,6	28,2	2,1%	1,2	1,2	4,5%
7,9	0,8	99	97	1,5%	4,2	4,3	4,0%	28,4	29,5	4,0%	1,2	1,3	5,6%
21,2	0,7	101	100	1,0%	4,3	4,5	4,0%	29,6	30,7	4,0%	1,2	1,3	5,0%
25,7	0,7	101	100	1,0%	4,3	4,5	4,5%	29,5	30,8	4,4%	1,2	1,3	5,6%
28,0	0,7	101	100	1,0%	4,3	4,5	3,8%	29,6	30,8	3,9%	1,2	1,3	4,9%
52,8	0,5	101	100	1,0%	4,4	4,5	2,1%	30,2	30,8	2,1%	1,2	1,3	3,1%
100,5	0,4	101	100	1,1%	4,4	4,5	1,6%	30,3	30,8	1,7%	1,2	1,3	2,7%
		∅		3,6%	∅		4,4%	∅		4,3%	∅		3,7%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	1,5%	125,1	0,3	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	1,5%	46,2	0,4	0,3
0,7	1,2	0,4	0,3	13,5%	137,6	0,5	0,4
1,6	0,9	0,5	0,5	5,7%	67,2	1,1	1,3
2,0	0,9	0,6	0,6	5,6%	61,9	1,3	1,5
2,9	1,0	0,7	0,8	13,7%	9,2	2,0	2,0
3,9	0,8	1,0	1,0	1,1%	60,0	2,8	2,6
5,3	0,8	1,3	1,3	3,2%	61,2	4,1	3,3
5,6	0,8	1,4	1,4	1,2%	58,1	4,1	3,5
7,9	0,8	1,9	1,8	1,4%	17,1	5,7	4,7
21,2	0,7	4,5	4,7	6,2%	36,1	11,1	8,2
25,7	0,7	5,4	5,7	6,1%	40,6	13,4	9,2
28,0	0,7	5,9	6,2	5,9%	42,5	14,3	9,7
52,8	0,5	11,1	11,7	5,2%	58,1	24,5	15,2
100,5	0,4	21,7	22,3	2,9%	91,5	42,3	25,8
		∅		5,0%			

Abbildung A-102. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 94

Parameter Versuchsreihe 95

Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=57$) Aufteilung der Rüstfamilien: **inhomogen**
 Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung** Anzahl Rüstfamilien: **18**
 Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	10	11	15,4%	0,4	0,4	19,3%	2,4	2,9	17,6%	1,0	1,0	3,4%
0,3	1,6	30	33	12,8%	1,1	1,2	15,2%	7,3	8,4	14,9%	1,0	1,0	2,1%
0,7	1,2	50	57	13,1%	1,8	2,1	16,2%	12,3	14,3	16,0%	1,0	1,0	2,4%
1,7	0,9	81	82	1,8%	3,0	3,2	7,7%	20,2	21,8	7,7%	1,0	1,1	5,9%
2,1	0,9	86	86	0,1%	3,2	3,4	7,0%	21,6	23,1	7,0%	1,1	1,1	7,1%
3,1	1,0	90	90	0,4%	3,4	3,7	9,5%	23,2	25,3	9,3%	1,1	1,2	9,0%
4,3	0,8	94	93	1,2%	3,6	3,9	8,2%	24,9	26,9	8,1%	1,1	1,2	9,5%
4,7	0,8	97	94	2,9%	3,8	4,0	6,4%	25,7	27,3	6,3%	1,1	1,2	9,5%
5,3	0,7	98	95	3,3%	3,9	4,1	5,5%	26,4	27,8	5,5%	1,1	1,2	9,0%
6,7	0,6	99	96	2,6%	4,0	4,2	6,4%	27,1	28,8	6,4%	1,1	1,2	9,2%
13,1	0,4	100	99	1,1%	4,3	4,5	5,2%	29,5	31,0	5,2%	1,2	1,3	6,5%
16,0	0,4	100	99	0,8%	4,4	4,6	4,9%	30,0	31,5	4,9%	1,2	1,3	5,8%
15,2	0,4	100	99	0,9%	4,4	4,6	4,8%	29,9	31,4	4,9%	1,2	1,3	5,8%
46,3	0,3	100	100	0,0%	4,7	4,8	2,2%	32,4	33,1	2,2%	1,4	1,4	2,2%
99,7	0,3	100	100	0,2%	4,9	4,9	1,1%	33,5	33,8	1,1%	1,4	1,4	1,3%
		∅		3,8%	∅		8,0%	∅		7,8%	∅		5,9%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	5,3%	131,2	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	7,9%	48,1	0,5	0,3
0,7	1,2	0,4	0,3	17,4%	145,1	0,6	0,4
1,7	0,9	0,5	0,5	0,4%	69,7	1,2	1,3
2,1	0,9	0,6	0,6	0,4%	68,1	1,7	1,5
3,1	1,0	0,8	0,8	7,0%	51,2	2,4	2,0
4,3	0,8	1,2	1,1	6,0%	64,8	4,0	2,6
4,7	0,8	1,2	1,2	5,3%	63,7	4,0	2,8
5,3	0,7	1,4	1,3	4,4%	60,2	4,8	3,1
6,7	0,6	1,6	1,6	1,4%	47,4	5,7	3,8
13,1	0,4	3,0	2,9	3,1%	61,0	10,2	6,9
16,0	0,4	3,6	3,5	2,2%	83,2	13,2	8,2
15,2	0,4	3,4	3,3	2,6%	64,0	12,5	7,8
46,3	0,3	9,6	9,6	0,9%	125,7	34,0	22,3
99,7	0,3	20,0	20,2	0,7%	218,9	77,0	46,9
		∅		4,3%			

Abbildung A-103. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 95

Parameter Versuchsreihe 96Bestandsstreuung: **hoch** ($\alpha_1=55$)Aufteilung der Rüstfamilien **inhomogen**Reihenfolgebildung: **Rüstzyklusbildung mit akt. WS**Anzahl Rüstfamilien: **18**Reihenfolgeabhängigkeit der Rüstzeiten: **zwischen Aufträgen und Rüstfamilien**

BA _m [-]	BA _v [-]	A [%]			LA _m [-/ BKT]			L _m [Std/ BKT]			LSF [-]		
		Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ	Sim	Mod	Δ
0,1	2,9	10	11	15,5%	0,4	0,4	19,4%	2,4	2,9	17,7%	1,0	1,0	3,4%
0,3	1,6	30	33	13,0%	1,1	1,2	15,4%	7,3	8,4	15,1%	1,0	1,0	2,1%
0,7	1,2	50	57	13,4%	1,8	2,1	16,5%	12,3	14,3	16,3%	1,0	1,0	2,5%
1,7	0,9	81	83	2,3%	3,0	3,2	8,4%	20,2	21,9	8,1%	1,0	1,1	5,9%
2,1	0,9	86	86	0,3%	3,2	3,4	7,1%	21,6	23,2	7,1%	1,1	1,1	6,8%
2,8	0,9	90	90	0,5%	3,4	3,6	7,6%	23,2	24,9	7,5%	1,1	1,2	8,1%
4,4	0,8	94	94	0,8%	3,7	4,0	8,3%	25,0	27,0	8,1%	1,1	1,2	9,1%
4,6	0,7	97	94	2,8%	3,8	4,0	5,7%	25,8	27,3	5,6%	1,1	1,2	8,7%
5,2	0,7	98	95	3,1%	3,9	4,1	5,0%	26,5	27,8	4,9%	1,1	1,2	8,4%
7,1	0,7	99	97	2,2%	4,0	4,3	6,6%	27,3	29,1	6,6%	1,1	1,3	9,0%
18,1	0,6	100	100	0,7%	4,2	4,5	6,0%	29,0	30,7	5,9%	1,2	1,3	6,7%
20,4	0,7	101	100	1,3%	4,2	4,5	6,9%	28,8	30,7	6,8%	1,2	1,3	8,2%
26,7	0,6	101	100	1,1%	4,2	4,5	6,5%	28,9	30,8	6,4%	1,2	1,3	7,6%
53,8	0,6	101	100	1,2%	4,3	4,5	4,7%	29,4	30,8	4,7%	1,2	1,3	6,0%
101,6	0,6	102	100	1,5%	4,3	4,5	4,2%	29,6	30,8	4,1%	1,2	1,3	5,8%
		∅		4,0%	∅		8,5%	∅		8,3%	∅		6,6%

BA _m [-]	BA _v [-]	ZDL _m [BKT]			ZDL _{max} [BKT]	ZDL _{95%} [BKT]	ZDL _{max,m} [BKT]
		Sim	Mod	Δ	Sim	Sim	Mod
0,1	2,9	0,3	0,3	5,3%	131,1	0,4	0,3
0,3	1,6	0,3	0,3	7,9%	48,1	0,5	0,3
0,7	1,2	0,4	0,3	17,7%	145,1	0,6	0,4
1,7	0,9	0,5	0,5	0,5%	68,3	1,1	1,3
2,1	0,9	0,6	0,6	0,1%	63,6	1,5	1,6
2,8	0,9	0,8	0,8	0,6%	59,7	2,2	2,0
4,4	0,8	1,2	1,1	6,7%	66,3	3,5	2,8
4,6	0,7	1,2	1,2	4,3%	64,2	3,3	2,9
5,2	0,7	1,3	1,3	4,3%	61,7	3,6	3,3
7,1	0,7	1,7	1,7	2,5%	20,0	4,8	4,3
18,1	0,6	4,1	4,0	0,8%	28,3	9,7	7,5
20,4	0,7	4,3	4,5	6,7%	37,0	11,0	8,0
26,7	0,6	5,8	5,9	3,1%	35,8	14,0	9,4
53,8	0,6	11,5	12,0	4,0%	65,1	26,9	15,4
101,6	0,6	22,2	22,6	1,9%	63,0	49,5	26,0
		∅		4,4%			

Abbildung A-104. Evaluationsergebnisse Versuchsreihe 96

Lebenslauf

Name	Engehausen
Vorname	Friederike
Geburtsdatum	29.09.1986
Geburtsort	Hannover
08.1993 - 07.1999	Grundschule und Orientierungsstufe Wilhelm-Röpke-Schule in Schwarmstedt
08.1999 - 06.2006	Gymnasium Walsrode
10.2006 - 03.2010	Studium des Wirtschaftsingenieurwesens Leibniz Universität Hannover Abschluss: Bachelor of Science (B. Sc.)
04.2010 - 09.2012	Studium des Wirtschaftsingenieurwesens Leibniz Universität Hannover Abschluss: Master of Science (M. Sc.)
10.2012 - 12.2013	Projektmanagerin im Global Key Account Management DMG Vertriebs und Service GmbH – DMG Mori Aktiengesellschaft, Bielefeld
01.2014 - 02.2015	Auslandsaufenthalte in Südostasien und den USA
03.2015 - 11.2019	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktionsmanagement und -technik Technische Universität Hamburg
10.2020 - heute	Leitung der Produktionsplanung bei der Rudolf Dankwardt GmbH, Norderstedt

Schriftenreihe

Band 1

Koch, Jens Bodo: Unterstützung der schiffbaulichen Projektierung durch Repräsentation von Erfahrungswissen, 2004.

Band 2

Meyer, Sven: Flexible Gruppenarbeit in der Auftragsfertigung, 2004.

Band 3

Joswig, Dirk: Untersuchungen zum Zerspanverhalten weicher Elastomerwerkstoffe, 2005.

Band 4

Kerse, Nils: Unterstützung der schiffbaulichen Produktentstehung durch Einsatz von Virtual Reality (VR)-Technologien, 2007.

Band 5

Kurzewitz, Mathias: Kompetenzentwicklung als Element erfolgreicher Strategiemsetzung – dargestellt am Beispiel des Schiffbaus, 2007.

Band 6

Davids, Niko: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie, 2008.

Band 7

Möller, Carsten: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen, 2009.

Band 8

Gotsch, Falko: Untersuchungen zum Zerspanverhalten von Elastomerschäumen mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Fertigung von Feder-Dämpfer-Bauteilen, 2009.

Band 9

Neumann, Lutz: Risikomanagement bei der Gestaltung von Unternehmenskooperationen – untersucht am Beispiel der Investitionsgüterindustrie, 2009.

Band 10

Sellmer, Dirk: Untersuchungen zur Verbesserung des Arbeitsergebnisses beim Vollbohren unter besonderer Berücksichtigung der Prozesskräfte und der Spanbildung, 2010.

Band 11

Eggers, Daniel: Entwicklung von Dienstleistungsportfolios bei Investitionsgüterherstellern – dargestellt am Beispiel der maritimen Industrie, 2009.

Band 12

Kindler, Jörg: Werkstückqualität und Standzeitoptimierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

Band 13

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

Band 14

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

Band 15

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

Band 16

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion, 2012.

Band 17

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

Band 18

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

Band 19

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

Band 20

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

Band 21

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

Band 22

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

Band 23

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

Band 24

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

Band 25

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP-Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

Band 26

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

Band 27

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

Band 28

Griefahn, Dominik M.: Geometrieprüfung innerer Strukturen von Faserverbund-Sandwichbauteilen, 2015.

Band 29

Borrmann, Christof: Adaptive Montageprozesse für CFK-Großstrukturen mittels Offline-Programmierung von Industrierobotern, 2016.

Band 30

Klingelhöller, Christian: Trennschleifen von CFK-Schalenbauteilen mit räumlich gekrümmten Konturen, 2016.

Band 31

Titov, Fedor: Technologiegestützte Angebotserstellung für den Umbau komplexer Investitionsgüter, 2016.

Band 32

Tietze, Florian: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion, 2017.

Band 33

Geis, Tobias: Bearbeitungsstrategien zur Zerspanung von Faser-Verbund-Honeycomb-Sandwich, 2017.

Band 34

Koppold, Nico: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern, 2017.

Band 35

Halata, Philipp S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, 2018.

Band 36

Brüggemann, Felix: Bauteilqualität und Werkzeugverschleiß beim Fräsen von CFK-Gelege unter räumlichen Eingriffsbedingungen, 2018.

Band 37

Benter, Martin: Analyse von Bewegungsabläufen mit 3D-Kameras, 2018.

Band 38

Koch, Christoph: Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger, 2018.

Band 39

Cordes, Marcel: Modellierung von Bahngenaugigkeit und dynamischer Stabilität beim robotergeführten Fräsen, 2019.

Band 40

Piontek, Andreas: Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 2020.

Band 41

Grabner, Constantin: Methodengestütztes Produktivitätsmanagement – Entwicklung eines datenbasierten Vorgehens, 2020.

Band 42

Glöckner, Robert: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen, 2020

Band 43

Schröder, Henrik: Kompetenzentwicklung in der Montage mit Hilfe virtueller Technologien, 2020

Band 44

Engehausen, Friederike: Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien, 2021