

# **Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von  
Moritz Alexander Haux

aus  
Karlsruhe

2021

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten

Tag der mündlichen Prüfung: 22. April 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 46:

Moritz Alexander Haux

Modellierung von Unsicherheiten  
in der Planung der Unikatproduktion

1. Auflage

Hamburg 2021

ISSN 1613-8244

<https://doi.org/10.15480/882.3624>

Copyright Moritz Alexander Haux 2021

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand zu großen Teilen während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement und -technik der Technischen Universität Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Lödding, dem Erstgutachter meiner Arbeit und dem Leiter des Instituts. Ihm danke ich für die intensive Betreuung, das stets konstruktive Feedback, die gewährten Freiräume und das entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Professor Kersten danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Professor Ehlers.

Besonders möchte ich Herrn Dr. Friedewald für seinen unermüdlichen Einsatz für das Institut, die unzähligen fachlichen Gespräche und die zahlreichen Anmerkungen zu meiner Arbeit danken. Seine Hartnäckigkeit und Unterstützung haben mich stets aufs Neue motiviert. Allen ehemaligen Institutskollegen danke ich für die fachlichen Diskussionen, die ausgeprägte Hilfsbereitschaft sowie die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie, die mich während der Promotionszeit begleitet haben. Insbesondere Ina und Luise möchte ich für die intensive Durchsicht meiner Arbeit danken. Meiner Ehefrau und meinen Eltern danke ich für ihren bedingungslosen Rückhalt und ihre fortwährende Unterstützung. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Hamburg, im Juli 2021

Moritz Alexander Haux



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung .....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1	Unikatproduktion .....	5
2.1.1	Definition und Merkmale.....	5
2.1.2	Treiber der Unsicherheit.....	6
2.2	Auftragsabwicklungsprozess in der Unikatproduktion .....	10
2.2.1	Arbeitsplanung.....	10
2.2.2	Produktionsbedarfsplanung .....	11
2.2.3	Termin- und Kapazitätspuffer als Reaktion auf Unsicherheiten in der Planung .....	13
2.3	Modellierungsgrundlagen .....	14
2.3.1	Auftragszeit.....	14
2.3.2	Produktionskennlinien.....	16
2.4	Unsicherheit .....	18
2.5	Lösungsansätze für Unsicherheiten in der Produktionsplanung .....	22
<b>3</b>	<b>Forschungsdefizit.....</b>	<b>31</b>
3.1	Defizite .....	31
3.2	Forschungsbedarf.....	33
3.3	Abgrenzung des Untersuchungsgebiets.....	34
<b>4</b>	<b>Modellierung unsicherer Auftragszeiten für die Produktionsplanung .....</b>	<b>35</b>
4.1	Anforderungen.....	35
4.2	Modellierung von unsicheren Auftragszeiten.....	36
4.2.1	Modellierung der unsicheren Auftragszeiten mittels Verteilungsfunktion... ..	36
4.2.2	Merkmale unsicherer Auftragszeiten .....	38
4.3	Modellierung der logistischen Zielgrößen bei unsicheren Auftragszeiten .....	43
4.3.1	Wirkung der unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen .....	43
4.3.2	Modellierung der logistischen Zielgrößen für einen Auftrag .....	45
4.3.3	Modellierung der logistischen Zielgrößen für ein Arbeitssystem.....	52
4.4	Zwischenfazit.....	66

<b>5</b>	<b>Analyse von unsicheren Auftragszeiten .....</b>	<b>67</b>
5.1	Überblick .....	67
5.2	Identifizieren unsicherer Auftragszeiten.....	69
5.3	Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten.....	72
5.3.1	Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten quantifizieren .....	72
5.3.2	Quantifizieren der Auftragszeitstruktur bei unsicheren Auftragszeiten .....	76
5.4	Bewerten unsicherer Auftragszeiten .....	78
5.4.1	Bewertung der Arbeitsplanung.....	79
5.4.2	Auftragssicht – Bewertung eines Auftrags mit unsicherer Auftragszeit.....	81
5.4.3	Arbeitssystemansicht – Bewertung der logistischen Zielgrößen eines Arbeitssystems bei unsicheren Auftragszeiten.....	83
5.5	Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten .....	85
5.5.1	Maßnahmen zur Reduzierung unsicherer Auftragszeiten .....	86
5.5.2	Maßnahmen zur Integration von unsicheren Auftragszeiten .....	90
5.5.3	Maßnahmen zur Übertragung von unsicheren Auftragszeiten auf Dritte ....	92
5.6	Zwischenfazit.....	93
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiele.....</b>	<b>95</b>
6.1	Anwendungsbeispiel für die Auftragssicht .....	95
6.2	Beschreibung des Anwendungsbeispiels für die Arbeitssystemansicht .....	98
6.3	Arbeitssystem I „Rahmenbau“ .....	99
6.3.1	Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten.....	99
6.3.2	Bewerten unsicherer Auftragszeiten .....	106
6.3.3	Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten.....	110
6.4	Arbeitssystem II „Rohrmontage“ .....	113
6.4.1	Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten.....	113
6.4.2	Bewerten unsicherer Auftragszeiten .....	120
6.4.3	Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten.....	124
6.5	Evaluation der entwickelten Modellierung.....	128
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>131</b>
7.1	Zusammenfassung .....	131
7.2	Ausblick .....	133
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>135</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>141</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2: Charakterisierung einer Unikatproduktion in Anlehnung an [Schu12].....	6
Abbildung 3: Produktentstehungsphasen in der Unikatproduktion in Anlehnung an [Gruß10] und [Hirs92a].....	7
Abbildung 4: Informationsverfügbarkeit in der Auftragsabwicklung nach [Gruß10] vgl. [Hirs92a].....	9
Abbildung 5: Ablauf der Produktionsbedarfsplanung in Anlehnung an [Lucz04].....	12
Abbildung 6: Produktionskennlinie und Betriebszustände [Nyhu12].....	16
Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Information und Unsicherheit in Anlehnung an [Knet06].....	21
Abbildung 8: Beispielhafte Dichte- und Verteilungsfunktion einer unsicheren Auftragszeit.....	37
Abbildung 9: Ursachen unsicherer Auftragszeiten.....	39
Abbildung 10: Auftrags- und Arbeitssystemansicht auf unsichere Auftragszeiten.....	40
Abbildung 11: Szenarien der Unsicherheit.....	41
Abbildung 12: Beispielhafte Verteilungsfunktionen für die vier Szenarien der Unsicherheit.....	42
Abbildung 13: Gegenüberstellung der Arbeitssystemansicht und der Auftragsansicht.....	43
Abbildung 14: Schematisches Wirkmodell Arbeitssystem- und Auftragsansicht [Haux17]....	45
Abbildung 15: Trichtermodell mit unsicheren Auftragszeiten in Anlehnung an [Bech84].	46
Abbildung 16: Exemplarische Verteilungsfunktionen der Durchlaufzeit.....	48
Abbildung 17: Wirkung unsicherer Auftragszeiten auf den Rückstand.....	49
Abbildung 18: Verteilungsfunktion des Rückstands und der Terminabweichung aufgrund unsicherer Auftragszeiten.....	50
Abbildung 19: Exemplarische Verteilungsfunktion der unsicherheitsbedingten Kosten....	51
Abbildung 20: Eingangsdaten und Ergebnisse der Modellierung der Auswirkung unsicherer Auftragszeiten auf einen einzelnen Auftrag.....	52
Abbildung 21: Vergleich der wahrgenommenen und tatsächlichen Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten für die Szenarien Über- und Unterschätzung im Durchlaufdiagramm.....	53
Abbildung 22: Durchlaufdiagramme für die Szenarien Planung (a), Überschätzung der Auftragszeit (b) und Unterschätzung der Auftragszeit (c) nach [Haux17]..	55
Abbildung 23: Wirkung einer einzelnen unsicheren Auftragszeit auf den mittleren Bestand.....	55
Abbildung 24: Durchlaufdiagramm, logistische Kennzahlen und Kapazitätsbedarfsprofil für die Szenarien Planung und Realprozess nach [Haux17].....	56
Abbildung 25: Produktionskennlinien für die Szenarien Planung, Realprozess und Idealprozess mit unsicheren Auftragszeiten nach [Haux17].....	57
Abbildung 26: Durchlaufdiagramm, logistische Kennzahlen und Kapazitätsbedarfsprofil für den Realprozess mit Kapazitätsplanung nach [Haux17].....	58
Abbildung 27: Kapazitätsbedarf für verschiedene Szenarien der Unsicherheit.....	58
Abbildung 28: Bestandsentwicklung für verschiedene Szenarien der Unsicherheit.....	59
Abbildung 29: Schematische Berechnung der tatsächlichen Auftragszeitstruktur bei auftragszeitunabhängiger (a) und auftragszeitabhängiger (b) Unsicherheit.....	60

Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung der Wirkung einer auftragszeitunabhängigen Unsicherheit auf die tatsächliche Auftragszeitstruktur .....	61
Abbildung 31: Beispielhafte Darstellung der Wirkung einer auftragszeitabhängigen Unsicherheit auf die tatsächliche Auftragszeitstruktur .....	63
Abbildung 32: Exemplarische Veränderung der Produktionskennlinien durch Unsicherheit.....	65
Abbildung 33: Vier Phasen der Analyse von unsicheren Auftragszeiten.....	69
Abbildung 34: Inhalte der Phase „Identifizieren unsicherer Auftragszeiten“ .....	69
Abbildung 35: Prozessdarstellung in Anlehnung an [Davi08].....	70
Abbildung 36: Inhalte der Phase „Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten“ .....	72
Abbildung 37: Absolutes Streudiagramm (a) und relatives Streudiagramm (b).....	74
Abbildung 38: Beispielhafte Streudiagramme für verschiedene Szenarien der Unsicherheit.....	74
Abbildung 39: Gegenüberstellung der Plan- und Ist-Auftragszeitstruktur im Streudiagramm .....	78
Abbildung 40: Inhalte der Phase „Bewerten unsicherer Auftragszeiten“ .....	79
Abbildung 41: Szenarien der Unsicherheit zur Bewertung der Arbeitsplanung .....	80
Abbildung 42: Exemplarische Verteilungsfunktion einer relativen Unsicherheit inklusive Auftragszeittreue.....	81
Abbildung 43: Exemplarische Produktionskennlinien zur Bewertung der Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen des Arbeitssystems.....	84
Abbildung 44: Geplante Belastung einer Kapazitätsgruppe inklusive Streubereich und Grenzen der Kapazitätsflexibilität in Anlehnung an [Kopp17].....	85
Abbildung 45: Maßnahmenkategorien zur Handhabung von unsicheren Auftragszeiten ..	86
Abbildung 46: Übersicht Maßnahmen „Unsicherheit reduzieren“ .....	87
Abbildung 47: Wirkrichtungen der Maßnahmen „Unsicherheit reduzieren“ .....	89
Abbildung 48: Übersicht Maßnahmen „Unsicherheit integrieren“ .....	92
Abbildung 49: Dichtefunktionen und Histogramm der unsicheren Auftragszeiten.....	96
Abbildung 50: Histogramme der logistischen Zielgrößen des Auftrags A1 .....	97
Abbildung 51: Histogramme der Unsicherheit an Arbeitssystem I.....	100
Abbildung 52: Streudiagramm Plan-Ist-Auftragszeiten (a) und Streudiagramm relative Unsicherheit und Plan-Auftragszeit (b) für Arbeitssystem I .....	101
Abbildung 53: Histogramme der Plan-Auftragszeiten (a) und der Ist-Auftragszeiten (b) an Arbeitssystem I .....	103
Abbildung 54: Änderung der Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem I durch Unsicherheit.....	104
Abbildung 55: Szenario der Unsicherheit an Arbeitssystem I.....	106
Abbildung 56: Bewertung der Ausprägung der Unsicherheit an Arbeitssystem I .....	107
Abbildung 57: Auftragszeittreue an Arbeitssystem I .....	108
Abbildung 58: Produktionskennlinien für das Arbeitssystem I.....	109
Abbildung 59: Auftragszeittreue an Arbeitssystem I nach Korrektur der systematischen Unsicherheit.....	111
Abbildung 60: Produktionskennlinien für die Szenarien Planung, Ist und nach Kapazitätsverminderung an Arbeitssystem I.....	112
Abbildung 61: Auftragszeittreue an Arbeitssystem I bei reduzierter zufälliger Unsicherheit.....	113

Abbildung 62: Histogramme der Unsicherheit an Arbeitssystem II .....	114
Abbildung 63: Streudiagramm Plan-Ist-Auftragszeiten (a) und Streudiagramm relative Unsicherheit und Plan-Auftragszeit (b) für Arbeitssystem II.....	115
Abbildung 64: Histogramme der Plan-Auftragszeiten (a) und der Ist-Auftragszeiten (b) an Arbeitssystem II.....	117
Abbildung 65: Änderung der Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem II durch Unsicherheit .....	118
Abbildung 66: Szenario der Unsicherheit an Arbeitssystem II.....	120
Abbildung 67: Bewertung der Ausprägung der Unsicherheit an Arbeitssystem II.....	121
Abbildung 68: Auftragszeittreue an Arbeitssystem II.....	122
Abbildung 69: Produktionskennlinien für das Arbeitssystem II .....	123
Abbildung 70: Auftragszeittreue an Arbeitssystem II nach Korrektur der systematischen Unsicherheit .....	125
Abbildung 71: Produktionskennlinien für die Szenarien Planung, Ist und nach Kapazitätserhöhung an Arbeitssystem II.....	126
Abbildung 72: Auftragszeittreue an Arbeitssystem II bei reduzierter zufälliger Unsicherheit.....	127

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Schätzverfahren nach [Jako13] .....	28
Tabelle 2: Defizite in der Produktionsplanung der Unikatproduktion.....	31
Tabelle 3: Anforderungen an die Modellierung unsicherer Auftragszeiten .....	35
Tabelle 4: Parameter der Verteilungsfunktionen der Unsicherheit.....	38
Tabelle 5: Wirkung unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen eines Auftrags .....	52
Tabelle 6: Wirkung einer auftragszeitunabhängigen Unsicherheit auf die Auftragszeitstruktur .....	62
Tabelle 7: Wirkung einer auftragszeitabhängigen Unsicherheit auf die Auftragszeitstruktur .....	64
Tabelle 8: Exemplarische Darstellung der Liste unsicherer Auftragszeiten .....	71
Tabelle 9: Verfahren zum Quantifizieren der Auftragszeitstruktur Monte-Carlo- Simulation (a) und vereinfachte Berechnung (b) .....	77
Tabelle 10: Kenngrößen der Aufträge A1 bis A3.....	95
Tabelle 11: Plan- und Ist-Auftragszeitstruktur je Schiff an Arbeitssystem I und II .....	99
Tabelle 12: Kenngrößen je Auftragszeitklasse an Arbeitssystem I .....	102
Tabelle 13: Kenngrößen der Unsicherheit je Schiff an Arbeitssystem I .....	102
Tabelle 14: Tatsächliche und berechnete Auftragszeitstruktur je Klasse an Arbeitssystem I .....	105
Tabelle 15: Geplante, reale und berechnete Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem I .....	106
Tabelle 16: Kenngrößen je Auftragszeitklasse an Arbeitssystem II.....	116
Tabelle 17: Kenngrößen der Unsicherheit je Schiff an Arbeitssystem II.....	116
Tabelle 18: Tatsächliche und berechnete Auftragszeitstruktur je Klasse an Arbeitssystem II .....	119
Tabelle 19: Geplante, reale und berechnete Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem II.....	119
Tabelle 20: Evaluation der Anforderungen .....	129
Tabelle 21: Versuchsplan für die Berechnung bzw. Simulation der Auftragszeitstruktur	141
Tabelle 22: Beispielhaft berechnete bzw. simulierte Auftragszeitstruktur .....	141
Tabelle 23: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem I – Plan- Szenario.....	144
Tabelle 24: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem I – Ist-Szenario..	144
Tabelle 25: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem I – nach Kapazitätsverminderung .....	145
Tabelle 26: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem II – Plan- Szenario.....	145
Tabelle 27: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem II – Ist-Szenario	146
Tabelle 28: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem II – nach Kapazitätserhöhung.....	146

## Abkürzungsverzeichnis

A	Auftrag
AS	Arbeitssystem
BKT	Betriebskalendertag
FIFO	First-In-First-Out
K	Klasse von Auftragszeiten
KE	Kapazitätserhöhung
KV	Kapazitätsverminderung
ME	Mengeneinheit (allgemein; z. B. Stk; m ; m <sup>2</sup> ; kg)
MRP II	Manufacturing Resource Planning
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
S	Schiff
Std	Stunde(n)

## Verzeichnis der Formelzeichen

### Allgemeine Merkmale

(Index oder nachführende Bezeichnung)

Zeichen	Bedeutung
i, j	allgemeine Laufvariable
Ist	Ist-Wert einer Größe
m	Mittelwert
max	Maximalwert
min	Minimalwert
mod	Modus
OG	Obergrenze
Plan	Plan-Wert einer Größe
s	Standardabweichung
T	Wert innerhalb der Toleranz
UG	Untergrenze
v	Variationskoeffizient
VB	vereinfachte Berechnung

### Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	%	Auslastung
AAP	-	Anzahl Arbeitsplätze
AB <sub>Ist</sub>	Std	Ist-Abgang
AB <sub>Plan</sub>	Std	Plan-Abgang
AnzAuf	-	Anzahl Aufträge
B(TZU)	Std	Bestand des Arbeitssystems am Zugangstermin
BI <sub>min</sub>	Std	idealer Mindestbestand
B	Std	Bestand
E	Std	Erwartungswert
f <sub>x</sub>	%/ME	Dichtefunktion einer Zufallsvariable X
F <sub>x</sub>	%	Verteilungsfunktion einer Zufallsvariable X
F <sub>x</sub> (x)	%	Wahrscheinlichkeit einer Zufallsvariable X für einen Wert kleiner gleich x
K	€	Kosten der Unsicherheit

KAP	Std/BKT	Kapazität
KS	€/Std	Kostensatz
LG	ME	Losgröße
$L_m$	Std/BKT	mittlere Leistung
$L_{max}$	Std/BKT	maximal mögliche Leistung
Max	Std	Maximum des Wertebereichs
Min	Std	Minimum des Wertebereichs
Mod	Std	Modus des Schätzwerts
n	-	Anzahl der Arbeitsvorgänge
$p_i$	%	Anteil der Aufträge der Klasse i an der Gesamtanzahl an Aufträgen
R	BKT	Reichweite
RS	Std	Rückstand
S	Std	Standardabweichung
TAA	BKT	Terminabweichung im Abgang
$TAA_{RS}$	BKT	Terminabweichung aus Rückstand
$TAA_U$	BKT	Terminabweichung aus unsicheren Auftragszeiten
TAE	BKT	Bearbeitungsende eines Auftrags
$t_e$	min/ME	Einzelzeit
$t_r$	min	Rüstzeit
TT	%	Termintreue
TZAU	%	Auftragszeittreue
$TZAU_{krit}$	%	kritische Auftragszeittreue
TZU	BKT	Zugangstermin
U	Std	Unsicherheit
$U_r$	%	relative Unsicherheit
ZAU	Std	Auftragszeit
ZDF	BKT	Durchführungszeit
ZDL	BKT	Durchlaufzeit
ZUE	BKT	Übergangszeit
$\alpha_1$	-	Streckfaktor



## 1 Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Komplexe Produkte, große Auftragszeiten und eine Montage im Baustellenprinzip charakterisieren die Unikatproduktion. Die Produktionsplanung in der Unikatfertigung ist aufgrund der Einmaligkeit von Unsicherheiten gekennzeichnet [Gruß10]. Informationsdefizite über das Produkt in der frühen Phase der Auftragsabwicklung sind Ursache für zahlreiche Unsicherheiten innerhalb der Produktionsplanung. Zum Zeitpunkt der Arbeitsplanung liegen in der Unikatproduktion wegen der simultanen Konstruktion und Termin-, Kapazitäts- und Arbeitsplanung häufig nur unvollständige Produkt- und Prozessdaten vor [Ecks10, Kuhl94]. Die Auftragszeit spiegelt den notwendigen Kapazitätsbedarf zur Fertigstellung eines Auftrags wider [Wese14]. Innerhalb des Produktentstehungsprozesses bildet die frühzeitige Kenntnis über die Auftragszeiten einen zentralen Erfolgsfaktor, da diese für zahlreiche weitere Planungsschritte wie die Termin- und Kapazitätsplanung als Eingangsinformation dienen [Scha14]. Stehen zu einem späteren Zeitpunkt detailliertere Daten zur Verfügung, sind wesentliche Richtgrößen bereits festgesetzt und können nur eingeschränkt berücksichtigt werden. In der Praxis wird diesem Informationsdefizit durch den Einsatz von Erfahrungs- und Schätzwerten begegnet [Jako13]. Unsichere Auftragszeiten generieren Turbulenzen im Produktionsablauf und senken die logistische Leistungsfähigkeit. Sie stellen insbesondere eine Herausforderung für die Termintreue dar [Koh02, Li08]. Ohne eine geeignete Antwort auf die unsicheren Auftragszeiten drohen den Unternehmen Kostensteigerungen infolge von Lieferverzug, Auslastungsverlusten und erhöhten Beständen [Toli11, Tu11]. Um im internationalen Wettbewerb erfolgreich zu sein, ist eine hohe logistische Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. Deshalb werden einerseits Sicherheitsfaktoren wie Zeit- und Kapazitätspuffer vorgehalten, um unsichere Auftragszeiten bereits in der Planung zu kompensieren. Nicht angemessen dimensionierte Puffer senken jedoch die logistische Zielerreichung. Mangels Alternative wird eine schlechtere Qualität der Planung in Kauf genommen, um überhaupt eine Planung zu ermöglichen. Andererseits sind Maßnahmen zur Kompensation der Auswirkungen von Unsicherheiten mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden [Gebh09].

Unsichere Auftragszeiten verursachen unsichere Kosten, da der Ressourcenverbrauch unsicher ist. Zwar existieren zahlreiche Ansätze aus dem Risikomanagement, die sich mit Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung auseinandersetzen. Allerdings beziehen sich diese in der Regel auf Risiken, die sich aus Unsicherheiten der Supply Chain, der Kundenbeziehung oder aufgrund von Umwelteinflüssen ergeben, z.B. haben Kersten und Singer untersucht, wie sich Supply-Chain-Risiken durch Flexibilität beherrschen lassen [Kers10]. Besonders im Projektmanagement existieren zahlreiche Ansätze für die Kostenkalkulation bei unsicheren Aufwänden. Zudem gibt es diverse Verfahren, um unsichere Dauern in der Terminierung abzubilden.

Eine unsichere Nachfrage und unsichere Bearbeitungszeiten erzeugen Turbulenz in der Produktion mit der Folge von hohen Kosten und langen Lieferzeiten. Vor diesem Hintergrund ist die Bestimmung des Kapazitätsbedarfs und damit die Kapazitätsabstimmung für Unternehmen und ihre Zulieferer eine besondere Herausforderung. Tu schlägt vor, auf die eingeschränkte Zuverlässigkeit der Termin- und Kapazitätsplanung mit kurzfristigen und umfangreichen Maßnahmen der Kapazitätssteuerung zu reagieren [Tu11].

Bislang fehlt ein Verfahren, die Unsicherheit von Auftragszeiten zu analysieren und diese in der Produktionsplanung und -steuerung zu berücksichtigen, mit dem Ziel die logistischen Zielgrößen trotz Unsicherheit zu erfüllen.

### 1.2 Zielsetzung

Ziel ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das unsichere Auftragszeiten systematisch in die Produktionsplanung integriert und dadurch Unternehmen unterstützt, ihre Planungsqualität zu erhöhen und eine hohe logistische Zielerreichung sicherzustellen. Das zu entwickelnde Verfahren soll insbesondere zwei Aspekte adressieren: Zum einen soll das Verfahren Transparenz über die Auswirkungen, die Ursachen und die Wechselwirkungen von unsicheren Auftragszeiten schaffen. Dafür gilt es einen geeigneten Modellierungsansatz für unsichere Auftragszeiten zu entwickeln. Zum anderen soll die Modellierung unsicherer Auftragszeiten in den Planungsprozess integriert werden, um frühzeitig die potenziellen Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten bestimmen und zielgerichtet Maßnahmen auswählen zu können. Das zu entwickelnde Vorgehen soll den Anwender befähigen, unsichere Auftragszeiten zu identifizieren, zu quantifizieren, zu bewerten und in der Planung zu berücksichtigen.

Aus dieser Zielsetzung leiten sich vier Teilziele ab:

1. *Allgemeingültigkeit für die Unikatfertigung:* Ziel ist es, mit einer allgemeingültigen Modellierung verschiedene Ausprägungen unsicherer Auftragszeiten unabhängig von der Branche des Unikatherstellers analysieren und abbilden zu können.
2. *Transparenz über unsichere Auftragszeiten:* Die Methode soll es ermöglichen, die unterschiedlichen Ursachen der unsicheren Auftragszeiten zu erkennen. Außerdem sind die Wechselwirkungen zwischen unsicheren Auftragszeiten und den logistischen Zielgrößen zu erfassen und zu visualisieren. Dies soll es dem Anwender ermöglichen, Defizite in der Produktionsplanung zu erkennen und Maßnahmen abzuleiten.
3. *Berücksichtigung von unsicheren Auftragszeiten im Planungsprozess:* Ein weiteres Ziel ist es, identifizierte unsichere Auftragszeiten explizit in den Planungsprozess einbinden und bewerten zu können. Dies gestattet es dem Unternehmen, Maßnahmen zielgerichtet zu ergreifen und die logistische Zielerreichung, insbesondere die Termintreue, zu erhöhen und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Dabei sollen verschiedene Maßnahmen aufgezeigt werden, um die Unsicherheit von Auftragszeiten oder zumindest ihre Auswirkungen reduzieren zu können.
4. *Praxistauglichkeit:* Das Verfahren soll sich für den Einsatz in der Praxis eignen. Dies beinhaltet eine intuitive, aufwandsarme Anwendung des Verfahrens und einfache, verständliche Analysehilfsmittel. Zudem soll das Verfahren individuelle Eigenheiten der Produktionsplanung bei den Anwenderunternehmen, wie z.B. bei den Datenverarbeitungssystemen oder in den Prozessen berücksichtigen können.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Das erste Kapitel beinhaltet die *Einleitung*, unterteilt in die drei Unterkapitel Ausgangssituation, Zielsetzung und Aufbau der Arbeit. Das zweite Kapitel *Stand der Technik* enthält die für das Verständnis der Arbeit relevanten

Grundlagen. Es umfasst die Unterkapitel Unikatproduktion, Auftragsabwicklung in der Unikatproduktion, Modellierungsgrundlagen, Unsicherheit und Lösungsansätze für Unsicherheiten in der Produktionsplanung.

Daran schließt sich das dritte Kapitel *Forschungsdefizit* an. Es beschreibt die Defizite in der bestehenden Produktionsplanung der Unikatproduktion. Aus diesen Defiziten leitet sich der Forschungsbedarf ab. Das Kapitel endet mit einer Abgrenzung des Untersuchungsbereichs.

Das vierte Kapitel *Modellierung unsicherer Auftragszeiten für die Produktionsplanung* beschreibt den entwickelten Lösungsansatz, um unsichere Auftragszeiten bei der Berechnung von logistischen Zielgrößen zu berücksichtigen. Es setzt sich aus den Unterkapiteln Anforderungen, Modellierung von unsicheren Auftragszeiten, Modellierung der logistischen Zielgrößen bei unsicheren Auftragszeiten und einem Zwischenfazit zusammen.

Darauf folgt das fünfte Kapitel *Analyse von unsicheren Auftragszeiten*. Dieses Kapitel beschreibt ein Verfahren, um unsichere Auftragszeiten bereits in der Planung zu berücksichtigen. Es umfasst sechs Unterkapitel. Das erste Unterkapitel gibt einen Überblick über die Ziele der entwickelten Analyse und die Struktur des entwickelten Verfahrens. Die Analyse umfasst die vier Phasen *Identifizieren unsicherer Auftragszeiten*, *Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten*, *Bewerten unsicherer Auftragszeiten* und *Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten*. Jeweils ein Unterkapitel beschreibt eine der vier Phasen detailliert. Das Verfahren nutzt die zuvor in Kapitel vier entwickelte Modellierung von unsicheren Auftragszeiten. Das Kapitel endet mit einem Zwischenfazit.

In Kapitel sechs *Anwendungsbeispiele* wird das entwickelte Verfahren anhand von zwei Anwendungsbeispielen evaluiert. Zunächst zeigt ein fiktives Beispiel, wie die Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten auf einen einzelnen Auftrag quantifiziert und bewertet werden können. Dann werden die Rahmenbedingungen des zweiten Anwendungsbeispiels aus der schiffbaulichen Unikatproduktion beschrieben. Das zweite Anwendungsbeispiel umfasst zwei Arbeitssysteme. Jeweils ein Unterkapitel enthält die Ergebnisse der Analyse eines Arbeitssystems. Das Kapitel endet mit einer Evaluation des Verfahrens.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel sieben. Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1 dargestellt.

<b>Kapitel 1: Einleitung</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Problemstellung</li><li>• Zielsetzung</li><li>• Aufbau der Arbeit</li></ul>
<b>Kapitel 2: Stand der Technik</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Unikatproduktion</li><li>• Auftragsabwicklungsprozess in der Unikatproduktion</li><li>• Modellierungsgrundlagen</li><li>• Unsicherheit</li><li>• Lösungsansätze für Unsicherheiten in der Produktionsplanung</li></ul>
<b>Kapitel 3: Forschungsdefizit</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Defizite</li><li>• Forschungsbedarf</li><li>• Abgrenzung des Untersuchungsgebiets</li></ul>
<b>Kapitel 4: Modellierung unsicherer Auftragszeiten für die Produktionsplanung</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Anforderungen</li><li>• Modellierung von unsicheren Auftragszeiten</li><li>• Modellierung der logistischen Zielgrößen bei unsicheren Auftragszeiten</li><li>• Zwischenfazit</li></ul>
<b>Kapitel 5: Analyse von unsicheren Auftragszeiten</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Überblick</li><li>• Identifizieren unsicherer Auftragszeiten</li><li>• Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten</li><li>• Bewerten unsicherer Auftragszeiten</li><li>• Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten</li><li>• Zwischenfazit</li></ul>
<b>Kapitel 6: Anwendungsbeispiele</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Anwendungsbeispiel für die Auftragssicht</li><li>• Beschreibung des Anwendungsbeispiels für die Arbeitssystem Sicht</li><li>• Arbeitssystem I Rahmenbau</li><li>• Arbeitssystem II Rohrmontage</li><li>• Evaluation der entwickelten Modellierung</li></ul>
<b>Kapitel 7: Schlussbetrachtung</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Zusammenfassung</li><li>• Ausblick</li></ul>

14073

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

## 2 Stand der Technik

Zuerst beschreibt Unterkapitel 2.1 die Eigenschaften der Unikatproduktion, um das spätere Einsatzgebiet der zu entwickelnden Methodik zu erläutern. Unterkapitel 2.2 gibt einen Einblick in den Auftragsabwicklungsprozess in der Unikatproduktion. Grundlagen zur Modellierung der logistischen Zielgrößen werden in Unterkapitel 2.3 vorgestellt. In das Themenfeld der Unsicherheit führt das Unterkapitel 2.4 ein. Der Stand der Technik endet mit Lösungsansätzen für Unsicherheiten in der Produktionsplanung.

### 2.1 Unikatproduktion

Dieses Unterkapitel umfasst zwei Abschnitte. Im ersten Abschnitt wird zum einen der Begriff Unikatproduktion definiert, zum anderen werden die wesentlichen Merkmale der Unikatproduktion erläutert. Im zweiten Abschnitt werden die Treiber der Unsicherheit beschrieben, die im Wesentlichen auf die Merkmale der Unikatproduktion zurückzuführen sind.

#### 2.1.1 Definition und Merkmale

Die Unikatproduktion beschreibt die einmalige Herstellung eines kundenindividuellen Produktes. Dabei umfasst der Begriff den Auftragsabwicklungsprozess mit den Prozessschritten Fertigung und Montage sowie Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Produktionsplanung und -steuerung [Hirs92b, Tiet17].

Um die Treiber von Unsicherheiten in der Unikatproduktion herauszuarbeiten, wird zunächst der Auftragsabwicklungsprozess der Unikatproduktion mittels des morphologischen Schemas nach Schuh charakterisiert [Schu12]. Auch wenn in der Praxis Abweichungen von dieser Charakterisierung möglich sind, geben die nachfolgenden Aussagen einen Überblick über die typischen Merkmale der Unikatproduktion. Die Unikatproduktion ist eine Auftragsfertigung nach dem Engineer-to-Order-Prinzip mit anschließender Baustellenmontage [Matt15]. Die Erzeugnisstruktur umfasst in der Regel mehrere Ebenen und komplexe, umfangreiche Produktionspläne [Hick00, Hick07]. Unikate zeichnen sich durch eine hohe Komplexität aus und weisen häufig Projektcharakter auf. Die Fertigungsart ist die Einmalfertigung. Sämtliche produkt-, prozess- und planungsrelevanten Daten müssen für jedes Produkt neu erzeugt werden. Der Erzeugnisbedarf und der Großteil der Sekundärbedarfe werden auftragsorientiert ermittelt. Da die Baugruppen und -teile meist nicht spezifiziert sind, leitet sich der Bedarf aus Rumpfstücklisten ab. Aufgrund von langen Wiederbeschaffungszeiten erfolgt die Beschaffung und Bearbeitung der Rohstoffe für die Teilefertigung häufig bereits zu einem frühen Zeitpunkt in der Auftragsabwicklung [Schm08, Schu12]. Die Neuplanung verursacht hohe monetäre und personelle Aufwände in den indirekten Bereichen [Gruß10, Hirs92a, Kuhl94]. Baugruppen und -teile werden vorgefertigt und im Anschluss auf der Baustelle montiert [Hirs92a]. Als Ablaufarten der Teilefertigung sind die Werkstattfertigung und die Inselfertigung verbreitet. In der Montage von Baugruppen kommen neben den Ablaufarten Bauplatzmontage und Gruppenmontage auch vereinzelt die Reihen- und Fließmontage zum Einsatz. Um die Komplexität der Erzeugnisse zu beherrschen, umfasst die Produktion häufig zahlreiche Fertigungs- bzw. Montageschritte. Die Fertigungsstruktur ist somit stark ausgeprägt. Die Auftragszeiten der Arbeitsvorgänge variieren deutlich. Typische Branchen der Unikatproduktion sind der Anlagenbau, die Investitionsgüterindustrie, der Schiffbau, das Baugewerbe und der Prototypenbau [Matt15].

Abbildung 2 zeigt die idealtypischen Merkmale einer Unikatproduktion (grau markiert).

Merkmalsausprägung	Merkmalsausprägung				
<b>Auftragsauslösungsart</b>	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung mit Rahmenaufträgen	Kundenanonyme Vor-/ Kundenauftragsbezogene Endproduktion	Produktion Auf Lager	
<b>Auftragsauslösungsart</b>	Standarderzeugnisse ohne Varianten	typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten	
<b>Erzeugnisstruktur</b>	mehnteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur		mehnteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	geringteilige Erzeugnisse	
<b>Ermittlung des Erzeugnis-/Komponentenbedarfs</b>	bedarfsorientiert auf Erzeugnisebene	erwartungs- & bedarfsorientiert auf Komponentenebene	erwartungsorientiert auf Komponentenebene	erwartungsorientiert auf Erzeugnisebene	verbrauchsorientiert auf Erzeugnisebene
<b>Auslösung des Sekundärbedarfs</b>	auftragsorientiert		teilw. auftragsorientiert/teilw. periodenorientiert	periodenorientiert	
<b>Beschaffungsart</b>	weitgehender Fremdbezug		Fremdbezug in größerem Umfang	Fremdbezug unbedeutend	
<b>Bevorratung</b>	Keine Bevorratung von Bedarfpositionen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfpositionen auf oberen Strukturebenen	Bevorratung von Erzeugnissen	
<b>Fertigungsart</b>	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung	
<b>Ablaufart in der Teilfertigung</b>	Werkstattfertigung	Inselfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung	
<b>Ablaufart in der Montage</b>	Baustellenmontage	Gruppenmontage	Reihenmontage	Fließmontage	
<b>Fertigungsstruktur</b>	Fertigung mit hohem Strukturierungsgrad		Fertigung mit mittlerem Strukturierungsgrad	Fertigung mit geringem Strukturierungsgrad	
<b>Kundenänderungseinflüsse während der Fertigung</b>	Änderungseinflüsse in größerem Umfang		Änderungseinflüsse in gelegentlich	Änderungseinflüsse unbedeutend	

14074

Abbildung 2: Charakterisierung einer Unikatproduktion in Anlehnung an [Schu12]

### 2.1.2 Treiber der Unsicherheit

Unsicherheiten bzgl. des Produktdesigns, der Prozessplanung und der Termin- und Kapazitätsplanung sind fester Bestandteil der Unikatproduktion [Tu06]. Die Merkmale der Unikatproduktion sind die Treiber für die Unsicherheit in der Planung. Kuhlmann identifiziert fünf

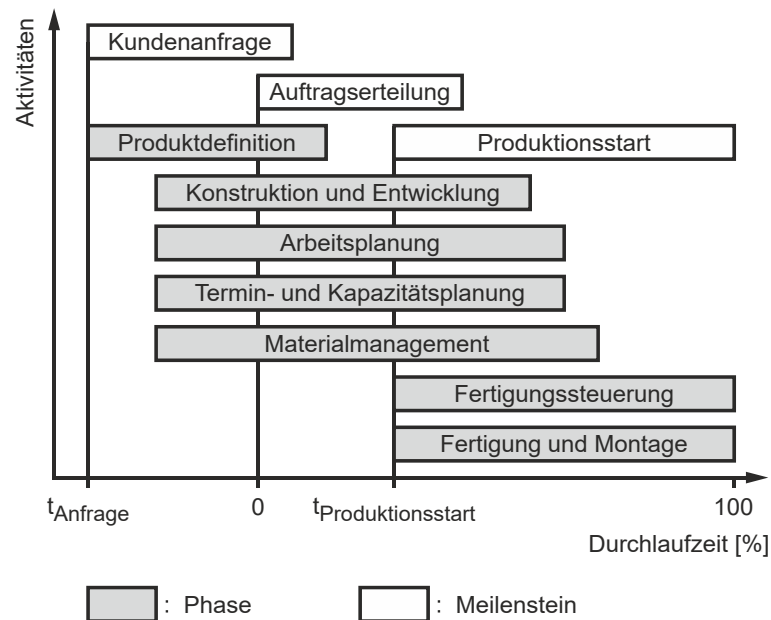
relevante Merkmale: eine hohe Relevanz der Angebotsplanung, einen ausgeprägten Kundeneinfluss, Simultaneous Engineering, unvollständige Produkt- und Prozessdaten und komplexe Material- und Informationsflüsse [Kuhl94].

### Hohe Relevanz der Angebotsplanung

In der Unikatproduktion mündet häufig nur ein geringer Teil der Angebote in Aufträgen [Rimp10, Wagn06]. Inhalt des Angebots sind die Produktspezifikation, der Liefertermin und der Preis [Fell92]. Der Aufwand für die Angebotserstellung muss in einem angemessenen Verhältnis zum Auftragswert stehen, deshalb wird nur eine vorläufige Produktspezifikation erstellt [Rimp10, Wagn06]. Mit der Vertragsunterzeichnung sind in der Regel der Preis, der Liefertermin und damit die maximale Durchlaufzeit fixiert. Die Verträge enthalten zum Teil sehr hohe Vertragsstrafen für Lieferterminabweichungen. Deshalb haben insbesondere die Termintreue und die Einhaltung der Lieferzeit einen hohen Stellenwert [Grab14]. Die besonders relevanten Informationen werden in einem schriftlichen Angebot festgehalten [Schu12].

### Simultaneous Engineering

Die Aktivitäten der Auftragsabwicklung werden im Sinne des Simultaneous Engineering parallel bzw. überlappend ausgeführt, um kurze, wettbewerbsfähige Lieferzeiten zu gewährleisten [Vajn14]. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die zeitliche Anordnung der Aktivitäten der Auftragsabwicklung in der Unikatproduktion. In der Darstellung werden zwei Aspekte deutlich: Zum einen werden zahlreiche Aktivitäten bereits vor Auftragserteilung angestoßen und zum anderen werden die Aktivitäten Konstruktion, Arbeitsplanung, Termin- und Kapazitätsplanung parallel ausgeführt.



14075

Abbildung 3: Produktentstehungsphasen in der Unikatproduktion in Anlehnung an [Gruß10] und [Hirs92a]

### **Kundeneinfluss**

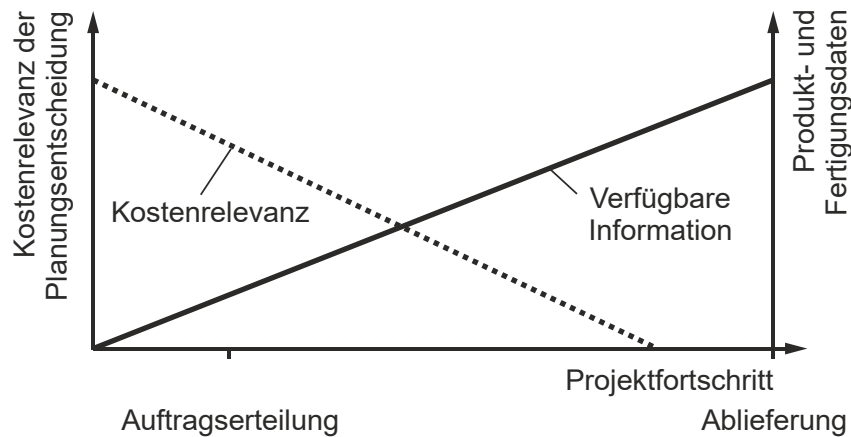
Aufgrund der kundenindividuellen Auftragsfertigung sind Kundenänderungswünsche bzgl. Design und Funktion in der Unikatproduktion während der gesamten Auftragsabwicklung präsent und verursachen zusätzliche Aufwände. Sie beeinflussen sämtliche Aktivitäten der Auftragsabwicklung. Die Individualisierung wirkt sich in den folgenden Aspekten auf die Produktionsplanung aus: hohe Planungsunsicherheit, parallele Produktionsplanung und Produktion, hohe Planungsungenauigkeiten, steigende Koordination bei externen Auftragsvergaben und hoher Abstimmungsaufwands mit externen Zulieferern. Zugleich hat der Kunde häufig besonders restriktive Qualitätsvorgaben. Die Kundenänderungswünsche und der hohe Qualitätsanspruch verursachen lange Durchlaufzeiten. Weiterhin erzwingen Kundenänderungswünsche kurzfristige Anpassungen der Termin- und Kapazitätspläne, sodass die Komplexität der Fertigungssteuerung zunimmt [Gruß10, Pill06, Spec09].

### **Komplexe Material- und Informationsflüsse**

Die mehrstufige Produktstruktur, der umfangreiche Fremdbezug von Bauteilen und -gruppen über ein Netzwerk von Zulieferern und die Integration von Entwicklungs-, Konstruktions- und Produktionsdienstleistern erhöhen die Komplexität der internen und externen Material- und Informationsflüsse [Gruß10]. Die Transparenz der betrieblichen Prozesse und deren Prognostizierbarkeit nimmt ab, zugleich steigt die Anfälligkeit für fehlerhafte Prozesse und Abweichungen von Plan-Zuständen in der Auftragsabwicklung. Charakteristisch für den Schiffbau und die Baubranche sind Abweichungen vom Plan-Zustand [Baue07, Wand14].

### **Unvollständige und fehlerhafte Produkt- und Prozessdaten**

Weil die Produkt- und Prozessdaten während der Auftragsabwicklung erst sukzessive erzeugt werden, ist die Datengrundlage im Projektfortschritt über lange Zeiträume unvollständig, sodass die Auftragsabwicklung mit hoher Unsicherheit behaftet ist. Dies ist insbesondere deswegen problematisch, weil der Hauptteil der Kosten bereits sehr früh festgelegt wird. Daher ist die Kalkulation vor der Auftragserteilung mit hohen Unsicherheiten behaftet, sodass ein hohes Kostenrisiko entsteht. Die Informationsverfügbarkeit der Produkt- und Prozessdaten und die Kostenrelevanz der Planungsentscheidungen während der Auftragsabwicklung sind in Abbildung 4 visualisiert.



14076

Abbildung 4: Informationsverfügbarkeit in der Auftragsabwicklung nach [Gruß10] vgl. [Hirs92a]

Abhilfe schaffen Schätzverfahren auf Basis von Referenz- und Erfahrungswerten [Schu12]. Die Informationsdefizite sind je nach Aktivität der Auftragsabwicklung unterschiedlicher Natur und beeinflussen abhängige Aktivitäten:

Zum Zeitpunkt der Angebotserstellung fehlen belastbare Informationen über den Kapazitäts- und Ressourcenbedarf sowie über die Durchlaufzeit des Auftrags. Die Terminierung und die Kapazitätsplanung erfolgen nur sehr grob. Schätzverfahren sind fester Bestandteil des Vorgehens. Ist der Liefertermin eines Auftrags bestätigt, werden Langläuferteile frühzeitig disponiert. Die Selbstkosten und der Liefertermin können nicht exakt berechnet werden. Die Preisfindung ist mit wirtschaftlichen Risiken verbunden [Fisc07, Gahr06, Rimp10, Schu12].

Aufgrund der komplexen Produktstruktur bearbeitet die Konstruktion die Teilprojekte sequenziell, sodass Erzeugnisstruktur und Stücklisten nur schrittweise spezifiziert werden. Häufig stehen notwendige Informationen aus anderen Fachabteilungen nicht oder nicht in ausreichender Qualität zur Verfügung. Infolgedessen bleiben häufig Restriktionen zwischen Teilprojekten zunächst unerkannt. Zu einem späteren Zeitpunkt erfordern sie aufwändige Konstruktionsänderungen und nachgelagerte, iterative Planungsaktivitäten, beispielsweise in der Auftragsgrobterminierung und der Ressourcengrobplanung [Ecks10, Schu12]. Unvollständige Produkt- und Prozessinformationen verringern die Zuverlässigkeit der Arbeitsplanung so, dass Arbeitsgänge fehlen oder Auftragszeiten falsch sind. Die Termin- und Kapazitätsplanung erfolgt, bevor die Kapazitätsbedarfe und Durchlaufzeiten anhand von Arbeitsplänen ermittelt wurden. Das Materialmanagement benötigt detaillierte Stücklisten für Materialbestellungen. Diese stehen jedoch erst spät bereit, sodass Bestellungen zum Teil ohne Stücklisten in manuellen Prozessen ausgelöst werden [Schm08, Schm12, Schu14].

Wandt identifiziert neben einem Mangel an Standardisierung, Dokumentation und der lokalen Verfügbarkeit von Planungswissen den geringen Detaillierungsgrad in der Produktionsplanung als Ursache für fehlerhafte und unvollständige Planungsergebnisse. Die Termin-, Kapazitäts- und Reihenfolgeplanungen in der Unikatproduktion erfolgen mit einem möglichst geringen Detaillierungsgrad, um den Planungsaufwand zu begrenzen, obwohl ein

hoher Detaillierungsgrad aufgrund der Anzahl der Aufträge und der Komplexität der Produktionsabläufe erforderlich wäre [Flei97]. Wegen der Unsicherheit und der begrenzten Planungskapazitäten entfällt eine detaillierte Planung mit Ausnahme von kritischen Baugruppen und -teilen vielfach komplett. Diese erfolgt kurzfristig durch das Führungspersonal am Arbeitssystem, was häufig zu ineffizienten Produktionsabläufen führt [Wand14].

Aus diesen Erläuterungen leitet sich ab, dass Unsicherheiten fester Bestandteil der Unikatproduktion sind und diese nicht vollständig beseitigt werden können. Insbesondere der unsichere Kapazitätsbedarf stellt die Produktionsplanung vor große Herausforderungen. Um dennoch eine hohe logistische Zielerreichung zu gewährleisten, bedarf es einer modifizierten Produktionsplanung und -steuerung, die Unsicherheiten explizit berücksichtigt.

### **2.2 Auftragsabwicklungsprozess in der Unikatproduktion**

Um den Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion begegnen zu können, ist es notwendig, die vielfältigen Aus- und Wechselwirkungen von Informationsdefiziten im Auftragsabwicklungsprozess der Unikatproduktion zu kennen, da diese für die Entstehung und Fortpflanzung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion verantwortlich sind. Aus diesem Grund werden die Arbeitsplanung und die Produktionsbedarfsplanung, die Bestandteil der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist, und deren Ausprägung in der Unikatproduktion kurz erläutert und im Anschluss kritisch bewertet.

Die Arbeitsplanung gestaltet die Einzelprozesse und den Inhalt der Fertigung und Montage [Schu12]. Die Kernaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung sind laut Aachener PPS-Modell die Produktionsprogrammplanung, die Produktionsbedarfsplanung, die Eigenfertigungsplanung und -steuerung sowie die Fremdbezugsplanung und -steuerung. Sie adressieren strategische, taktische und operative Ebenen der Planung und unterscheiden sich in ihrem Detaillierungsgrad. Die Aufgaben bauen aufeinander auf und nutzen die Ergebnisse vorheriger Aufgaben als Eingangsinformation. Um eine rasche und kostengünstige Produktionsprogrammplanung zu gewährleisten, wird der Umfang und die Komplexität der Planung reduziert. Hierzu werden Daten aggregiert und es wird mit einem geringen Detaillierungsgrad gearbeitet. Etablierte Verfahren sind "Netzplantechnik, Belastungsprofile, Standardeinsatzprofile und Referenzverfahren" [Schu12].

Ziel der Planung ist ein Planungsstand, der die Projektziele zu Zeit, Kosten und Qualität gewährleistet oder übertrifft. Zugleich ermöglicht das begrenzte Zeit- und Kapazitätsbudget nur eine grobe Planung. Dieser Zielkonflikt wird auch als Dilemma der Planung bezeichnet [Hofs07].

#### **2.2.1 Arbeitsplanung**

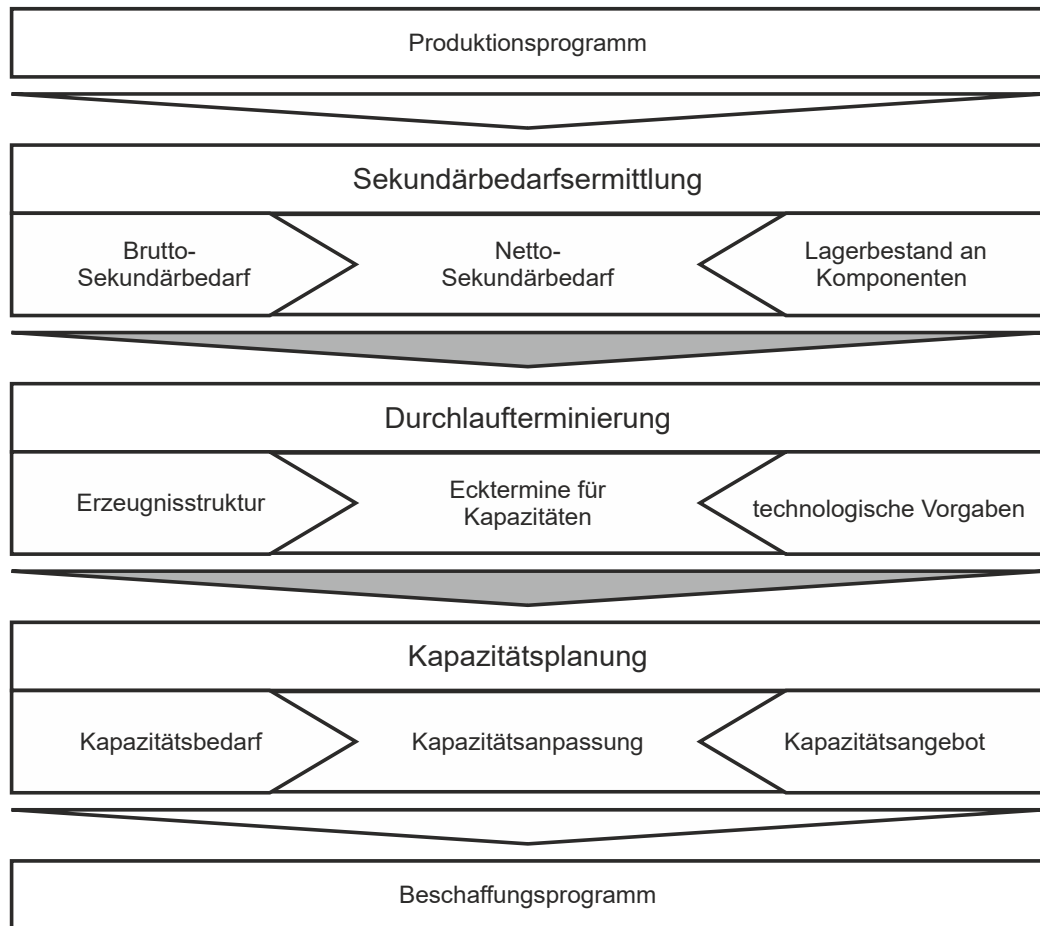
Die Arbeitsplanung untergliedert sich in die vier Schritte Rohmaterialbestimmung, Arbeitsvorgangsermittlung, Fertigungsmittelzuordnung und Vorgabezeitermittlung und dient dazu, Arbeitspläne aus Zeichnungen und Stücklisten abzuleiten [Wien09]. Die Vorgabezeiten können mit verschiedenen Verfahren ermittelt werden. Es wird zwischen Verfahren, die Ist-Zeiten nutzen (Befragen oder Messen) und Verfahren, die Soll-Sollzeiten verwenden (Vergleichen und Schätzen, Berechnen, Zusammensetzen oder Systeme vorbestimmter Zeiten), unterschieden. Entscheidend für die Wahl des Verfahrens sind die geforderte Genauigkeit und die Wirtschaftlichkeit [Böge14]. Arbeitspläne dokumentieren die Fertigungs-

und Montageprozesse einer Baugruppe oder eines Baugruppentails und enthalten Informationen zu deren Reihenfolge, den notwendigen Materialien und Arbeitssystemen sowie den Auftragszeiten [Schu12]. Die Arbeitspläne und insbesondere die Auftragszeiten bilden die Grundlage für zahlreiche Prozesse der Auftragsabwicklung wie beispielsweise für die Termin- und Kapazitätsplanung sowie für die betriebliche Kostenrechnung [Olbr70, Wien09]. In der Einzelfertigung ersetzen zum Teil um Wiederbeschaffungszeiten und Kapazitätsbedarfsschätzungen ergänzte Stücklisten die Arbeitspläne [Schu12]. Die Genauigkeit der Schätzverfahren beeinflusst die Planungsqualität. Schätzverfahren sind immer mit einer Unsicherheit behaftet. Aufgrund der verbindlichen Preisangebote und des vereinbarten Liefertermins ist eine zuverlässige Aufwandsschätzung für die Unternehmen der Unikatproduktion essentiell [Kust11].

Mögliche Unsicherheiten bestehen daher bzgl. der Anzahl der Arbeitsvorgänge, der Reihenfolge der Arbeitsvorgänge, der Art des Kapazitätsbedarfs und der Auftragszeiten. In dieser Arbeit gilt es zu prüfen, welche dieser Unsicherheiten zu berücksichtigen sind. Im Anschluss ist ein geeigneter Modellierungsansatz zu finden, um diese in die Planung zu integrieren.

### **2.2.2 Produktionsbedarfsplanung**

Die Produktionsbedarfsplanung umfasst unter anderem die Aufgaben Beschaffungsartzuordnung, Durchlaufterminierung, Kapazitätsbedarfsermittlung und Kapazitätsabstimmung (Abbildung 5). Je nach Erzeugnisstruktur und Fertigungsart variiert der Detaillierungsgrad. Ergebnis der Produktionsbedarfsplanung sind zum einen Plan-Starttermine für die Aufträge und Plan-Bearbeitungstermine für die Arbeitsvorgänge. Zum anderen ergibt sich das Kapazitätsbedarfsprofil der Arbeitssysteme. Außerdem wird das Beschaffungsprogramm bestimmt und terminiert [Lödd16].



14077

Abbildung 5: Ablauf der Produktionsbedarfsplanung in Anlehnung an [Lucz04]

### Durchlaufterminierung

Die Durchlaufterminierung bestimmt auf Basis der Erzeugnisstruktur, der Arbeitspläne und der Übergangsmatrizen für jeden Auftrag die Ecktermine an den Arbeitssystemen. Erforderliche Eingangsinformationen sind die Durchführungs- und Übergangszeiten der Aufträge sowie die Restriktionen zwischen den Teilaufträgen. Wegen der in der Unikatproduktion vertraglich fixierten Liefertermine erfolgt die Durchlaufterminierung als Rückwärts-terminierung [Schu12].

Die Durchlaufzeiten für die einzelnen Fertigungsaufträge werden beim Auftragsfertiger aufgrund unvollständiger Konstruktions- und Planungsunterlagen häufig aus Vergleichsdaten ähnlicher Aufträge oder mit Hilfe von Erfahrungswerten abgeleitet. Sie sind deshalb mit einer Unsicherheit behaftet [Schu12].

### Kapazitätsbedarfsbestimmung

Die Kapazitätsbedarfsbestimmung aggregiert für die einzelnen Planungsperioden den Kapazitätsbedarf je Kapazität bzw. Kapazitätsgruppe wie beispielsweise Mitarbeiter, Transportmittel, Betriebsmittel oder Flächen. Eingangsinformationen sind die terminierten Aufträge und deren Kapazitätsbedarf in Gestalt von Auftragszeiten. Weil beide Eingangsinfor-

mationen unsicher sind, gilt dies auch für den Kapazitätsbedarf, der im Kapazitätsbedarfsplan festgehalten wird [Schu12]. Meist erfolgt eine Planung auf Kapazitätsgruppen [Schu12].

### **Kapazitätsabstimmung**

Ziel der Kapazitätsabstimmung ist es, Abweichungen zwischen dem Kapazitätsbedarf und -angebot zu ermitteln und diese mittels Kapazitätsflexibilität und/oder Belastungsflexibilität zu beseitigen. Die Kapazitätsflexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Arbeitssystems, die Kapazität durch geeignete Maßnahmen wie Überstunden, zusätzliche Schichten oder Leiharbeiter an die Belastung anzupassen, während die Belastungsflexibilität die Fähigkeit darstellt, den Kapazitätsbedarf an der verfügbaren Kapazität auszurichten, indem Aufträge verschoben, extern vergeben oder abgelehnt werden. Bei komplexen Erzeugnisstrukturen sind die Auswirkungen auf abhängige Fertigungs- oder Montageaufträge zu berücksichtigen [Lödd16].

Eine hohe logistische Zielerreichung setzt zuverlässige Planwerte für die Auftragszeiten und das Kapazitätsangebot voraus, da eine gute Fertigungssteuerung eine fehlerhafte Produktionsplanung nicht kompensieren kann [Lödd16].

### **Beschaffungsartzuordnung**

Die Beschaffungsartzuordnung legt fest, welche Fertigungsaufträge intern bearbeitet bzw. extern an Lieferanten vergeben werden (Make-or-buy-Entscheidung). Grundsätzlich handelt es sich um eine strategische Entscheidung, da hiermit die Fertigungstiefe festgelegt wird. Mit der Fremdvergabe von Aufträgen ermöglicht es die Beschaffungsartzuordnung, kurzfristig auf Schwankungen des Kapazitätsbedarfs zu reagieren (Belastungsflexibilität) [Lödd16]. Zudem werden mögliche Risiken auf den Lieferanten übertragen [Weig08]. Die Beschaffungsartzuordnung bietet Potenziale, die Unsicherheit für das Unternehmen zu reduzieren.

### **Zusammenfassung**

Im Auftragsabwicklungsprozess gibt es nicht die eine Unsicherheit, sondern zahlreiche unterschiedliche Unsicherheiten. Jede Planungsaufgabe ist mit individuellen Unsicherheiten behaftet. Prozessbedingt sind diese auf vielfältige Art und Weise miteinander verknüpft. Ergebnis der Literaturrecherche ist weiterhin, dass die Arbeitsplanung eine wesentliche Quelle von Unsicherheiten für die PPS darstellt. Logische Schlussfolgerung ist es, die Unsicherheiten durch Neujustierung und -gestaltung der Arbeitsplanung zu beseitigen. Aber die Charakteristika der Unikatproduktion begrenzen diesen Ansatz hinsichtlich Anwendbarkeit und Wirkung. Daraus leitet sich der Bedarf ab, zusätzlich zu möglichen Anpassungen der Arbeitsplanung die Unsicherheiten in der PPS zu berücksichtigen.

### **2.2.3 Termin- und Kapazitätspuffer als Reaktion auf Unsicherheiten in der Planung**

Der Einsatz von Zeit- und Kapazitätspuffern ist ein etabliertes Verfahren in der Produktionsplanung der Unikatproduktion, um Unsicherheiten zu berücksichtigen [Baue07, Riis92]. Im Schiffbau hat sich der Ansatz etabliert, unsicheren Auftragszeiten mit impliziten Zeitpuffern in Gestalt von Sicherheitszuschlägen zu begegnen. Tatsächlich werden dadurch Kapazitätspuffer vorgehalten und Abweichungen von der Plan-Auftragszeit kompensiert [Wand14].

Zeit- und Kapazitätspuffer lassen sich aufwandsarm in die Planung integrieren und verbessern bei regelmäßigen Unsicherheiten die Planungsergebnisse [Gebh09], aber ihr Einsatz hat mehrere Nachteile:

- In der Praxis werden geplante Zeit- und Kapazitätspuffer häufig unabhängig vom tatsächlichen Bedarf ausgeschöpft. Die dauerhafte Bereitstellung von Sicherheitspuffern und Reservekapazitäten vermindert die Produktivität und verursacht relativ hohe Kosten, da sie unabhängig vom Bedarfsfall bezahlt werden müssen [Eber13, Gebh09, Jens96, Wern02]. Deshalb sind Puffer zielgerichtet und restriktiv einzusetzen. Zusätzlich ist es ratsam, nach Inanspruchnahme eines Puffers die Ursache zu analysieren [Eber13].
- Bei den meisten Arbeitsvorgängen verlängern Zeitpuffer unnötig die Durchlaufzeit. Außerdem verdecken sie Störungen, sodass Verbesserungspotenziale nicht entdeckt und ausgeschöpft werden [Gruß10].
- Durch die Kopplung von Planungsebenen werden die Puffer auf andere Planungsschritte übertragen und können so die gesamten Planungsergebnisse verzerren [Eber13, Gebh09, Jens96, Wern02].
- Ohne Monitoring des Pufferverzehrns können Abweichungen der Auftragszeit nicht erfasst werden. Wandt empfiehlt, die Zeitpuffer durch Kapazitätspuffer zu ersetzen, oder stattdessen durch eine erhöhte Transparenz über Unsicherheiten und eine verbesserte Prognose der Durchlaufzeiten die Zeitpuffer zu reduzieren, um unsicheren Auftragszeiten zu begegnen [Wand14].

Vor diesem Hintergrund ist insbesondere der Einsatz von Zeitpuffern kritisch zu bewerten. Es gilt ein anderes Verfahren zu finden, um den unsicheren Auftragszeiten in der Unikatproduktion angemessen zu begegnen.

### 2.3 Modellierungsgrundlagen

In den folgenden Abschnitten werden einige Modellierungsgrundlagen zu Auftragszeiten, Auftragszeitstrukturen sowie Produktionskennlinien vorgestellt. Sie eignen sich, um die Aus- und Wechselwirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Kenngrößen qualitativ zu veranschaulichen. Darüber hinaus bilden sie die Grundlage für das zu entwickelnde Verfahren zur Quantifizierung und Bewertung von unsicheren Auftragszeiten.

#### 2.3.1 Auftragszeit

Die Auftragszeit entspricht der vorgesehenen Bearbeitungszeit eines Arbeitsvorgangs an einem Arbeitssystem. Sie setzt sich aus der Rüstzeit, der Losgröße und der Einzelzeit zusammen [Nyhu12]. In der Praxis und Forschung werden die Begriffe Vorgabezeit, Arbeitsinhalt, Arbeit, Aufwand und Kapazitätsbedarf synonym verwendet. Die Auftragszeit wird in Stunden gemessen und steht im Arbeitsplan [Lödd16].

$$ZAU = \frac{LG \cdot t_e + t_r}{60} \quad (1)$$

<i>ZAU</i>	<i>Auftragszeit [Std]</i>
<i>LG</i>	<i>Losgröße [ME]</i>
<i>t<sub>e</sub></i>	<i>Einzelzeit [min/ME]</i>
<i>t<sub>r</sub></i>	<i>Rüstzeit [min]</i>

In der Unikatproduktion beträgt die Losgröße eins, daher werden in dieser Arbeit vereinfachend Rüstzeit und Einzelzeit zur Auftragszeit zusammengefasst. Zum Teil sind auch bestimmte Eigenschaften eines Arbeitsvorgangs wie beispielsweise die Bearbeitungsfläche (m<sup>2</sup>), die Bearbeitungslänge (m) oder das Gewicht (kg) der ausschlaggebende Treiber der Auftragszeit. In diesen Fällen ist die Auftragszeit als Funktion der Auftragszeitreiber darstellbar.

### **Auftragszeitstruktur**

Die Auftragszeitstruktur beschreibt die Beschaffenheit der Auftragszeiten der Aufträge an einem Arbeitssystem je Planungsperiode anhand der Kenngrößen mittlere Auftragszeit, Streuung der Auftragszeiten und Variationskoeffizient der Auftragszeiten. Sie bestimmt maßgeblich die logistische Zielerreichung.

### **Mittlere Auftragszeit**

Die mittlere Auftragszeit entspricht dem arithmetischen Mittel der Auftragszeiten der Aufträge eines Arbeitssystems [Nyhu12]:

$$ZAU_m = \frac{\sum_{i=1}^n ZAU_i}{n} \quad (2)$$

$ZAU_m$	<i>mittlere Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_i$	<i>Auftragszeit des Arbeitsvorgangs i [Std]</i>
$n$	<i>Anzahl der Arbeitsvorgänge [-]</i>

### **Standardabweichung der Auftragszeit**

Die Standardabweichung beschreibt die Streuung der Auftragszeiten eines Arbeitssystems [Nyhu12]:

$$ZAU_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ZAU_m - ZAU_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$ZAU_s$	<i>Standardabweichung der Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_m$	<i>mittlere Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_i$	<i>Auftragszeit des i-ten Auftrags [Std]</i>
$n$	<i>Anzahl der Arbeitsvorgänge [-]</i>

### **Variationskoeffizient**

Der Variationskoeffizient erfasst die Variation der Auftragszeiten eines Arbeitssystems. Er berechnet sich aus dem Quotienten der Standardabweichung und der mittleren Auftragszeit und ist dimensionslos [Nyhu12]:

$$ZAU_v = \frac{ZAU_s}{ZAU_m} \quad (4)$$

$ZAU_v$	<i>Variationskoeffizient der Auftragszeit [-]</i>
$ZAU_s$	<i>Standardabweichung der Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_m$	<i>mittlere Auftragszeit [Std]</i>

### Durchführungszeit

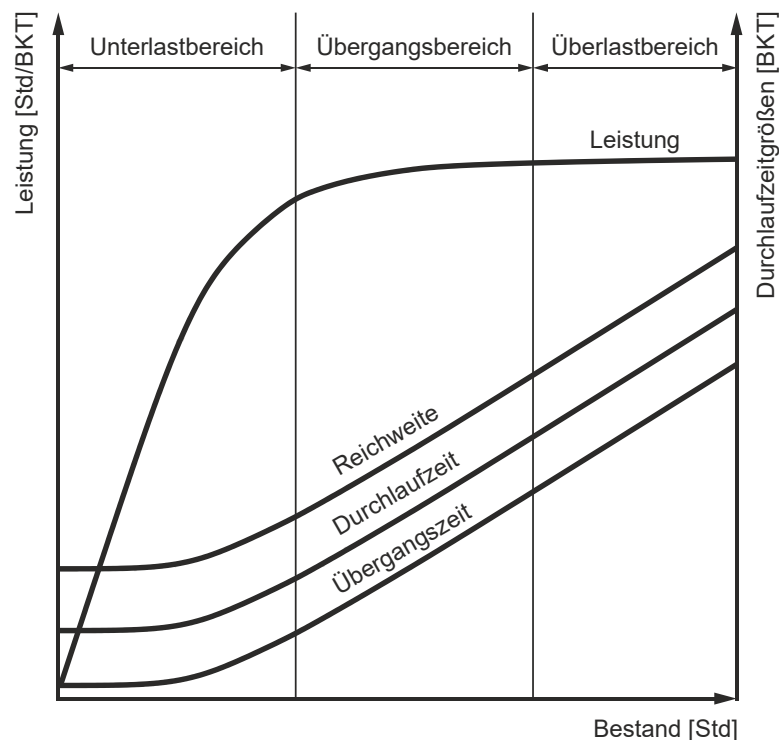
Die Durchführungszeit ist die Dauer, in der ein Arbeitssystem durch einen Auftrag belegt ist. Gemäß Formel 5 wird sie aus dem Quotienten aus Auftragszeit und der maximal möglichen Leistung des Arbeitssystems berechnet [Nyhu12].

$$ZDF = \frac{ZAU}{L_{max}} \quad (5)$$

$ZDF$	Durchführungszeit [BKT]
$ZAU$	Auftragszeit [Std]
$L_{max}$	maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

### 2.3.2 Produktionskennlinien

Produktionskennlinien sind ein Sammelbegriff für verschiedene logistische Kennlinien. Sie veranschaulichen den Zusammenhang zwischen den logistischen Zielgrößen und eignen sich für deren Verbesserung und Überwachung. Einsatzgebiete sind die logistische Positionierung, das Produktionscontrolling, die Produktionsplanung und -steuerung, die Auswahl von Planungs- und Steuerungsstrategien und die Auslegung der Produktionsstruktur [Nyhu12]. Die mittlere Leistung, die mittlere Durchlaufzeit, die mittlere Reichweite und die mittlere Übergangszeit werden als Kennlinien über den mittleren Bestand in einem Diagramm aufgetragen (Abbildung 6).



14078

Abbildung 6: Produktionskennlinie und Betriebszustände [Nyhu12]

Die Kennlinien der drei Zeitkenngrößen verlaufen parallel zueinander. Der Abstand zwischen den Kennlinien der Durchlaufzeit und der Übergangszeit entspricht der Durchführungszeit. Die Differenz zwischen Reichweiten- und Durchlaufzeitkennlinie ist bei stark

streuenden Auftragszeiten besonders ausgeprägt. Der Verlauf der Kennlinien unterteilt sich in die drei Bereiche Unterlastbereich, Übergangsbereich und Überlastbereich. Im Unterlastbereich nimmt die Leistung proportional zum Bestand zu. Das Arbeitssystem ist nur wenig ausgelastet. Es kann zugehende Aufträge unmittelbar bearbeiten, die Übergangszeiten sind minimal und die Durchlaufzeit ist nahezu konstant. Im Übergangsbereich steigt die Leistung nur noch degressiv. Es entsteht eine Warteschlange (Pufferbestand). Die Reichweite nimmt annähernd proportional zum Bestand zu. Analog gilt dies für die Durchlaufzeit und die Übergangszeit. Im Überlastbereich nähert sich die mittlere Leistung asymptotisch der maximalen Leistung, während die Durchlaufzeitkenngrößen linear zur Bestandserhöhung steigen. Ein Betriebspunkt beschreibt einen eindeutigen Zustand eines Arbeitssystems. Die Ausprägung der logistischen Kenngrößen und damit der Verlauf der Kennlinien ist abhängig von der Auftrags- und Kapazitätsstruktur des Arbeitssystems. Die Produktionskennlinien zeigen den Zielkonflikt zwischen kurzen Durchlaufzeiten und einem niedrigen Bestandsniveau einerseits und einer hohen Leistung andererseits [Nyhu12].

Nyhuis hat eine Näherungsgleichung entwickelt, um reale Produktionskennlinien zu berechnen. Dies ermöglicht es, die logistischen Zielgrößen für jedes beliebige Bestandsniveau zu ermitteln. Beispielsweise kann die Leistungskennlinie anhand von Formel 6 ermittelt werden [Nyhu12]:

$$B_m(L_m) = BI_{\min} \times \left( \frac{L_m}{L_{\max}} + \alpha_1 \times \left( 1 - \sqrt[4]{1 - \frac{L_m}{L_{\max}}} \right)^4 \right) \quad (6)$$

$B_m$	<i>mittlerer Bestand [Std]</i>
$BI_{\min}$	<i>idealer Mindestbestand [Std]</i>
$L_m$	<i>mittlere Leistung [Std/BKT]</i>
$L_{\max}$	<i>maximal mögliche Leistung [Std/BKT]</i>
$\alpha_1$	<i>Streckfaktor [-]</i>

Aufbauend auf der Leistungskennlinie und dem Trichtermodell kann die Durchlaufzeitkennlinie hergeleitet werden. Das entwickelte Verfahren beruht auf den drei Parametern Streckfaktor, maximale Leistung und idealer Mindestbestand. Letzterer ist der wichtigste Parameter [Nyhu91]. Der ideale Mindestbestand ist definiert als der mittlere Bestand eines idealen Produktionsprozesses, in dem weder ein Auftrag auf das Freiwerden des Arbeitssystems noch das Arbeitssystem auf das Eintreffen eines Auftrags warten muss, sodass die Leistung die maximale Leistung des Arbeitssystems erreicht. Die Formel 7 zur Berechnung des idealen Mindestbestands lautet [Nyhu12]:

$$BI_{\min} = ZAU_m + \frac{ZAU_s^2}{ZAU_m} \quad (7)$$

$BI_{\min}$	<i>idealer Mindestbestand [Std]</i>
$ZAU_m$	<i>mittlere Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_s$	<i>Standardabweichung der Auftragszeit [Std]</i>

Der Streckfaktor bildet den Pufferbestand des Arbeitssystems ab. Er ist abhängig von der Belastungssteuerung bzw. der Kapazitätsflexibilität und entsprechend deren Ausprägung unterschiedlich zu dimensionieren, um eine hohe Auslastung zu gewährleisten. [Nyhu12]

Korrekte Betriebsdaten zu Auftragszeit- und Kapazitätsstrukturen ermöglichen es, die zuvor genannten Parameter zu berechnen. Obwohl diese Daten auch für andere zentrale PPS-Funktionen notwendig sind, ist deren Datenqualität oft unzureichend (vgl. u. a. [Domb88, Nyhu12]).

Nyhuis hat unter anderem die Auswirkungen von fehlerhaften Auftragszeitstrukturdaten auf die Produktionskennlinien untersucht und bewertet [Nyhu12]. Er differenziert zwischen den drei verschiedenen Fällen: Fehler bzgl. der mittleren Auftragszeit, des Variationskoeffizienten und der Transportzeit. Transportzeiten nehmen eine untergeordnete Rolle ein.

*Fehlerhafte mittlere Auftragszeit:* Sie wird beispielsweise durch einen systematischen Fehler in der Arbeitsplanung erzeugt. Eine fehlerhafte mittlere Auftragszeit beeinflusst sowohl die Parameter der Produktionskennlinien als mit dem Bestand und der Leistung auch wesentliche Messgrößen des Produktionsprozesses. Nyhuis stuft diesen Fehler als unkritisch für den Einsatz von Kennlinien ein, weil sich die Fehler größtenteils aufheben. So ergibt sich die Reichweite korrekt aus dem Verhältnis des Bestands und der Leistung. Die mittlere Durchlaufzeit ist eine Messgröße und darum unabhängig von der Auftragszeit. Allerdings weist Nyhuis darauf hin, dass die maximale Leistung anzupassen ist [Nyhu12].

*Fehlerhafter Variationskoeffizient:* Ursache dieses Fehlers ist häufig eine Arbeitsplanung, die Auftragszeiten anhand von Referenz- und Schätzwerten ermittelt. Ein fehlerhafter Variationskoeffizient wirkt sich signifikant auf den idealen Mindestbestand aus. Darum können die Produktionskennlinien in diesem Fall nicht zuverlässig eingesetzt werden, um Rationalisierungspotenziale zu erkennen oder um Produktionsprozesse zu gestalten [Nyhu12].

Produktionskennlinien bieten umfangreiche Möglichkeiten, um logistische Potenziale zu identifizieren und durch geeignete Maßnahmen zu erschließen. Grundsätzlich sind sie für jede Art von Auftragsabwicklungsprozessen geeignet, allerdings bedarf es einer zuverlässigen Aussage über die Auftragszeitstruktur. Diese Voraussetzung ist in der Unikatproduktion nur bedingt erfüllt, weil die Produkt- und Prozessdaten unvollständig sind (vgl. Abschnitte 2.1.2 und 2.2.1). Daher ist ein Vorgehen zu entwickeln, das es ermöglicht trotz Unsicherheit eine korrekte Auftragszeitstruktur zu ermitteln.

## 2.4 Unsicherheit

### Definition

In der Forschung existieren zahlreiche unterschiedliche Definitionen des Begriffs Unsicherheit, vergleiche hierzu [Fisc07, Keup99, Koh02, Muni14, Schn91, Stei07, Waze10, Zimm01]. Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Quellen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die jeweilige Quelle verwiesen. Die Unikatproduktion und die Instandhaltungsproduktion haben ähnliche Merkmalsausprägungen hinsichtlich der Auftragsauflösung, der Erzeugnisstruktur, der Auslösung des Sekundärbedarfs und der Kundenänderungseinflüsse

und sind von ähnlichen Informationsdefiziten geprägt. Aus diesem Grund gilt für diese Arbeit in Anlehnung an Koppold, der den Begriff der Unsicherheit im Kontext der Instandhaltungsproduktion definiert hat, die folgende Definition der Unsicherheit:

*Unsicherheit in der Unikatproduktion beschreibt die mögliche Abweichung von einem geplanten Zustand und ist die Folge der Verarbeitung unvollständiger oder falscher Informationen. Plan- und Ergebnisgrößen, die aus unsicheren Informationen ermittelt werden, können nicht eindeutig bestimmt werden. Zusätzliche oder andere Informationen verändern zuvor definierte Plan- und Ergebnisgrößen und erfordern Anpassungen in der Planung und Steuerung der Aufträge [Kopp17].*

### **Unsicherheit in der Auftragsabwicklung**

Eine umfangreiche Literaturrecherche hat gezeigt, dass zahlreiche Parameter der Auftragsabwicklung und insbesondere der Produktionsplanung und -steuerung mit Unsicherheit behaftet sein können. Dazu zählen die Nachfrage bzgl. der Menge, die Produktspezifikation, die Art der Prozessschritte, die Betriebsmittelverfügbarkeit, die Personalverfügbarkeit, die Liefertermine, die Liefermengen, die Preise, die Kosten, die Fertigungs- und Montagereihenfolgen, die Anzahl der Arbeitsvorgänge je Auftrag, die Auftragszeiten, die Durchlaufzeiten und die Qualität [Gebh09, Groß10, Mula06, Rimp10, Tu11, Waze09].

Rimpau und Mula ordnen die verschiedenen Unsicherheiten den einzelnen Aufgaben der Auftragsabwicklung zu [Mula06, Rimp10]:

- Angebotskalkulation (Preis, Material-, Fertigungs-, Montage-, Gemeinkosten)
- Konstruktion (Produktspezifikation, Zerlegung in Baugruppen und Bauteile)
- Arbeitsplanung (Arbeitsschritte, Fertigungsverfahren, Auftragszeiten)
- Terminplanung (Starttermine, Durchlaufzeiten, Lieferanten)
- Kapazitätsplanung (Kapazitätsbedarf, Kapazitätsangebot, Lieferanten)
- Reihenfolgeplanung (Restriktionen zwischen einzelnen Arbeitsvorgängen)

Aufgrund der Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Planungsaufgaben wirken sich einzelne Unsicherheiten auf mehrere Planungsaufgaben aus. Hervorzuheben ist die Unsicherheit in der Auftragszeit, da diese sowohl die Termin- und Kapazitätsplanung als auch die Reihenfolge maßgeblich beeinflusst.

### **Bestehende Klassifizierungen von Unsicherheit**

Es wurden verschiedene Klassifizierungen für Unsicherheiten entwickelt. Vereinfacht lassen sich zwei Arten von Klassifizierungen unterscheiden. Zum einen kann die Unsicherheit anhand der Ausprägung der Unsicherheit klassifiziert werden. Diese Klassifizierung dient dazu, einen geeigneten Modellierungsansatz für die Unsicherheit zu identifizieren und dadurch die Unsicherheit zu quantifizieren. So benennt Rimpau folgende Kriterien: Erscheinungsart (quantitative oder qualitative Unsicherheit), Zeitabhängigkeit, Vorgängerabhängigkeit, Auftretensart (stetig oder diskret). Zum anderen gibt es die handlungsorientierte Klassifizierung mit dem Fokus auf die Analyse von Ursache und Wirkung von Unsicherheit. Die wirkungsbezogene Interpretation der Unsicherheit bewertet die Auswirkungen der Unsicherheit auf vorab definierte Zielgrößen und dient als Entscheidungsgrundlage für zu ergreifende Maßnahmen. Die ursachenbezogene Interpretation zeigt dagegen mögliche Ansatzpunkte in Prozessen auf, um Unsicherheiten zu identifizieren, zu reduzieren bzw. zu be-

seitigen. Außerdem bestimmen die Ursachen maßgeblich die Beeinflussbarkeit der Unsicherheit. Je nach Interpretation lassen sich weitere Unterkriterien definieren. Wirkungsbezogene Unterkriterien sind in der Regel Zeit, Kosten und Qualität während ursachebezogen häufig zwischen internen und externen Ursachen differenziert wird. So unterscheidet Koppold für die PPS von Instandhaltungsprozessen zwischen produktbedingten, prozessbedingten, organisationsbedingten, zustandsbedingten und extern bedingten Ursachen von Unsicherheit [Kopp17].

### **Auswirkungen von Unsicherheit**

Unsicherheiten aufgrund von Kundenänderungswünschen, Störungen der Supply Chain, Eilaufträgen und Störungen der Arbeitssysteme erzeugen Turbulenzen im Produktionssystem. Sie steigern die Komplexität in der PPS, vermindern die Planungsqualität, erhöhen den Steuerungsaufwand und beeinträchtigen die logistische Zielerreichung [Gebh09, Wern02, Wien02]. Insbesondere verursachen sie Störungen im Produktionsablauf [Tu11]. Beispielsweise sind unsichere Bearbeitungszeiten bzw. ein unsicheres Kapazitätsangebot ein Treiber von Terminabweichungen [Koh06]. In mehrstufigen, hochgradig vernetzten Produktionssystemen übertragen Dominoeffekte die Auswirkungen der Unsicherheit auf verbundene Arbeitssysteme und nachgelagerte Arbeitsvorgänge [Koh03]. Vor diesem Hintergrund sind Unsicherheiten eine besondere Herausforderung für die Produktionsplanung und -steuerung [Waze10]. Die verminderte logistische Zielerreichung zeigt sich in Gestalt von Lieferterminabweichungen, verlängerten Durchlaufzeiten, Auslastungsverlusten und erhöhten Kosten. Die Unternehmen verlieren an Wettbewerbsfähigkeit.

### **Ursache von Unsicherheit**

Die Ursache von Unsicherheit sind Informationsdefizite. Die Informationsdefizite beziehen sich entweder auf die Modellierung oder die Eingangsdaten [Waze10]. Den Zusammenhang zwischen Informationsverfügbarkeit und Unsicherheit hat Knetsch analysiert und qualitativ in einem Diagramm visualisiert. Dabei lassen sich drei Arten von Informationsdefiziten identifizieren: keine, unvollständige oder fehlerhafte Informationen. Der Informationsbedarf ist abhängig von dem betrachteten Modell. Der Abstand zwischen der erreichbaren und der aktuellen Information beschreibt die reduzierbare Unsicherheit. Hingegen definiert der Bereich zwischen erreichbarer Information und vollkommener Information die nicht reduzierbare Unsicherheit. Der maximal erreichbare Informationsstand ist abhängig von den Randbedingungen. Knetsch beschreibt vier verschiedene Informationszustände: vollkommene Information (Punkt 1), maximal bestimmbare Information (Punkt 2), unvollkommene Information (Punkt 3), keine Information (Punkt 4) [Knet04].

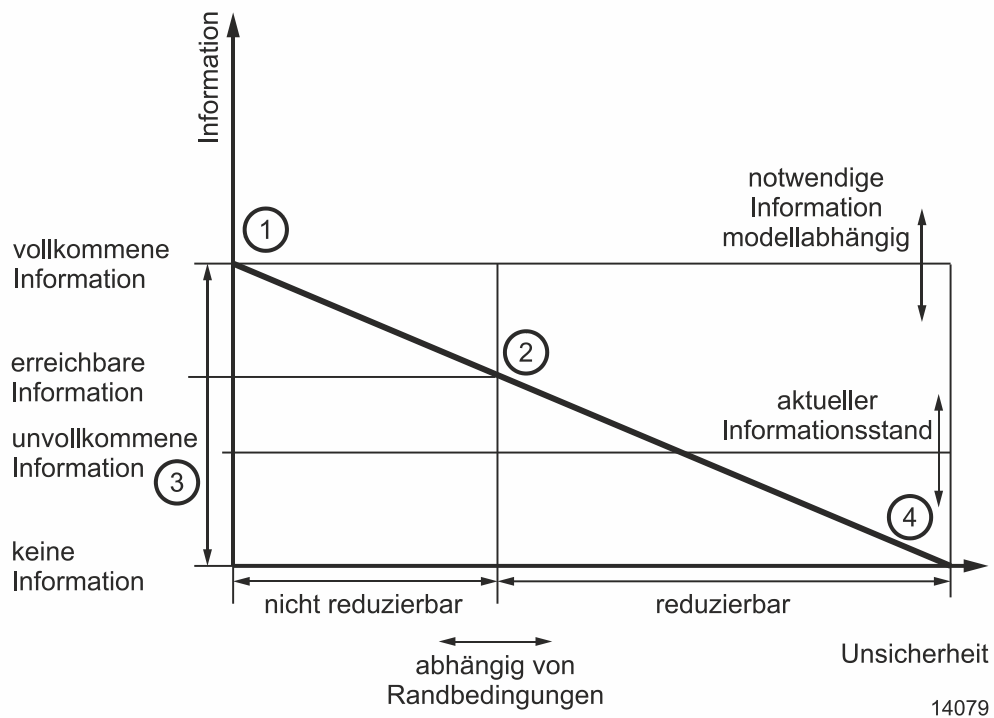


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Information und Unsicherheit in Anlehnung an [Knet06]

Weiterhin differenziert Koppold zwischen offensichtlicher, verdeckter, versteckter (im Nachgang) und unzugänglicher Information. Aufbauend auf den Arbeiten von [Hoff13, Mile74, Nett14], [Mile74], [Nett14] identifiziert Koppold einen verstärkenden Effekt auf die Unsicherheit, da diese die Beschaffung und Verarbeitung der vorhandenen Informationen behindert [Kopp17].

Beispielhaft genannt ist die Unsicherheit bzgl. der Kapazitätsverfügbarkeit, da keine Informationen über Krankheit, Fluktuation, Störungen vorhanden sind. Informationen über besondere Umwelteinflüsse sind immer unsicher, da gewisse Ereignisse nicht vorhersehbar sind. Ebert nennt folgenden Gründe für Unsicherheiten in Projekten: Verwendung von Schätzwerten aufgrund unvollständiger Informationen, Kundenänderungswünsche, Entdeckung konstruktiver oder technischer Restriktionen nach Projektstart, fehlende Qualifikation der Mitarbeiter, Qualitätsmängel und Leistungsdefizite [Eber13].

Eine weitere Ursache für Informationsdefizite ist die unzureichende Zugänglichkeit der Daten bzw. eine mangelhafte Kommunikation zwischen den Fachabteilungen. Durch spätere Änderungen der Konstruktion im Produktentwicklungsprozess in Folge von Iterationschleifen werden zum Teil veraltete Konstruktionsstände für die Arbeitsvorbereitung genutzt [Ecks10]. Die genannten Informationsdefizite haben ihren Ursprung innerhalb des Unternehmens und treten insbesondere in der frühen Phase der Planung auf. Die Komplexität der Fertigungs- und Produktstruktur erschwert die Informationsbeschaffung und -verarbeitung und steigert dadurch zusätzlich die Ausprägung der Unsicherheit [Hoff13, Kopp17, Mile74, Scho14].

### **Maßnahmen gegen Unsicherheit**

In der Praxis haben sich verschiedene Maßnahmen etabliert, um Unsicherheiten zu begegnen. Eine ausreichende Kenntnis über die vorhandenen Unsicherheiten und deren Ausprägung ist die Voraussetzung, um Maßnahmen gezielt zu initiieren. In Anlehnung an das Risikomanagement lassen sich drei Typen von Maßnahmen unterscheiden [Eber13]: *Unsicherheit reduzieren*, *Auswirkungen minimieren* und *Unsicherheit akzeptieren*.

*Unsicherheit reduzieren*: Um die Unsicherheit zu beseitigen, sind zusätzliche Informationen zu beschaffen. Dies ist mit einem zeitlichen und monetären Mehraufwand verbunden, so dass die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme im Einzelfall zu prüfen ist. Weil die Kosten für den Informationsgewinn mit zunehmendem Informationsstand häufig überproportional steigen, lässt sich Unsicherheit meist nicht wirtschaftlich sinnvoll vollständig vermeiden. Zudem gibt es Informationen, die erst nach Auftragsabschluss vorhanden sind. Eine Restunsicherheit existiert immer [Jako13, Kopp17].

*Auswirkungen minimieren*: Es ist unmöglich, Unsicherheit vollständig zu beseitigen [Mula06]. Deshalb wurden Maßnahmen entwickelt, um die Auswirkungen von Unsicherheit zu verringern. Diese Maßnahmen integrieren Unsicherheiten in die Auftragsabwicklung. Hier ist zwischen proaktiven und reaktiven bzw. adaptiven Verfahren zu unterscheiden. Zu den proaktiven Verfahren zählen der Einsatz von Belastungs- und Kapazitätsflexibilität [Kopp17] sowie robuste Algorithmen für die Durchlaufterminierung, die Maschinenbelegungs- und Reihenfolgeplanung. Reaktive/adaptive Verfahren durchlaufen nach dem Eintreten einer Unsicherheit einen Planungsschritt erneut, sodass der Produktionsplan an die neuen Randbedingungen angepasst ist [Tu11].

*Unsicherheit akzeptieren*: Wenn die Unsicherheit nur gering ist oder keine geeignete Maßnahme zur Verfügung steht, wird die Unsicherheit akzeptiert. Maßnahmen werden in diesem Fall nicht ergriffen [Weig08].

### **2.5 Lösungsansätze für Unsicherheiten in der Produktionsplanung**

Die Integration von Unsicherheiten in die PPS ist Gegenstand einer großen Anzahl an Arbeiten und unterstreicht die Relevanz des Themas. Es existieren zahlreiche Forschungsarbeiten, die sich anhand der drei Kategorien Branche, Disziplin innerhalb der Auftragsabwicklung und Modellierungsansatz einordnen lassen. Modellierungsansätze wurden für die Aggregierte Planung, die Hierarchische Planung, die Materialbedarfsplanung, die Kapazitätsplanung, die Supply-Chain-Planung, das Bestandsmanagement und die Produktionsplanung mit dem MPR II-Verfahren entwickelt. Diese lassen sich den vier Modellierungsansätzen Konzeptionell, Analytisch, Künstliche Intelligenz und Simulationsmodelle zuordnen [Mula06]. Trotz der Vielzahl an Forschungsarbeiten zu Unsicherheiten in der Planung ist kein Modellierungsansatz bekannt, der Unsicherheiten mit der Theorie der logistischen Kennlinien verknüpft. Jedoch eignen sich einige Elemente der bestehenden Modellierungsansätze als Grundlage, um die Kennlinientheorie um Unsicherheiten zu erweitern und somit die Kennlinientheorie auch für neue Anwendungsfelder zu erschließen, für die es bisher aufgrund der vorhandenen Unsicherheit nicht oder nur eingeschränkt möglich war. Dazu zählt die Unikatproduktion in jeglicher Ausprägung, allen voran der Schiffbau, der Anlagenbau und die Bauindustrie.

### **Verfahren nach Koppold**

Koppold hat ein Verfahren entwickelt, um unsichere Auftragszeiten in die Kapazitätsplanung und -steuerung bei Instandhaltungsprozessen zu integrieren [Kopp17]. Er modelliert unsichere Auftragszeiten mittels einer modifizierten Normalverteilungsfunktion – genannt Unsicherheitsverteilungsfunktion. Die Parameter der Verteilungsfunktion erlauben es, unterschiedliche Klassen der Unsicherheit abzubilden. Die Klassen der Unsicherheit sind aus vorhandenen Daten zu ermitteln. Zukünftige Aufträge werden aufgrund von gemeinsamen Merkmalen einer dieser Klassen zugeordnet. Koppold ermittelt mittels Faltung der Verteilungsfunktionen einzelner unsicherer Aufträge die Verteilungsfunktion des Kapazitätsbedarfs eines Arbeitssystems für einen bestimmten Planungszeitraum. Im Anschluss bestimmt er ein Konfidenzintervall, gleicht dieses mit der vorhandenen Kapazitätsflexibilität ab und passt diese entsprechend an. Das Verfahren ermöglicht es, Unsicherheiten in der Kapazitätsplanung und -steuerung abzubilden und diese durch gezielte Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität zu beherrschen. Das Verfahren überzeugt durch den Einsatz von vorhandenen Daten zur Bestimmung der Verteilungsfunktion und durch den Fokus auf die Kapazitätsplanung. Für die Integration der Planung in der Unikatproduktion ist dieser Ansatz nur eingeschränkt nutzbar, da der Ansatz mit der Instandhaltung ein anderes Anwendungsgebiet adressiert und insbesondere keine Auswirkungen auf die Terminplanung berücksichtigt. Die Informationsdefizite in der Planung der Instandhaltung und der Unikatproduktion sind ähnlich mit dem Unterschied, dass die Instandhaltung die Demontage, die Befundung und die Montage umfasst, während die Unikatproduktion die Fertigung und Montage umfasst. Bei der Instandhaltung ist die Auftragszeit unbekannt, da vor der Befundung kein exaktes Schadensbild vorliegt. Hingegen ist in der Unikatproduktion die Auftragszeit unbekannt, da das Produkt erstmalig erzeugt wird.

### **Verfahren nach Wandt**

Wandt hat in seiner Arbeit das Modell der Fertigungssteuerung auf die Unikatfertigung auf Baustellen übertragen. Er benennt Unsicherheiten als eine der Herausforderungen der Unikatproduktion, ohne diese jedoch zu quantifizieren und in sein Modell zu integrieren. Laut Wandt sind implizite Zeitpuffer in den Auftrags- und Durchlaufzeiten eine etablierte Maßnahme gegen Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion. Sie erzeugen jedoch Intransparenz, verzerren die Kapazitätsplanung und verursachen Planungshektik. Als Beispiel führt er an, dass bei Terminabweichung trotz umfangreicher Zeitpuffer in den Durchlaufzeiten eine Kapazitätsanpassung initiiert wird, obwohl die Zeitpuffer ausreichen würden, um den Auftrag rechtzeitig fertigzustellen. Der Einsatz von impliziten Zeitpuffern in den Auftragszeiten hat drei Nachteile [Wand14]:

- Implizite Zeitpuffer verdecken Rückstände und Kapazitätspuffer. Die Kapazitätssteuerung kann nur eingeschränkt ihre Wirkung entfalten.
- Implizite Zeitpuffer verhindern realistische, zuverlässige Rückmeldedaten von Auftragszeiten. Diese sind jedoch Voraussetzung, um zukünftige Auftragszeiten zuverlässig mittels Algorithmen abschätzen zu können.
- Transparente Zeitpuffer sind Voraussetzung, um den tatsächlichen Kapazitätsbedarf eines Auftrags exakt zu bestimmen und Durchlaufzeiten zu optimieren.

Um eine Kapazitätssteuerung in der Unikatproduktion zu ermöglichen, definiert Wandt in der frühen Phase der Planung Auftragszeit und Kapazitätspuffer separat. Dadurch begegnet er fehlerhaften Planungen in Gestalt von unsicheren Auftragszeiten mit Kapazitätspuffern

anstatt mit Zeitpuffern. Hintergrund ist, dass die Kapazitätssteuerung nicht in der Lage ist, zwischen einem realen Rückstand aufgrund einer Leistungsänderung und einem vermeintlichen Rückstand aufgrund einer Abweichung zwischen Soll- und Ist-Auftragszeit zu differenzieren. Um unsichere Auftragszeiten zu vermeiden, bestimmt er die Auftragszeiten mit zwei verschiedenen Verfahren. Auftragszeiten für repetitive Prozessschritte ermittelt er anhand von parametrisierten Formeln, während Auftragszeiten von seltenen Prozessen durch einen Experten geschätzt werden. Weiteren Forschungsbedarf sieht er in der Entwicklung einer Kennlinientheorie für die Baustellenfertigung, um eine zielgerichtete logistische Positionierung in der Unikatproduktion zu ermöglichen [Wand14].

Die Methodik unterstützt den Anwender nicht dabei, Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion zu erkennen, zu quantifizieren bzw. deren Auswirkungen auf das Arbeitssystem oder die Kennlinientheorie zu veranschaulichen.

### **Verfahren nach Krebs**

Krebs hat ein Verfahren zur Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung von Unsicherheit entwickelt. Das entwickelte Unsicherheitsmodell berücksichtigt sowohl quantitative als auch qualitative Unsicherheiten mittels Verteilungsfunktionen und Fuzzy-Set-Theory. Als Verteilungsfunktionen kommen die Normalverteilung und die Beta-Verteilung zum Einsatz. Das Unsicherheitsmodell wird mit einem Kalkulationsmodell verknüpft. Auf den Ergebnissen einer Monte-Carlo-Simulation erfolgt dann die Standortbewertung und -auswahl [Kreb11].

Das entwickelte Verfahren adressiert eine Problemstellung, die für die Unikatproduktion nicht relevant ist, da der Produktionsstandort entweder durch den Kunden festgelegt wird (Bauwesen) oder durch den Unikatproduzenten selbst festgelegt ist (Schiffbau). Ungeachtet dessen hat Krebs mit seinem Verfahren gezeigt, wie quantitative Unsicherheiten modelliert und bewertet werden können. Obwohl dieses Verfahren nicht die Produktionsplanung und -steuerung der Unikatproduktion adressiert, ist die Modellierung der quantitativen Unsicherheiten über Verteilungsfunktionen und deren Aggregation mittels Monte-Carlo-Simulation universell anwendbar. Darüber hinaus generiert das zweistufige Vorgehen aus der Modellierung der Unsicherheit inklusive der umfangreichen Analysewerkzeuge Transparenz, und die Methode zur schrittweisen Bewertung gewährleistet eine hohe Praxistauglichkeit. Der Ansatz soll auf die Problemstellung dieser Arbeit übertragen werden, um die logistischen Zielgrößen und deren Wechselwirkungen unter Berücksichtigung der Unsicherheit modellieren zu können.

### **Verfahren nach Schollenberger**

Schollenberger entwickelte eine Methodik für eine optimierte Reihenfolgeplanung der Instandhaltung von Lackoberflächen unter Berücksichtigung von unsicheren Bearbeitungszeiten. Dazu untersuchte er den Einfluss von unsicheren Bearbeitungszeiten auf die Reihenfolgebildung mittels Monte-Carlo-Simulation. Die Unsicherheit gibt die prozentuale Abweichung der mittleren Bearbeitungszeit an und ist über das 95 % Intervall definiert. Anhand von empirischen Daten bestimmt Schollenberger mit Hilfe von statistischen Methoden für einzelne Arbeitsschritte die Verteilungsfunktionen der unsicheren Bearbeitungszeiten. Mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der grafischen Methoden Histogramm, QQ-Diagramme und Diagramme mit den kumulierten Häufigkeiten werden die empirische und die theoretische Verteilungsfunktion miteinander verglichen.

Ergebnis der Analyse sind normalverteilte bzw. lognormalverteilte Bearbeitungszeiten je nach Art eines Arbeitsschritts. Mittels Monte-Carlo-Simulation werden die Verteilungsfunktionen der Arbeitsvorgänge und dann die Bearbeitungszeiten der Aufträge ermittelt. Im Anschluss bestimmt ein Algorithmus optimale Reihenfolgen der Aufträge. Die stochastisch ermittelten Reihenfolgen erzielen im Vergleich zum First-in-First-out-Prinzip (FIFO) signifikant bessere Ergebnisse. Die Arbeit veranschaulicht den signifikanten Einfluss von Unsicherheiten auf die logistischen Kennzahlen und zeigt die Notwendigkeit auf, Unsicherheiten in die Planung zu integrieren, um die Aussagekraft der Ablaufplanung zu erhöhen. Das Verfahren nach Schollenberger ermöglicht es, empirische Verteilungsfunktionen für die Bearbeitungszeiten von manuellen Tätigkeiten mit repetitivem Charakter zu bestimmen. Diese Tätigkeiten sind ebenfalls typisch für die Unikatproduktion. Allerdings adressiert das Verfahren mit der Reihenfolgeplanung weder die Termin- noch die Kapazitätsplanung [Scho06].

### **Verfahren nach Wenzel**

Wenzel und Laroque entwickelten zusammen eine Methodik für ein simulationsgestütztes, logistikintegriertes Projektmanagement im Anlagenbau, um durch eine ganzheitliche Projektabsicherung die Liefertreue zu erhöhen, die Planungsqualität zu steigern und dabei Pufferzeiten zu vermeiden [Wenz13]. Dazu integrieren sie zusätzliche Datenquellen und inhärente Unsicherheiten in den klassischen Planungsprozess, um eine vollständige Bewertung der Planungsergebnisse zu ermöglichen. Als relevante Unsicherheiten wurden die Verfügbarkeit von Ressourcen und Material, die Umweltbedingungen sowie die logistischen Prozesse Transport, Lager, Bereitstellung und Umschlag identifiziert.

Wenzel und Laroque nutzen Rückmeldedaten, Erfahrungswissen und Ergebnisse aus Logistiksimulationen, um die Verteilungsfunktionen von Unsicherheiten zu ermitteln [Wenz13]. Sie modellieren die Unsicherheiten der Logistik über Normal- und Gleichverteilungen und prüfen die Robustheit der erzeugten Projektpläne mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation [Wenz13]. Nach Angabe der Autoren bilden umfangreiche empirische Datensätze die Grundlage, um die Unsicherheiten eines Projektes durch qualitativ hochwertige Verteilungsfunktionen zu beschreiben und dann geeignete Handlungsempfehlungen abzuleiten [Wenz13]. Die Auswirkungen von Unsicherheiten werden mittels einer Kombination aus Ablaufsimulation und Optimierungs-, Analyse- und Visualisierungsverfahren bewertet.

Die Methodik beinhaltet eine kontinuierliche Projektüberwachung und unterstützt den Planer durch automatisch erzeugte, alternative Pläne. Außerdem wird es möglich, Abweichungen an Engpassressourcen frühzeitig zu erkennen und durch situative Entscheidungen den Einfluss auf andere Projekte zu begrenzen [Wenz13]. Der kontinuierliche Einsatz der Methodik liefert Rückmeldedaten, die realistischere Zeitabschätzungen in zukünftige Projekte gestatten und somit die Planungsqualität verbessern [Wenz13].

Die Methodik verbessert die Qualität der Projektplanung hinsichtlich Projektdauer und -kosten. Eine tiefgreifende Analyse der Ursache-Wirkbeziehungen von Unsicherheiten ist jedoch nicht Bestandteil. Auch werden lediglich unsichere Dauern und keine unsicheren Auftragszeiten berücksichtigt. Dennoch ist der Ansatz, Unsicherheit durch Verteilungsfunktionen zu modellieren und Rückmeldedaten zu verwenden, um die Planung zu verbessern, aussichtsreich und soll in dieser Arbeit aufgegriffen werden.

### **Verfahren nach Rimpau**

Rimpau entwickelt ein Verfahren, um Risiken in der Angebotskalkulation bei der Herstellung kundenindividueller Produkte wissensbasiert zu bewerten. Es soll das Kostencontrolling in der frühen Phase der Auftragsabwicklung verbessern. Die Kapazitäts- und Terminplanung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Im Fokus der Arbeit steht das Risiko einer Abweichung zwischen realen und kalkulierten Selbstkosten. Dazu erweitert er ein bestehendes Produkt- und Prozesskonfigurationssystem um ein Kosten- und Risikomodell. In Anlehnung an Fischer et al. und Steinmetz definiert er Risiken als Abweichungen von Einflussfaktoren, die indirekt bzw. direkt die Selbstkosten beeinflussen [Fisc07], [Ste07]. Als Ursache für die verschiedenen Risiken benennt er Informationsdefizite während der Auftragsabwicklung. Rimpau identifiziert mittels Nachkalkulation und Experteninterviews zahlreiche Einflussfaktoren innerhalb der verschiedenen Prozesse und ordnet diese einem der vier Haupteinflussfaktoren: Ressourcenverbrauch, Wechselkurs, Ressourcenpreis, Kostenelement zu. Als exemplarische Einflussfaktoren in der Produktion führt er fehlende Arbeitsvorgänge und falsche Vorgabezeiten aufgrund von Fehlern in der Arbeitsvorbereitung an, zudem Kapazitätsmangel und Arbeitsfehler in der Produktion. Die Risiken bildet er über Wahrscheinlichkeitsfunktionen ab und hinterlegt sie in einem wissensbasierten System. Er begründet sein Vorgehen damit, dass die relevanten Risiken grundsätzlich bekannt sind und sich je Produkt nur in ihrer Ausprägung und Art unterscheiden. Die Einzelrisiken werden mittels Monte-Carlo-Simulation aggregiert. Im Anschluss werden die Ergebnisse mit grafischen Verfahren (Kosten-Risiko-Auswertung, Kosten-Risiko-Zeit-Portfolio und Grenzwert-szenarien) interpretiert, um ein kontinuierliches Kostencontrolling, eine zielgerichtete Detaillierung und eine Preisfindung zu ermöglichen. Rimpau begründet den Einsatz der Monte-Carlo-Simulation mit der hohen Transparenz und der einfachen Anwendbarkeit [Rimp10].

Der von Rimpau gewählte Ansatz, Unsicherheiten durch Verteilungsfunktionen abzubilden und unterschiedlich ausgeprägte Unsicherheiten mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation zu verknüpfen, ermöglicht es, die Auswirkungen von Unsicherheiten in der Angebotskalkulation zu bewerten. Er berücksichtigt unter anderem unsichere Herstellkosten und bildet damit implizit unsichere Auftragszeiten ab. Zugleich besticht das vorgestellte Verfahren durch eine hohe Transparenz und eine einfache Bedienbarkeit. Aus diesem Grund soll der Ansatz in dieser Arbeit aufgegriffen werden. Rimpau adressiert mit seinem Verfahren die Angebotskalkulation. Um das Verfahren für die Produktionsplanung und -steuerung einsetzen zu können, sind weitere Anpassungen erforderlich. Die von Rimpau vorgestellten Konzepte und Werkzeuge bilden aber eine gute Ausgangslage.

### **Verfahren nach Giebels**

Giebels entwickelt ein Verfahren zur aggregierten Auftragsplanung in der kundenindividuellen Auftragsfertigung namens EtoPlan. Ziel ist es, trotz der Komplexität eine hohe logistische Zielerreichung zu erzielen. Dazu verknüpft er die Auftragsannahme, die Arbeitsplanung, die Termin- und die Kapazitätsplanung miteinander und führt diese simultan durch. Um die Zuverlässigkeit und Ausführbarkeit der Produktionspläne zu erhöhen, berücksichtigt das Verfahren folgende Unsicherheiten: Starttermine, Durchlaufzeiten und Prozesszeiten. Als Ursache der Unsicherheit führt er unvollständige bzw. fehlerhafte Informationen mangels detaillierter Bauteil- und Prozessinformationen an. Unsichere Starttermine werden mittels Normalverteilungen und unsichere Prozesszeiten und Durchlaufzeiten werden

in Anlehnung an Lau und Somarajan mittels Beta-Verteilungen modelliert. Die Ausprägung der Unsicherheit wird auf Grundlage von Erfahrungswissen festgelegt [Lau95]. Ein Softwareprototyp erlaubt es dem Anwender, die statistischen Parameter interaktiv festzulegen. Dies ermöglicht ein kontinuierliches Monitoring der Kapazitätsverfügbarkeit und unterstützt die Auftragsplanung im Hinblick auf Startzeiten, Durchlaufzeiten, variable Kosten und Lieferterminbestimmung [Gieb00].

Vorteile des Verfahrens sind die Skalierbarkeit und die Fähigkeit, Auswirkungen der Unsicherheiten in der Produktionsplanung und -steuerung transparent und nachvollziehbar abzubilden. Das Verfahren erlaubt es dagegen nicht, die Ausprägung von Unsicherheiten bzw. deren Ursachen zu analysieren. Auch zeigt es keine Maßnahmen gegen die Unsicherheiten und deren Auswirkungen auf. Weiterhin ist der hohe manuelle Aufwand, um die Parameter der Unsicherheit für jeden Auftrag individuell zu bestimmen, kritisch anzumerken. Trotzdem sind Teile des Verfahrens vielversprechend und sollen in dieser Arbeit weiterverfolgt werden.

### **Schätzverfahren**

Aufgrund der Projektmerkmale Neuartigkeit, Einmaligkeit und Komplexität sind Unsicherheiten fester Bestandteil bei der Planung von Projekten. Viele Informationen sind nicht zugänglich, verdeckt oder nur über Umwege zu erreichen. Mit einem gewissen Aufwand können diese Informationen häufig verfügbar gemacht werden. Schätzverfahren ermöglichen es, trotz unvollständiger bzw. fehlerhafter Informationen Aussagen über das Projekt und für die Planung zu treffen. Für jedes Projekt sind mindestens einige Informationen verfügbar. Meist sind Erfahrungen aus ähnlichen Projekten vorhanden, die entweder eine fachlich ähnliche Aufgabenstellung oder vergleichbare Teilprojekte haben. Die Herausforderung beim Schätzen besteht darin, diese Erfahrungen nutzbar zu machen. Eine Schätzaufgabe umfasst zwei Aspekte: Verfügbare Informationen zu finden und diese Informationen in eine richtige Aussage zu überführen. Ergebnisse von Schätzverfahren sind immer mit Unsicherheit behaftet [Jako13].

Es gibt verschiedene Arten von Schätzmethoden, die sich im Aufwand und der Genauigkeit der Schätzung unterscheiden (Tabelle 1). Schnelle, aufwandsarme Schätzungen sind meist unsicher. Sie können allerdings durch einen Mehraufwand verbessert werden. Vor allem die Aufwandsschätzung ist herausfordernd. Ursächlich hierfür sind zum einen die oben genannten Projektmerkmale und zum anderen der Mensch als Fehlerquelle. Hier kommen zwei gegensätzliche Effekte zum Tragen. Einerseits wird der Aufwand häufig zu gering eingeschätzt. Treiber hierfür sind die geringe Erfahrung eines Mitarbeiters oder die Neuartigkeit der Aufgabe. Andererseits wird der Aufwand zum Teil auch überschätzt, um das Projekt innerhalb des vereinbarten Leistungsrahmens erfüllen zu können [Jako13].

Tabelle 1: Übersicht Schätzverfahren nach [Jako13]

Schätzverfahren	Beschreibung
Intuitiv	Minimaler Aufwand, sehr große Unsicherheit
Vergleichend	Einfach, unsicher
Kennzahlen	Steigender Aufwand, steigende Sicherheit
Zerlegen	Bei gleicher Einzel-Unsicherheit steigt die Gesamt-Sicherheit
Skalieren	Auf vorstellbare Größen und Dimensionen umrechnen
Kombinieren	Unterschiedliche Verfahren kombinieren
Gruppe	Die Gruppe schätzt besser als der Einzelne

Bei der vergleichenden Schätzung wird die Auftragszeit eines Auftrags durch den Vergleich mit ähnlichen bereits realisierten Aufträgen bestimmt. Der Anwender nutzt also sein Erfahrungswissen. Die analytische Schätzung unterteilt einen Auftrag in kleinere Teilaufträge, schätzt deren Auftragszeiten und berechnet zum Schluss die Gesamtauftragszeit. Im Projektmanagement ist die Dreipunktschätzung ein etabliertes Schätzverfahren, um Aufwände und Dauern zu bestimmen. Häufig ist es nicht möglich, eine Schätzgröße mittels einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion exakt zu beschreiben. Bereits das Schätzen eines einzelnen Wertes ist herausfordernd [Jako13]. Dem Verfahren liegt die Annahme zu Grunde, dass der Schätzwert die Form einer Betaverteilung hat. Beobachtungen aus der Praxis haben diese Annahme für den Zeitaufwand von Arbeitspaketen in Projekten bestätigt. Die Betaverteilung ist wie der zeitliche Aufwand nach oben und unten begrenzt und die Zeitwerte sind meist im unteren Bereich wahrscheinlicher. Der Schätzwert wird über die drei Größen Minimum, Maximum und Modus beschrieben.

$$E = \frac{Min + 4 \times mod + Max}{6} \quad (8)$$

$$S = \frac{Max - Min}{6} \quad (9)$$

<i>E</i>	<i>Erwartungswert [Std]</i>
<i>Max</i>	<i>Maximum des Wertebereichs [Std]</i>
<i>Min</i>	<i>Minimum des Wertebereichs [Std]</i>
<i>Mod</i>	<i>Modus des Schätzwerts [Std]</i>
<i>S</i>	<i>Standardabweichung [Std]</i>

Schuh zählt in Anlehnung an Gronau [Gron01] weitere Schätzverfahren für die Ermittlung von Kosten auf: Analogiemethode, Relationsmethode, Multiplikationsmethode, Gewichtungsmethode, Methode parametrischer Schätzgleichungen, Prozentsatzmethode [Schu12].

Schätzverfahren sind fester Bestandteil der Planung in der Unikatproduktion. Sie erzeugen auf Basis unvollständiger Informationen Eingangsdaten für andere Planungsschritte und ermöglichen auf diesem Weg überhaupt erst eine Planung. Die Ergebnisse sind stets mit Unsicherheit behaftet. Diese ist je nach gewähltem Schätzverfahren unterschiedlich stark ausgeprägt.

### **Monte-Carlo-Simulation**

Bei der Monte-Carlo-Simulation wird eine große Anzahl an Simulationsläufen durchgeführt, um für analytisch nicht lösbare oder nur sehr aufwendig lösbare Problemstellungen mit zufälligen Einflussgrößen numerisch eine Lösung zu berechnen. Die Monte-Carlo-Simulation eignet sich unter anderem dazu, Einzelrisiken zu Gesamtrisiken zu aggregieren, komplexe Prozesse zu modellieren, die Auswirkungen zufälliger Prozesse vorherzusagen oder um Verteilungsparameter abzuschätzen. Über ein Wirkmodell werden die unsicheren Eingangsgrößen (Zufallsvariablen) mit den zu bestimmenden unsicheren Zielgrößen verknüpft. Die unsicheren Eingangsgrößen werden häufig mit Hilfe von geeigneten Verteilungsfunktionen modelliert. Meist werden die Parameter der Verteilungen von Experten geschätzt. In jedem Simulationslauf werden Ausprägungen der unsicheren Eingangsgrößen erzeugt und im Anschluss die Zielgrößen berechnet. Durch die häufige Wiederholung der Simulationsläufe können die Verteilungsfunktionen der Zielgrößen ermittelt werden. Aufgrund der einfachen Anwendbarkeit und der Möglichkeit, beliebige Verteilungen abzubilden, hat sich die Monte-Carlo-Simulation in zahlreichen Anwendungsgebieten etabliert, wie beispielsweise dem Risikomanagement und der Produktionsplanung und -steuerung [Rome18].



### 3 Forschungsdefizit

Die Analyse des Stands der Technik offenbart vier zentrale Defizite in der Planung der Unikatproduktion, die einer hohen logistischen Zielerreichung im Wege stehen. Unterkapitel 3.1 beschreibt detailliert diese Defizite und deren Bedeutung innerhalb der Planung. Aus den Defiziten leitet sich der Forschungsbedarf dieser Arbeit für ein Verfahren zur Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion ab. Der Forschungsbedarf umfasst drei Kernelemente und ist in Unterkapitel 3.2 formuliert. Hier werden einerseits die zu entwickelnden Kernelemente benannt und andererseits wird erläutert, wie diese gemeinsam die Defizite überwinden und auf diesem Wege eine hohe logistische Zielerreichung ermöglichen. Im Anschluss grenzt Unterkapitel 3.3 das Untersuchungsgebiet ein.

#### 3.1 Defizite

Wie die Literaturrecherche zeigt, beeinflusst die unzureichende Integration von unsicheren Auftragszeiten in die Planung der Unikatproduktion die Auftragsabwicklung. Ursächlich sind vier miteinander verknüpfte Defizite, die nachfolgend eingeordnet werden und in Tabelle 2 aufgelistet sind:

Tabelle 2: Defizite in der Produktionsplanung der Unikatproduktion

Nr.	Defizit
D1	Intransparenz über unsichere Auftragszeiten im Planungsprozess
D2	Mangel an Wissen über unsichere Auftragszeiten
D3	Fehlende Bewertung von unsicheren Auftragszeiten
D4	Ineffiziente Maßnahmen gegen unsichere Auftragszeiten

##### **D1 Intransparenz über unsichere Auftragszeiten im Planungsprozess**

Es ist allgemein bekannt, dass die Auftragszeiten in der Planung der Unikatproduktion mit Unsicherheit behaftet sind; dennoch sind nur unzureichende Informationen über die unsicheren Auftragszeiten vorhanden (vgl. [Jako13]). Es gibt kaum Angaben und Dokumentationen dazu, welche Arbeitssysteme besonders betroffen sind, welche Aufträge und Arbeitsvorgänge unsichere Auftragszeiten haben oder wie stark die Ausprägung der Unsicherheit ist. Es existiert kein etabliertes Verfahren, um Unsicherheiten speziell in der Unikatproduktion systematisch zu erfassen. Ohne Kenntnis über das Auftreten und die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten in Aufträgen und an Arbeitssystemen können diese nicht zielgerichtet in den Planungsprozess integriert werden. Erschwerend kommt hinzu, dass in der Unikatproduktion Rückmeldedaten häufig nur in eingeschränkter Qualität verfügbar sind. Insbesondere die korrekte Zuordnung von realen Kapazitätsbedarfen zu Aufträgen und Arbeitsvorgängen erfolgt meist nicht oder nur in unzureichender Qualität. Besondere Bedeutung erfährt der Umstand der Einmaligkeit, sodass der Einsatz von Rückmeldedaten in der Literatur von zahlreichen Autoren kritisch gewertet wird. Ohne eine quantifizierte unsichere Auftragszeit fehlt jedoch eine belastbare Entscheidungsgrundlage.

##### **D2 Mangel an Wissen über unsichere Auftragszeiten**

Wissenschaftliche Untersuchungen haben gestiegene Kapazitätsbedarfe, erhöhte Durchlaufzeiten und Terminabweichungen als Folge von unsicheren Auftragszeiten identifiziert. Der direkte Zusammenhang zwischen unsicheren Auftragszeiten und längeren Durchführungszeiten bzw. Terminabweichungen ist bekannt, aber die indirekten Auswirkungen von

unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen sind nicht vollständig untersucht. Koppold hat einen ersten Ansatz entwickelt, um unsichere Auftragszeiten in der Kapazitätsplanung und -steuerung zu berücksichtigen [Kopp17]. Die Auswirkungen auf die Terminplanung sind jedoch nicht Gegenstand seiner Untersuchung (siehe Unterkapitel 2.5). Es existiert weder ein Wirkmodell, das den Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen unsicheren Auftragszeiten und den logistischen Zielgrößen qualitativ bzw. quantitativ anschaulich darstellt, noch wird die Vererbung von Unsicherheiten im Auftragsabwicklungsprozess explizit erläutert. Vor dem Hintergrund der engen Verknüpfung und der wechselseitigen Restriktionen der verschiedenen Aufgaben der Auftragsabwicklung ist dies kritisch zu hinterfragen.

#### **D3 Fehlende Bewertung von unsicheren Auftragszeiten**

Aufgrund der fehlenden Kenntnis über spezifische Ausprägungen der unsicheren Auftragszeiten ist es nicht möglich, diese Unsicherheiten zu bewerten (vgl. hierzu D1 und D2). Auch für den Fall, dass diese Daten verfügbar wären, stellt sich die Frage, wie die jeweiligen Ausprägungen der Unsicherheit zu bewerten sind. Allein das Wissen über die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten erlaubt noch keine aussagekräftige Bewertung über den Handlungsbedarf. Das Risikomanagement bewertet die Auswirkungen von Unsicherheiten entweder auf monetärer Basis oder anhand von anderen Kennzahlen wie beispielsweise den logistischen Zielgrößen. Es existieren unterschiedliche Verfahren, um Unsicherheiten in der Planung zu berücksichtigen. Vielfach kommen simulationsbasierte Ansätze zum Einsatz, die erzeugte Varianten von Produktionsplänen bzw. verschiedene Konfigurationen von Arbeitssystemen anhand von Schwellwerten für ein oder mehrere definierte Zielkriterien bewerten. Jedoch ist der Aufwand für diese Vorgehen in der Regel hoch. Dagegen ist der Einsatz von Produktionskennlinien vergleichsweise einfach. Wie im Stand der Technik beschrieben, eignen sich Produktionskennlinien (siehe Abschnitt 2.3.2) für die logistische Positionierung bzw. die Bewertung von Arbeitssystemen und zur Festlegung von Parametern für die Produktionsplanung. Die Modellierung der Produktionskennlinien setzt eine zuverlässige Angabe der Auftragszeitstruktur voraus. Diese notwendige Bedingung ist in der Unikatproduktion aufgrund der unsicheren Auftragszeiten nicht erfüllt, sodass Produktionskennlinien gegenwärtig nicht zur Bewertung der logistischen Zielerreichung in der Unikatproduktion eingesetzt werden können.

#### **D4 Ineffiziente Maßnahmen gegen unsichere Auftragszeiten**

Es existieren verschiedene Maßnahmen, um unsicheren Auftragszeiten bereits in der Planung oder im Nachgang in der Fertigungssteuerung zu begegnen. In der Unikatproduktion hat sich hierfür der Einsatz von impliziten Zeit- und Kapazitätspuffern in Gestalt von Sicherheitsfaktoren etabliert. Die impliziten Puffer werden nicht explizit ausgewiesen und suggerieren dem Planer eine trügerische Pseudogenauigkeit. Außerdem sind die Zeit- und Kapazitätspuffer häufig überdimensioniert (vgl. Abschnitt 2.2.3). Fehlplanungen in der Terminierung und die Fehlallokationen von Ressourcen sind die Folge. Weiterhin nutzt die Fertigungssteuerung intensiv Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität. Diese Maßnahmen verursachen zusätzliche Kosten und stellen besondere Anforderungen an die Organisation. Die Defizite von impliziten Zeit- und Kapazitätspuffern wurden im Stand der Technik ausführlich erläutert. Maßnahmen gegen die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten können ohne Bewertung der Unsicherheit (siehe D3), die ihrerseits Kenntnis über die Ausprägung

der unsicheren Auftragszeiten voraussetzt (siehe D1), nicht individuell und zielgerichtet ergriffen werden. In Ermangelung einer Übersicht über die möglichen Maßnahmen und eines Werkzeugs zur Beurteilung einzelner unsicherer Auftragszeiten, werden die Maßnahmen nur bedingt zielgerichtet eingesetzt. Die etablierten Maßnahmen Zeit- und Kapazitätspuffer sowie Kapazitätsflexibilität begegnen ausschließlich den Auswirkungen von Unsicherheit. Der Ansatz, die Ausprägung der Unsicherheit zu reduzieren, wird dabei häufig außer Acht gelassen, da die Ursachen der unsicheren Auftragszeiten unzureichend analysiert werden.

#### **3.2 Forschungsbedarf**

Um die logistische Zielerreichung auch in der Unikatproduktion zuverlässig zu gewährleisten, sind unsichere Auftragszeiten in die Planung der Unikatproduktion zu integrieren. Die bereits vorgestellten Defizite zeigen, dass dazu die bestehenden Verfahren und Methoden der Produktionsplanung zu erweitern und zu ergänzen sind. Aus dem Stand der Technik und den dort identifizierten Defiziten leitet sich der weitere Forschungsbedarf ab. Der Forschungsbedarf formuliert sich wie folgt:

##### **F1 Die Planung kann unsichere Auftragszeiten quantifizieren**

Es besteht die Notwendigkeit, unsichere Auftragszeiten und ihre Ursachen systematisch zu erfassen und diese transparent darzustellen, um diese in der Planung berücksichtigen zu können. Dieser Forschungsbedarf leitet sich aus dem Defizit D1 ab. Das erste Defizit beschreibt, dass unsichere Auftragszeiten nicht erfasst und nicht transparent dargestellt werden. Je nach Anwendungsszenario stehen Rückmelde- oder Referenzdaten zur Verfügung oder auch nicht. Für beide Situationen ist es unerlässlich, Verfahren zu benennen bzw. zu entwickeln, die die Ausprägung der Unsicherheit sowohl für einen einzelnen Auftrag als auch für ein Arbeitssystem quantifizieren können. Der Forschungsbedarf besteht an dieser Stelle in einem Verfahren, das anhand von Rückmeldedaten die Ausprägungen der unsicheren Auftragszeiten bei Aufträgen und Arbeitssystemen erfassen kann. Im Hinblick auf die spätere Bewertung von unsicheren Auftragszeiten sind diese zu klassifizieren. Die Klassifizierung soll den Anwender unterstützen, systematisch für bestimmte Klassen Maßnahmen aus dem zu entwickelnden Maßnahmenkatalog auswählen zu können. Zudem ist die Kenntnis über die Ausprägung der Unsicherheit Voraussetzung, um einen geeigneten Modellierungsansatz für die Unsicherheit auszuwählen und die Unsicherheit realitätsnah abzubilden.

##### **F2 Die Planung berücksichtigt unsichere Auftragszeiten**

Wenn nun die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten ermittelt werden kann (siehe F1), gilt es, diese während der Planung zu berücksichtigen. Ziel ist es, den Anwender zu befähigen mögliche Auswirkungen von Unsicherheit auf die logistischen Zielgrößen zu antizipieren und zu bewerten. Erst die Bewertung schafft die Grundlage, um zielgerichtet und bedarfsorientiert Maßnahmen zur Handhabung der Unsicherheit zu ergreifen. Die Idee ist, dazu die Kennlinientheorie so weiterzuentwickeln, dass diese auch für Arbeitssysteme mit unsicheren Auftragszeiten zuverlässige Ergebnisse liefert. Wie bereits eingangs erläutert, muss die Unsicherheit der Auftragszeiten in die Auftragszeitstruktur einfließen. Als Bestandteil dieser Arbeit soll daher ein Vorgehen entwickelt werden, das unterschiedliche Ausprägungen der Unsicherheit in der Auftragszeitstruktur berücksichtigen kann. Weiterhin soll die bestehende Modellierung von logistischen Zielgrößen so erweitert werden, dass auch für einen einzelnen Auftrag die Auswirkungen bestimmbar sind. Die Bewertung ihrer-

seits schafft die Grundlage, um zielgerichtet und bedarfsorientiert Maßnahmen zu Handhabung der Unsicherheit zu ergreifen. Die Anwender sind für die Wechselwirkungen und Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten aus den beiden Blickwinkeln Arbeitssystem und Auftrag zu sensibilisieren, daher ist ein Wirkmodell zu entwickeln, das die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern der Planung veranschaulicht. Hierdurch wird den Anwendern die Komplexität der Situation vermittelt und es wird deutlich, dass unsichere Auftragszeiten, obwohl sie zunächst wie ein Problem der Kapazitätsplanung erscheinen, auch andere Aufgaben der Planung, wie z.B. die Terminplanung, beeinflussen.

#### **F3 Handlungsempfehlungen und Maßnahmenkatalog zur Integration von unsicheren Auftragszeiten in die Planung der Unikatproduktion**

Der dritte Forschungsbedarf besteht darin, dem Anwender ein Portfolio an Maßnahmen gegen unsichere Auftragszeiten bzw. deren Auswirkungen aufzuzeigen. Einerseits sind die Planungsparameter anzupassen und andererseits sind mögliche Maßnahmen in nachgelagerten Aufgaben zu benennen. Nachdem nun bereits zwei von drei Bedingungen für eine erfolgreiche Integration von unsicheren Auftragszeiten in die Planung der Unikatproduktion bestimmt sind, gilt es noch das vierte Defizit „ineffiziente Auswahl von Maßnahmen“ zu überwinden. Um optimal auf unsichere Auftragszeiten reagieren zu können, sind Kriterien zu definieren, wann welche Maßnahmen in welchem Umfang zu ergreifen sind. Ziel ist es, einen allgemeingültigen Maßnahmenkatalog zu definieren. Für jede Maßnahme werden der Wirkmechanismus, mögliche Auswirkungen und Restriktionen definiert.

Kernelemente der in dieser Arbeit zu entwickelnden Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion sind damit ein Wirkmodell, ein Bewertungsmodell und ein Prozessmodell.

#### **3.3 Abgrenzung des Untersuchungsgebiets**

Diverse Unsicherheiten wie beispielsweise Abweichungen von Auftragszeiten, Lieferterminen oder Leistungsschwankungen prägen den Auftragsabwicklungsprozess der Unikatproduktion und beeinflussen auch die Produktionsplanung und -steuerung. Insbesondere unsichere Auftragszeiten wirken sich auf sämtliche Aufgaben der PPS aus und nehmen deshalb eine herausgehobene Stellung ein (siehe Unterkapitel 2.2). Die Integration von unsicheren Auftragszeiten in die Planung der Unikatproduktion ist das Ziel dieser Arbeit. Andere Unsicherheiten bzgl. Nachfrage, Zugangsterminen und der Leistung der Arbeitssysteme sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Das zu entwickelnde Verfahren adressiert die Aufgaben der Produktionsbedarfsplanung und betrachtet insbesondere die Termin- und Kapazitätsplanung (vgl. Unterkapitel 2.5). Die Modellierung soll den Anwender dabei unterstützen, den bestehenden Planungsprozess kritisch zu hinterfragen, Schwachstellen auch in den vorgelegten Aufgaben der Auftragsabwicklung wie der Arbeitsplanung sowie innerhalb der Konfiguration von Produktionssystemen zu identifizieren, zuverlässige Parameter für die Planung zu bestimmen und Maßnahmen zur Handhabung von Unsicherheiten auszuwählen. Die Erzeugung von Maschinenbelegungsplänen oder Reihenfolgen sind dagegen nicht Bestandteil dieser Arbeit. Auch die Verfahren zur Verringerung von unsicheren Auftragszeiten sind nicht Bestandteil dieser Arbeit, da diese in den Aufgabenbereich der Arbeitsplanung fallen. Die zu entwickelnde Methodik soll innerhalb der Unikatproduktion unabhängig von der jeweiligen Ausprägung der Unsicherheit und unabhängig von der Branche einsetzbar sein. Im Vordergrund der Arbeit steht die Analyse der Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen.

## 4 Modellierung unsicherer Auftragszeiten für die Produktionsplanung

Für eine optimale Produktionsplanung sind realistische Plan-Parameter der logistischen Zielgrößen erforderlich. Ziel der Arbeit ist es, eine Modellierung der unsicheren Auftragszeiten in der Planung der Unikatproduktion zu entwickeln, um trotz unsicherer Auftragszeiten zuverlässig Plan-Parameter bestimmen zu können.

Dieses Kapitel beschreibt die Modellierung und ist in vier Unterkapitel untergliedert. Zunächst werden die erfassten Anforderungen an die Modellierung von unsicheren Auftragszeiten präsentiert (Unterkapitel 4.1). Dann werden der gewählte Modellierungsansatz und die Merkmale von unsicheren Auftragszeiten beschrieben (Unterkapitel 4.2). Der Modellierungsansatz für die unsicheren Auftragszeiten wird in die etablierte Modellierung der logistischen Zielgrößen integriert (Unterkapitel 4.3). Hierzu werden die Wechselwirkungen zwischen unsicheren Auftragszeiten und den logistischen Zielgrößen erläutert. Das Kapitel endet mit einem Zwischenfazit (Unterkapitel 4.4).

### 4.1 Anforderungen

Aus den Defiziten und dem Forschungsbedarf (Kapitel 3) lassen sich drei Anforderungen an die Modellierung von unsicheren Auftragszeiten ableiten. Dies sind Transparenz, Zielorientierung und Praxistauglichkeit. Die Anforderungen werden nachfolgend einzeln beschrieben und sind in Tabelle 3 zusammengefasst:

Tabelle 3: Anforderungen an die Modellierung unsicherer Auftragszeiten

Nr.	Anforderung
A1	Transparenz
A2	Zielorientierung
A3	Praxistauglichkeit

#### A1 Transparenz

Um unsicheren Auftragszeiten angemessen begegnen zu können, muss der Anwender sowohl die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten sowie deren Ursachen kennen als auch das Wirkgefüge zwischen unsicheren Auftragszeiten und den logistischen Zielgrößen nachvollziehen und abbilden können. Insbesondere vor dem Hintergrund der möglichen Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf den komplexen und vernetzten Auftragsabwicklungsprozess gilt es, unsichere Auftragszeiten in der Planung der Unikatproduktion zu identifizieren, zu quantifizieren und zu bewerten. Darum ist Transparenz eine wesentliche Eigenschaft des Verfahrens.

#### A2 Zielorientierung

Unsichere Auftragszeiten sind fester Bestandteil in der Produktionsplanung der Unikatproduktion. Sie beeinträchtigen die Auftragsabwicklung und gefährden die logistische Zielerreichung. Aufgrund der limitierten Ressourcen sind Gegenmaßnahmen gezielt auszuwählen. Deshalb ist es unerlässlich, Maßnahmen zur Handhabung von unsichere Auftragszeiten bereits in der Planung der Unikatproduktion aufzuzeigen und dem Anwender zur Verfügung zu stellen. Im Detail bedeutet dies, dass mögliche Maßnahmen aufgezeigt, deren Wirkprinzip erläutert und die Voraussetzungen für deren Einsatz benannt werden. Bei der Auswahl der Maßnahmen ist der zu erwartende Nutzen mit dem Aufwand für die Anwendung

der Maßnahme zu vergleichen. Das zu entwickelnde Verfahren soll den Anwender bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen unterstützen.

### **A3 Praxistauglichkeit**

Neben den inhaltlichen Anforderungen muss die zu entwickelnde Methode praxistauglich sein. Unter dem Begriff der Praxistauglichkeit werden die Bedienbarkeit, die Integrierbarkeit und ein geringer Aufwand zusammengefasst. Sie fördert so eine aktive Nutzung und eine hohe Akzeptanz der Methode. Eine intuitive und verständliche Bedienbarkeit der Methode verringert Widerstände der Anwender und beschleunigt die Prozessveränderung. Die Modellierung muss dem Anwender einen Mehrwert bieten, der den Mehraufwand kurz- bis mittelfristig deutlich übersteigt, beispielsweise weniger Iterationen im Planungsablauf oder eine höhere Planungsqualität. Die Anforderung nach einem geringen Aufwand bedingt, dass sich die Modellierung in den bestehenden Planungsablauf integrieren lässt und möglichst auf bereits vorhandene Informationen zurückgreift.

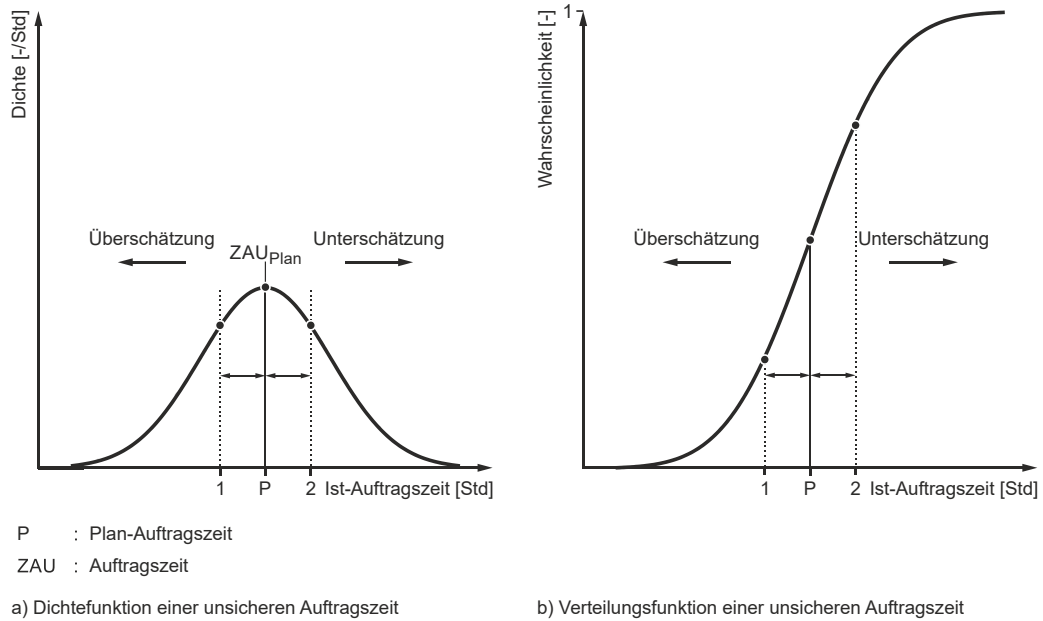
## **4.2 Modellierung von unsicheren Auftragszeiten**

Um unsichere Auftragszeiten systematisch in die bestehenden Ansätze zu integrieren, ist es zunächst erforderlich, diese zu charakterisieren. Dafür schafft dieses Unterkapitel die Grundlage, indem es die Modellierung und die Merkmale unsicherer Auftragszeit beschreibt.

### **4.2.1 Modellierung der unsicheren Auftragszeiten mittels Verteilungsfunktion**

Grundidee ist es, die Unsicherheit von Auftragszeiten mit Hilfe von Verteilungsfunktionen zu modellieren. Die Unsicherheit kann dabei als absolute oder als relative Größe erfasst und sowohl für einen einzelnen Auftrag als auch für eine Gruppe von Aufträgen beschrieben werden.

*Unsichere Auftragszeiten:* Aufgrund unvollständiger Informationen sind Auftragszeiten in der Unikatproduktion meist Schätz- und Erfahrungswerte, da sie nicht eindeutig und zuverlässig festgelegt werden können. Die tatsächlich für die Bearbeitung eines Auftrags notwendige Auftragszeit weicht von der in der Arbeitsvorbereitung ermittelten Vorgabezeit (Plan-Auftragszeit) zum Teil signifikant ab. Die tatsächliche Auftragszeit – im Folgenden Ist-Auftragszeit genannt – kann Werte innerhalb eines zu definierenden Bereichs annehmen. Auftragszeiten können keine negativen Werte annehmen. Die Auftragszeiten werden als Zufallsvariablen betrachtet. Durch Verteilungsfunktionen ist es möglich, diese Unsicherheit in den Auftragszeiten abzubilden (siehe Abbildung 8).



14080

Abbildung 8: Beispielhafte Dichte- und Verteilungsfunktion einer unsicheren Auftragszeit

*Unsicherheit U*: Die Unsicherheit bezeichnet die Differenz zwischen der Ist- und der Plan-Auftragszeit und berechnet sich gemäß Formel 10. Als Unterschätzung (Punkt 2 in Abbildung 8) bzw. Überschätzung (Punkt 1 in Abbildung 8) wird eine positive bzw. negative Abweichung der Ist-Auftragszeit von der Plan-Auftragszeit (Punkt P in Abbildung 8) bezeichnet [Haux17]. Außerdem geht mit der Über- bzw. Unterschätzung der Auftragszeit ein erhöhter bzw. verminderter Kapazitätsbedarf für die Fertigstellung des Auftrags einher.

$$U = ZAU_{Ist} - ZAU_{Plan} \quad (10)$$

$U$                       *Unsicherheit [Std]*  
 $ZAU_{Ist}$               *Ist-Auftragszeit [Std]*  
 $ZAU_{Plan}$              *Plan-Auftragszeit [Std]*

*Relative Unsicherheit  $U_r$* : Die Unsicherheit einer Auftragszeit kann auch als relative Größe angegeben werden. Die relative Unsicherheit errechnet sich aus dem Verhältnis aus Unsicherheit und Plan-Auftragszeit (siehe Formel 11).

$$U_r = \frac{ZAU_{Ist} - ZAU_{Plan}}{ZAU_{Plan}} \quad (11)$$

$U_r$                       *relative Unsicherheit [%]*  
 $ZAU_{Ist}$               *Ist-Auftragszeit [Std]*  
 $ZAU_{Plan}$              *Plan-Auftragszeit [Std]*

Sowohl die absolute als auch die relative Unsicherheit werden als Verteilungsfunktion modelliert (siehe Formel 12 und 13).

$$F_U(x) = \int_{-ZAU_{Plan}}^x f_U(x) dx \quad (12)$$

$F_U$                       *Verteilungsfunktion der Unsicherheit [%]*

$f_U$  Dichtefunktion der Unsicherheit [%/Std]

$$F_{U_r}(x) = \int_{-100}^x f_{u_r}(x) dx \quad (13)$$

$F_{U_r}$  Verteilungsfunktion der relativen Unsicherheit [%]

$f_{U_r}$  Dichtefunktion der relativen Unsicherheit [-]

Der Verteilungstyp, die Lageparameter (Erwartungswert, Modus, Median) und die Streuparameter (Standardabweichung und Schiefe) spezifizieren die Verteilungsfunktion der Unsicherheit (siehe Tabelle 4). Bei der Wahl der Verteilungsfunktion ist der Definitionsbereich für die unterschiedlichen Unsicherheiten zu beachten. Da Auftragszeiten nur positive Werte annehmen können, verfügt die relative Unsicherheit über eine untere Schranke von minus einhundert Prozent, während sie nach oben unbeschränkt ist. Für die Verteilungsfunktion der Unsicherheit eines Auftrags existiert ebenfalls eine untere Schranke. Dies ist der negative Wert der Plan-Auftragszeit (vgl. Formel 10). Sind keine Informationen zum Verteilungstyp verfügbar, können Anwender eine modifizierte Standardnormalverteilung wählen. Für unsymmetrische Verteilungen, wie beispielsweise bei der Modellierung von Aufwänden, empfehlen sich eine Beta-, Dreiecks- oder Lognormalverteilung. Laut Munier hat die Praxis gezeigt, dass die Wahl der Verteilungsfunktion zur Modellierung von Kosten den Wertebereich der Gesamtkosten nur unwesentlich verändert [Muni14].

Tabelle 4: Parameter der Verteilungsfunktionen der Unsicherheit

Merkmal	Ausprägung	
	U	U <sub>r</sub>
Verteilungsfunktion	-	-
Erwartungswert	Std	%
Standardabweichung	Std	%
Schiefe	-	-
Modus	Std	%
Median	Std	%

#### 4.2.2 Merkmale unsicherer Auftragszeiten

Es lassen sich vier verschiedene Merkmale differenzieren, um unsichere Auftragszeiten detailliert zu beschreiben. Die Merkmale lauten Ursache, Auftrittsort, Auftragszeitabhängigkeit und Ausprägung. Aus der spezifischen Ausprägung der Merkmale eines Anwendungsfalls lassen sich Rückschlüsse auf die Schwachstellen im Planungsprozess und angrenzenden Bereichen ziehen. Unter anderem kann der Anwender daraus mögliche Ansatzpunkte zur Verbesserung der Planungsprozesse ableiten und auf diesem Wege die Unsicherheit reduzieren. Außerdem ist die Kenntnis über die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten Voraussetzung, um diese bei der Modellierung der logistischen Zielgrößen zu berücksichtigen.

##### Ursache

Die Quelle der unsicheren Auftragszeit und die Art des Informationsdefizits sind ausschlaggebend, um die Ausprägung der Unsicherheit zu bestimmen und den Umgang mit den unsi-

chere Auftragszeiten festzulegen. Unsichere Auftragszeiten resultieren aus Informationsdefiziten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Planungsprozess auftreten und von unterschiedlichen Akteuren innerhalb und außerhalb des Unternehmens initiiert werden (vgl. Abschnitt 2.1.2 bzw. [Gebh09], [Rimp10, Schu12]). Drei Quellen für unsichere Auftragszeiten wurden identifiziert: Planung, Produktion, Kunde (vgl. Abbildung 9).

Interne Ursachen		Externe Ursachen
Planung	Produktion	Kundenänderungswünsche

14081

Abbildung 9: Ursachen unsicherer Auftragszeiten

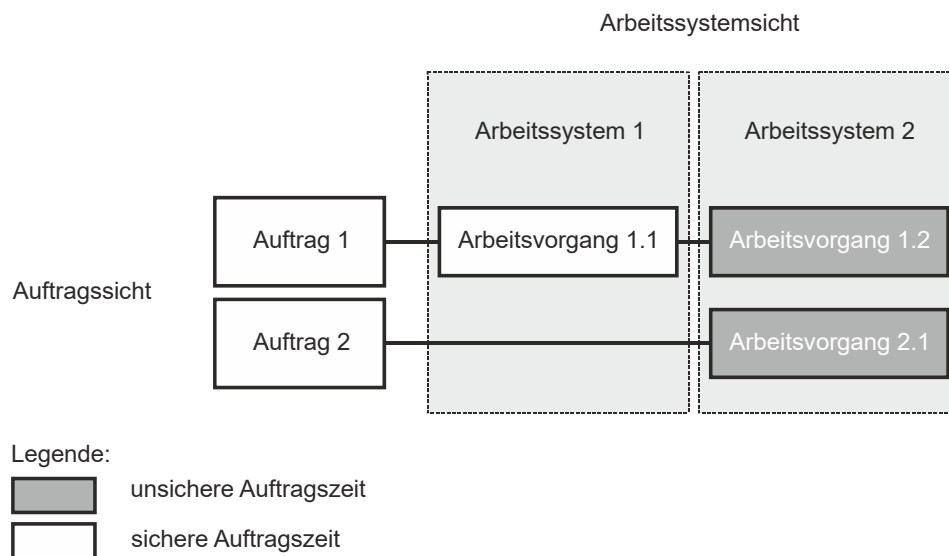
- *Interne Ursachen – Planung:* Aufgrund der simultanen Planung in der Unikatproduktion sind die technischen Zeichnungen zum Zeitpunkt der Arbeitsvorbereitung nicht vollständig (vgl. Abschnitt 2.2.1). Eine weitere Ursache für unsichere Auftragszeiten bilden fehlerhafte Informationen. Liegen keine vollständigen Informationen (Geometrie, Gewicht, Komplexität) für den zu produzierenden Auftrag vor, werden Schätz- und Erfahrungswerte (häufig in Form von Mittelwerten) eingesetzt [Schu12].
- *Interne Ursachen – Produktion:* Während der Produktion können eine ineffiziente Prozessausführung oder Nacharbeit Mehraufwand erzeugen, sodass die Ist-Auftragszeiten der Aufträge steigen. Mangelhafte Informationen in den Arbeitsanweisungen, unachtsame Mitarbeiter, fehlerhafte Bauteile oder falsche Prozessparameter sind typische Gründe für Qualitätseinbußen und damit für Nacharbeit. Diese Ursache der Unsicherheit resultiert nicht aus dem Mangel an Information über das Produkt oder den Prozess, sondern es mangelt an Erfahrung bei der Ausführung des Herstellungsprozesses. Sie steht nicht im Fokus der Analyse, dennoch sollten Erkenntnisse über den Einfluss von fehlender Erfahrung in der Produktion und eine abnehmende Fehlerrate über die Zeit in der Planung berücksichtigt werden.
- *Externe Ursachen:* Kundenänderungswünsche sind ein wesentliches Merkmal der Unikatproduktion und treten während der gesamten Auftragsabwicklung auf. Die Änderungen der Produktspezifikation beeinflussen die Konstruktion und damit einhergehend die Auftragszeit. Die Produktionsprozesse sind davon unmittelbar und in größerem Umfang betroffen [Schu12]. Im Extremfall sind bereits ausgeführte Arbeitsvorgänge rückabzuwickeln und erneut auszuführen (Demontage und Montage einer Baugruppe). Je später sie innerhalb der Auftragsabwicklung auftreten, desto umfangreicher fällt in der Regel der Mehraufwand aus. Zwar kommt der Kunde für einen definierten Mehraufwand auf, jedoch sind die zusätzlichen Arbeiten häufig trotzdem innerhalb der bei Auftragsunterzeichnung vereinbarten Liefertermine auszuführen.

### Auftrittsort

Die Produktion kann aus den zwei unterschiedlichen Blickwinkeln Auftragssicht und Arbeitssystemansicht betrachtet werden. In beiden Perspektiven kann es zu einer Häufung von

unsicheren Auftragszeiten kommen. Zeigt eine Analyse, dass unsichere Auftragszeiten nur an einem einzelnen Arbeitssystem auftreten, dann liegt die Vermutung nahe, dass die Planungsaufgabe für dieses spezielle Arbeitssystem entweder die Informationsdefizite erzeugt oder diese als Eingangsdaten erhält.

Ein Auftrag setzt sich in der Regel aus mehreren Arbeitsvorgängen zusammen, die an unterschiedlichen Arbeitssystemen bearbeitet werden. Die Informationsdefizite betreffen meist bestimmte Produktkomponenten eines Auftrags und die damit verbundenen Arbeitsvorgänge (Auftrag 1 in Abbildung 10) oder auch einzelne Produktionsprozesse an einem definierten Arbeitssystem (Arbeitssystem 2 in Abbildung 10).



14082

Abbildung 10: Auftrags- und Arbeitssystemansicht auf unsichere Auftragszeiten

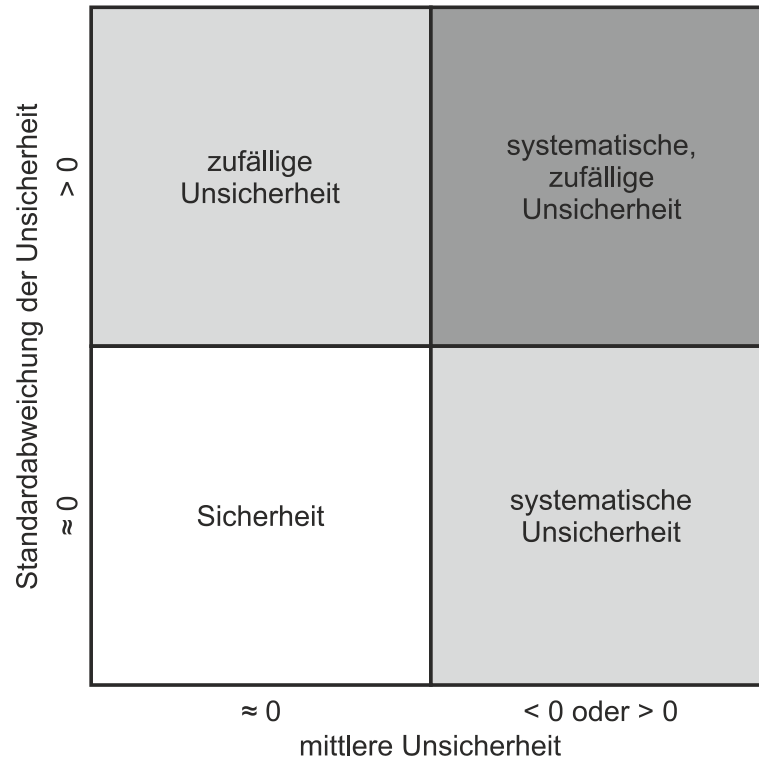
#### **Auftragszeitabhängigkeit**

Für die Dimensionierung und Entscheidung über den Einsatz von Maßnahmen gegen unsichere Auftragszeiten ist es relevant zu wissen, wie die Unsicherheit auf eine Änderung der Auftragszeit reagiert. Es lassen sich zwei verschiedene Klassen von Unsicherheit hinsichtlich der Unabhängigkeit von der Plan-Auftragszeit definieren:

- *Auftragszeitunabhängige Unsicherheit:* Die Abweichung zwischen Ist- und Plan-Auftragszeit ist für Aufträge dieser Klasse unabhängig von der Größe der Plan-Auftragszeit. Beispielsweise beträgt der Erwartungswert der Unsicherheit 10 Std und die Streuung der Unsicherheit 5 Std. Eine auftragszeitunabhängige Unsicherheit tritt auf, wenn in der Unikatproduktion ein bestimmter Arbeitsvorgang über- bzw. unterdimensioniert oder sogar vergessen wurde. Zum Beispiel kann es sich um die Qualitätskontrolle oder die Funktionsprüfung des Produktes handeln.
- *Auftragszeitabhängige Unsicherheit:* Die Abweichung zwischen Ist- und Plan-Auftragszeit ist proportional zur Plan-Auftragszeit. Zum Beispiel beträgt der Erwartungswert der Unsicherheit 10 % und die maximale bzw. minimale Unsicherheit beträgt 20 %.

### Ausprägung

Aus den Merkmalen mittlere Unsicherheit und Standardabweichung der Unsicherheit (Abschnitt 4.2.1) leiten sich vier Szenarien für die Ausprägung der Unsicherheit ab. Abbildung 11 zeigt die möglichen Ausprägungen der Unsicherheit. Auf der Horizontalen ist der Mittelwert der Unsicherheit aufgetragen, während auf der Vertikalen die Standardabweichung der Unsicherheit aufgetragen ist.



14083

Abbildung 11: Szenarien der Unsicherheit

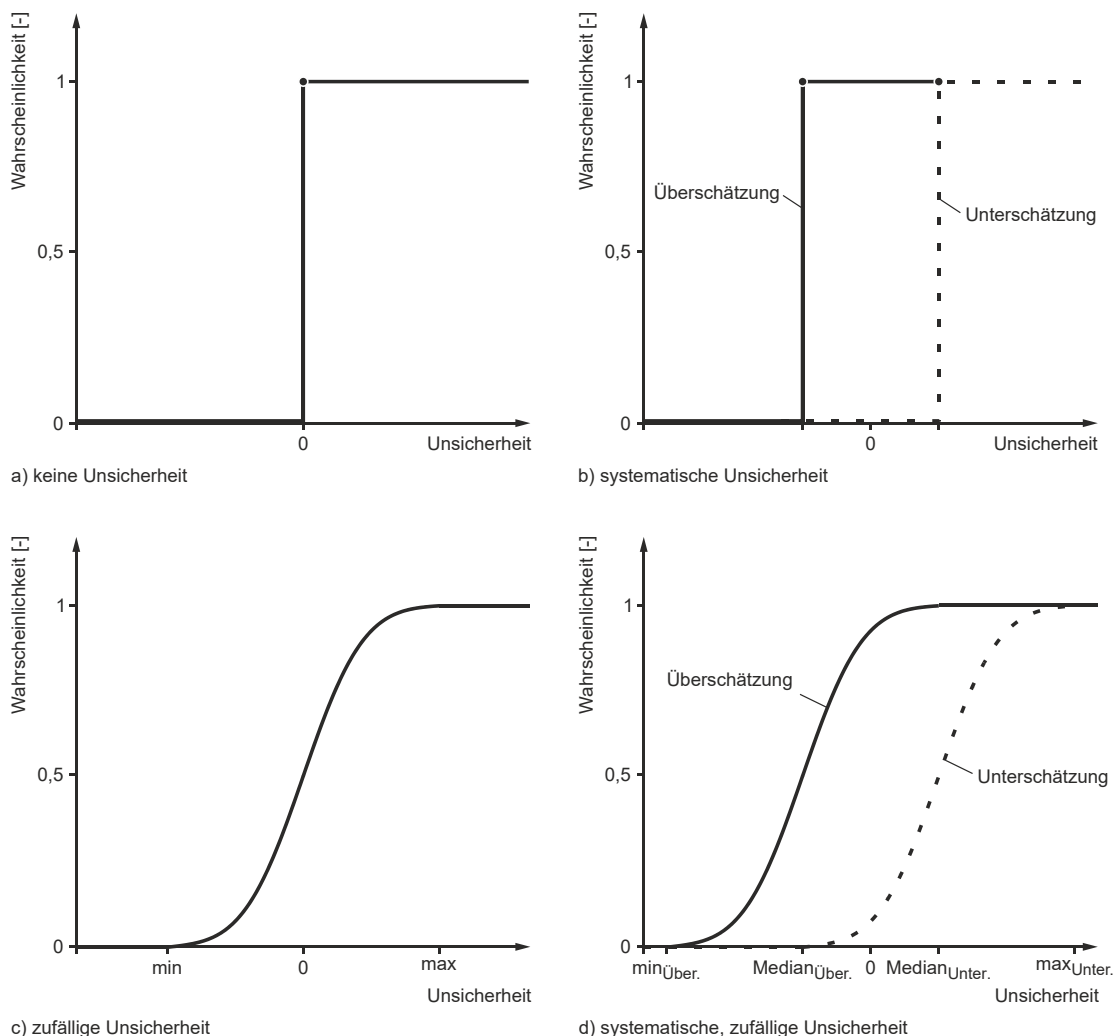
Die vier Szenarien der Unsicherheit sind:

- *Sicherheit*: In diesem Szenario stimmen die Plan-Auftragszeiten mit den Ist-Auftragszeiten überein. Es treten keine Abweichungen zwischen den Ist- und Plan-Auftragszeiten auf. Es liegen keine unsicheren Auftragszeiten vor. Der Mittelwert und die Standardabweichung der Unsicherheit sind null (1. Quadrant, vgl. zudem Abbildung 12a).
- *Systematische Unsicherheit*: Im Szenario systematische Unsicherheit werden die Auftragszeiten systematisch über- oder unterschätzt. Werden die Auftragszeiten überschätzt, ist die mittlere Unsicherheit negativ. Werden die Auftragszeiten dagegen unterschätzt, ist die mittlere Unsicherheit positiv. Da alle Aufträge mit der gleichen Unsicherheit behaftet sind, ist die Standardabweichung der Unsicherheit null (4. Quadrant). Die Verteilungsfunktion der Unsicherheit ist ein Singleton (Abbildung 12b).
- *Zufällige Unsicherheit*: In diesem Szenario ist der Mittelwert der Unsicherheit null. Das bedeutet, die Summe der tatsächlichen Auftragszeiten stimmt mit der Summe der geplanten Auftragszeiten überein. Allerdings fällt die Abweichung zwischen Ist-

#### 4. Modellierung unsicherer Auftragszeiten für die Produktionsplanung

und Plan-Auftragszeit bei den Aufträgen unterschiedlich aus, sodass die Standardabweichung der Unsicherheit positiv ist (Quadrant 2). Dieses Szenario ist in Abbildung 12c dargestellt.

- Systematische und zufällige Unsicherheit:** Dieses Szenario stellt eine Kombination der beiden vorhergehenden Szenarien dar. Die Auftragszeiten werden systematisch über- oder unterschätzt und zugleich ist die Abweichung zwischen der Ist- und Plan-Auftragszeit der Aufträge unterschiedlich ausgeprägt. Eine positive Standardabweichung der Unsicherheit ist charakteristisch für dieses Szenario. Analog zum Szenario 2 ist der Mittelwert der Abweichung im Fall einer Überschätzung negativ bzw. im Fall einer Unterschätzung positiv (3. Quadrant). Abbildung 12d visualisiert für dieses Szenario die Verteilungsfunktionen der Unsicherheit für die beiden Fälle Über- und Unterschätzung.



14084

Abbildung 12: Beispielhafte Verteilungsfunktionen für die vier Szenarien der Unsicherheit  
 Tritt eine systematische Unsicherheit auf, so ist diese verhältnismäßig einfach zu beheben, indem die Planungsparameter in Höhe der mittleren Unsicherheit angepasst werden. Allerdings gilt diese Annahme nur unter der Voraussetzung, dass die Art der Unsicherheit für alle betrachteten Auftragszeiten identisch ist. Diese Aussage kann getroffen werden, ohne dass die exakten Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen bekannt sind. Im Gegensatz

dazu besteht bei einer zufälligen Unsicherheit nicht die Option, die Planungsparameter einfach anzupassen.

**Besondere Ausprägungen unsicherer Auftragszeiten**

Geplante, nicht-gefertigte sowie nicht-geplante, gefertigte Aufträge bilden zwei Extremfälle unsicherer Auftragszeiten. Geplante, nicht-gefertigte Aufträge sind Aufträge, die während des Planungsprozesses verworfen wurden und daher nicht in Produktion gehen. Unikate haben eine komplexe Erzeugnisstruktur und werden in der Planung in mehrere Baugruppen zerlegt. Häufig ändert sich während der Planung der Zuschnitt der Baugruppen. Unter Umständen sinkt oder steigt dadurch die Anzahl der Baugruppen und damit die Anzahl der Aufträge. Die Auftragszeit des verworfenen Auftrags verteilt sich auf einen oder mehrere andere Aufträge bzw. es wird ein Teil der Auftragszeit anderer Aufträge auf einen zusätzlichen Auftrag übertragen.

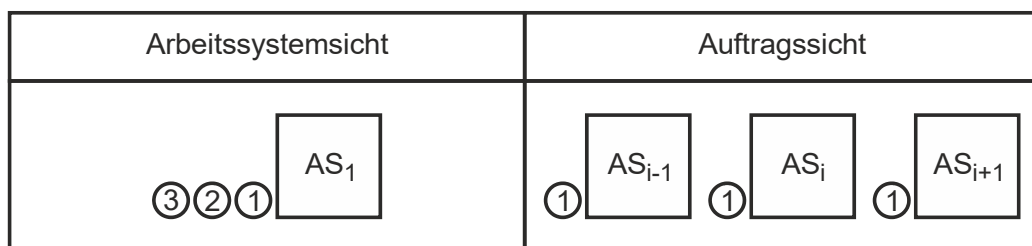
**4.3 Modellierung der logistischen Zielgrößen bei unsicheren Auftragszeiten**

Allein die quantifizierten unsicheren Auftragszeiten erlauben keine Bewertung, ob die geforderten Werte der logistischen Zielgrößen erfüllt werden. Ohne weitere Informationen fehlt eine Entscheidungsgrundlage, ob die Planung neu zu justieren ist oder die Auftragsabwicklung unverändert fortgeführt werden kann. Die Modellierung der logistischen Zielgrößen berücksichtigt keine unsicheren Auftragszeiten. Sie ist daher so zu erweitern, dass die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen ermittelt werden können. Der in der Praxis etablierte Lösungsansatz, Unsicherheiten in der Planung mit Hilfe von Verteilungsfunktionen zu modellieren (vgl. Unterkapitel 2.5), wird in dieser Arbeit für unsichere Auftragszeiten aufgegriffen (siehe Abschnitt 4.2.1). Die zu entwickelnde Modellierung der logistischen Zielgrößen soll auf diesem Lösungsansatz aufbauen. Hierdurch wird sichergestellt, dass die unsicheren Auftragszeiten in den logistischen Zielgrößen abgebildet sind. Analog zum Vorgehen der qualitativen Beschreibung im schematischen Wirkmodell wird auch bei der Modellierung zwischen der Auftrags- und Arbeitssystem-sicht differenziert.

**4.3.1 Wirkung der unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen**

Unsichere Auftragszeiten beeinflussen die logistischen Zielgrößen in der Unikatproduktion auf unterschiedliche Art und Weise. Dieser Abschnitt beschreibt qualitativ die Wirkung unsicherer Auftragszeiten auf die Logistikleistung.

Die Beschreibung der Wirkung unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen erfolgt aus den zwei verschiedenen Sichtweisen Auftrags-sicht und Arbeitssystem-sicht, die in Abbildung 13 dargestellt sind.



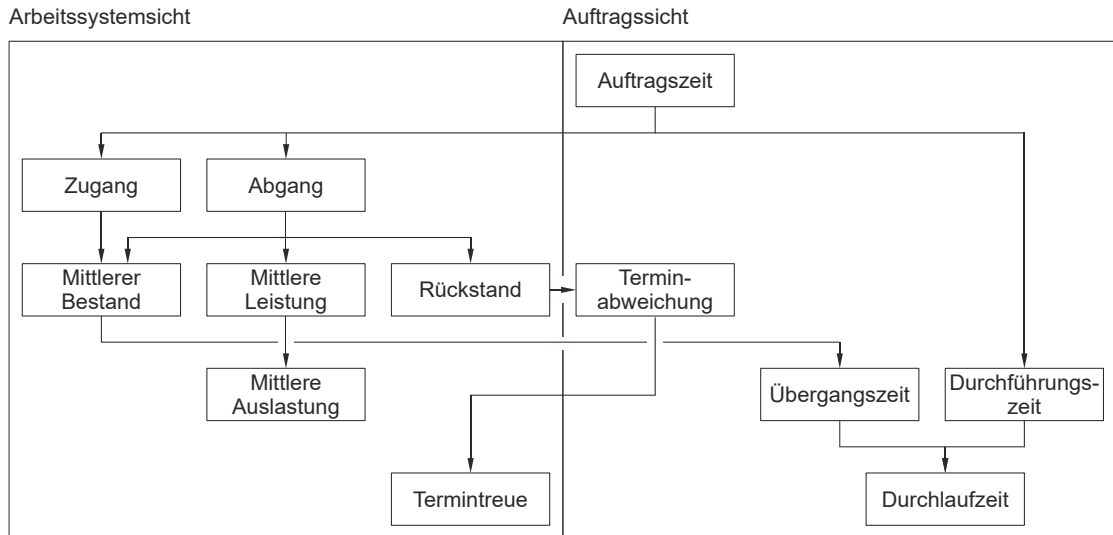
14085

Abbildung 13: Gegenüberstellung der Arbeitssystem-sicht und der Auftrags-sicht

Die Auftragssicht fokussiert sich auf die Wirkung von unsicheren Auftragszeiten auf einen einzelnen Auftrag. Die Analyse bezieht sich dabei entweder auf einen einzelnen Auftrag an einem Arbeitssystem oder auf die Arbeitsvorgänge eines Auftrags an verschiedenen Arbeitssystemen. Die Wirkungen von unsicheren Auftragszeiten übertragen sich durch den Übergang eines Auftrags von einem Arbeitssystem  $AS_i$  auf das nachfolgende Arbeitssystem  $AS_{i+1}$ . Die Durchlaufzeit, die Terminabweichung im Abgang und der Kapazitätsbedarf (Auftragszeit) sind relevante Kenngrößen zur Bewertung eines Auftrags.

Die Arbeitssystemansicht beschreibt die Wirkung von unsicheren Auftragszeiten auf die arbeitssystemspezifischen Kenngrößen. Der mittlere Bestand, die Auslastung, die mittlere Durchlaufzeit und die Termintreue sind relevante Zielgrößen eines Arbeitssystems.

Die Wirkung der unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen ist in Abbildung 14 schematisch dargestellt. Die Aufträge werden mit ihren Vorgabezeiten (Plan-Auftragszeiten) eingeplant. Bei unsicheren Auftragszeiten kann die Ist-Auftragszeit eines Auftrags – sein tatsächlicher Kapazitätsbedarf – von der Vorgabezeit abweichen. Unsichere Auftragszeiten beeinflussen insbesondere den Abgang eines Arbeitssystems und damit dessen mittleren Bestand. Der Abgang beschreibt die Arbeit, die das Arbeitssystem in Form von Aufträgen mit einer bestimmten Vorgabezeit (Plan-Auftragszeit) zu einem definierten Zeitpunkt verlässt [Nyhu12]. Der Abgang in Ist-Stunden ist bei Unsicherheit höher bzw. niedriger als der Plan-Abgang. Ist die Ist-Auftragszeit höher als geplant, sinkt bei gleicher Kapazität der Abgang in Vorgabestunden, sodass ein positiver Rückstand, eine reduzierte Leistung und ein erhöhter Bestand entstehen. Der Rückstand verursacht eine verspätete Fertigstellung der Aufträge, was die Termintreue verringert. Der höhere Bestand verlängert dagegen die Übergangszeit und damit auch die Durchlaufzeit. Ist die Ist-Auftragszeit geringer als geplant, steigt bei gleicher Kapazität der Abgang in Vorgabestunden, falls ein ausreichender Bestand vorliegt. Daraus resultieren ein negativer Rückstand, eine erhöhte Leistung und ein verminderter Bestand. Der Rückstand erzeugt eine verfrühte Fertigstellung (negative Terminabweichung), sodass die Termintreue sinkt. Der niedrigere Bestand verkürzt die Übergangszeit und damit ebenfalls die Durchlaufzeit. Außerdem beeinflusst die Unsicherheit eines Auftrags unmittelbar dessen Durchführungszeit und damit auch die Durchlaufzeit.



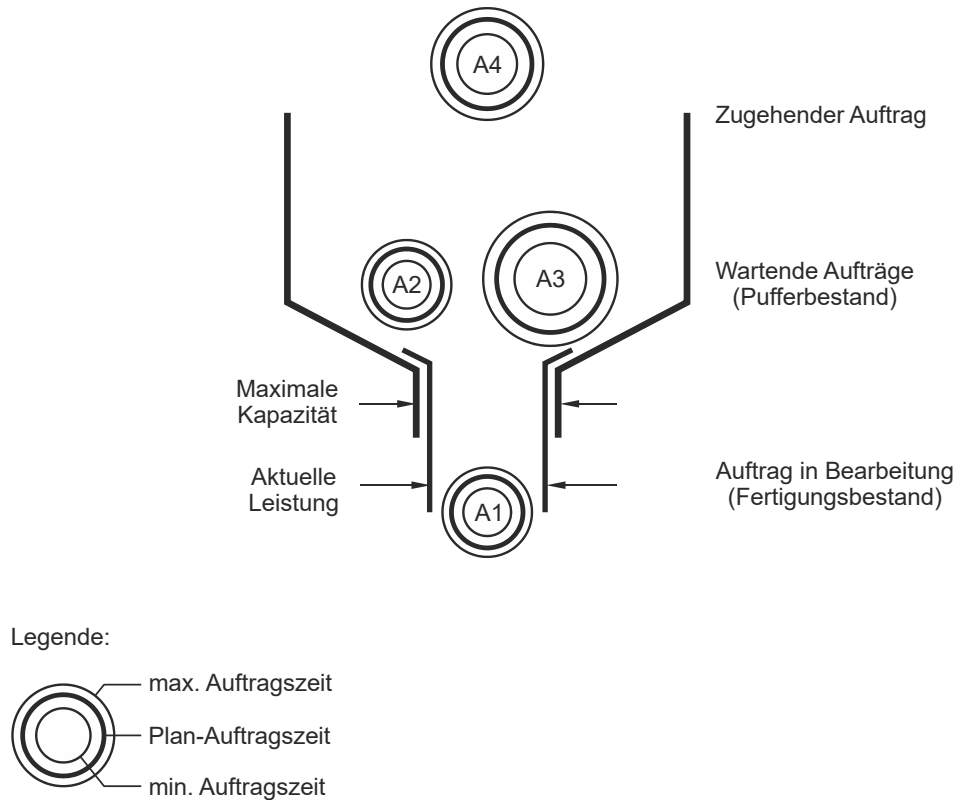
13134.1

Abbildung 14: Schematisches Wirkmodell Arbeitssystem- und Auftragssicht [Haux17]

### 4.3.2 Modellierung der logistischen Zielgrößen für einen Auftrag

Unsichere Auftragszeiten beeinflussen den Auftragsdurchlauf. Die folgenden Ausführungen beschreiben, wie sich unsichere Auftragszeiten auf die Durchlaufzeit und die Terminabweichung eines einzelnen Auftrags  $A_i$  auswirken.

Um die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten in der Produktion auf einen einzelnen Auftrag zu veranschaulichen, wird ein exemplarischer Auftrag betrachtet (siehe Abbildung 15). Die folgenden Betrachtungen gelten unter der Voraussetzung, dass die Aufträge nach dem FIFO-Prinzip bearbeitet werden und dass die maximale Kapazität des Arbeitssystems konstant ist. Zum Zeitpunkt TZU geht ein Auftrag ( $A_4$ ) dem Arbeitssystem AS zu. An diesem Arbeitssystem befinden sich ein Auftrag ( $A_1$ ) in Bearbeitung und zwei Aufträge ( $A_2, A_3$ ) im Puffer. Der Auftrag  $A_4$  muss warten, bis die vorherigen Aufträge ( $A_1, A_2, A_3$ ) abgearbeitet sind. Alle Aufträge haben unsichere Auftragszeiten. Die drei unterschiedlichen Durchmesser symbolisieren bei jedem Auftrag die Unsicherheit (Abbildung 15).



14086

Abbildung 15: Trichtermodell mit unsicheren Auftragszeiten in Anlehnung an [Bech84]

### Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit eines Auftrags berechnet sich bei einer First-in-First-out-Reihenfolgebildung in Anlehnung an die Trichterformel (mittlere Reichweite = mittlerer Bestand/mittlere Leistung, [Bech84, Nyhu12]) aus dem Quotienten aus der Summe der Auftragszeiten im Puffer (Pufferbestand) zuzüglich der restlichen Auftragszeit des aktuell bearbeiteten Auftrags zum Zeitpunkt des Zugangs und der maximalen Leistung des Arbeitssystems. Die Summe der Auftragszeiten entspricht näherungsweise dem Bestand des Arbeitssystems. Obwohl der Auftrag in Bearbeitung bereits fortgeschritten ist, wird dessen Auftragszeit vollständig dem Bestand zugerechnet. Folglich ist der Bestand größer als die Summe der zu bearbeitenden Auftragszeiten am Arbeitssystem und die Durchlaufzeit des Auftrags wird etwas zu hoch eingeschätzt. Dieser Effekt ist vernachlässigbar, wenn der Pufferbestand im Vergleich zum Fertigungsbestand groß ist. Die Formel lautet:

$$\begin{aligned}
 ZDL_n(TZU) &= \frac{ZAU_n}{L_{max}} + \frac{\sum_2^{n-1} ZAU_i}{L_{max}} + \frac{\sum ZAU_{1,Rest}}{L_{max}} \approx \frac{\sum_1^n ZAU_i}{L_{max}} \\
 &= \frac{B(TZU)}{L_{max}} = ZDF_n + ZUE_n
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$ZDL_n$       *Durchlaufzeit des n-ten Auftrags [BKT]*  
 $ZAU_n$       *Auftragszeit des n-ten Auftrags [Std]*  
 $L_{max}$       *Maximale Leistung [Std/BKT]*

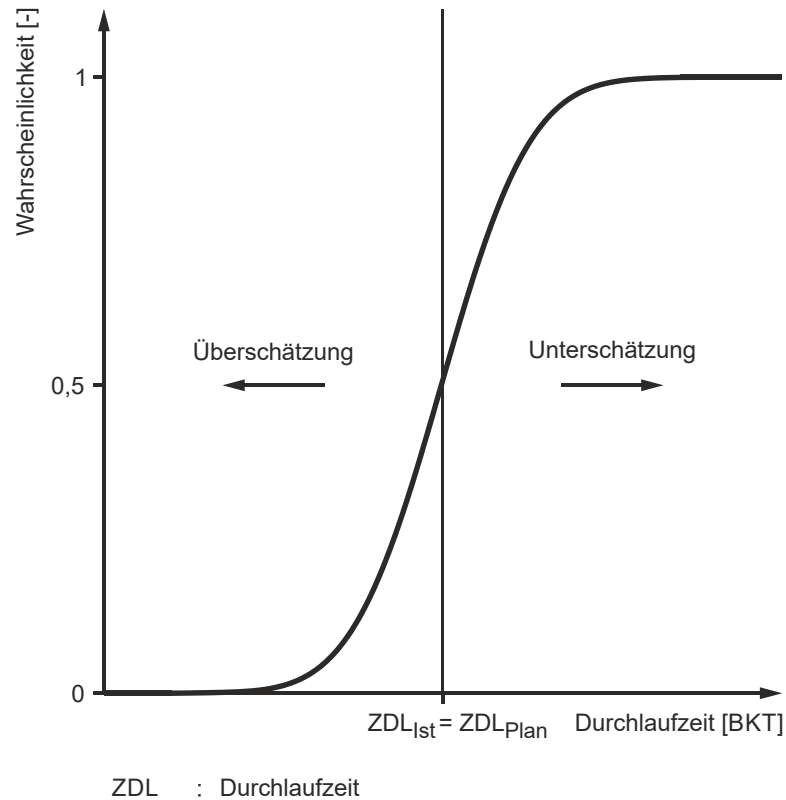
$ZAU_i$	<i>Auftragszeit des i-ten Auftrags [Std]</i>
$ZAU_{1,Rest}$	<i>Restliche Auftragszeit des ersten Auftrags [Std]</i>
$B(TZU)$	<i>Bestand des Arbeitssystems am Zugangstermin [Std]</i>
$ZDF_n$	<i>Durchführungszeit des n-ten Auftrags [BKT]</i>
$ZUE_n$	<i>Übergangszeit des n-ten Auftrags [BKT]</i>

Der erste Term entspricht der Durchführungszeit. Der zweite und der dritte Term bilden gemeinsam die Übergangszeit. Die Durchlaufzeit eines Auftrags wird sowohl von der eigenen Auftragszeit (Durchführungszeit) als auch von den Auftragszeiten vorangegangener Aufträge (Übergangszeit) beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen der Durchlaufzeit und der Summe der Auftragszeiten gilt auch im Fall von unsicheren Auftragszeiten. Anstelle der sicheren Auftragszeiten sind Verteilungen für die unsicheren Auftragszeiten zu berücksichtigen. Die Durchlaufzeit ist eine Funktion der Auftragszeiten und deshalb ebenfalls als Verteilung anzugeben. Die Verteilung der Summe der Auftragszeiten kann durch die Faltung der Verteilungen der einzelnen Auftragszeiten berechnet werden (vgl. [Kopp17]). Für die Verteilungsfunktion der Durchlaufzeit gilt:

$$F_{ZDL(TZU)} = F_{\frac{\sum_1^n ZAU_i(TZU)}{L_{max}}} \quad (15)$$

$F_{ZDL(TZU)}$	<i>Verteilungsfunktion der Durchlaufzeit zum Zeitpunkt des Zugangs [%]</i>
$F_{\frac{\sum_1^n ZAU_i(TZU)}{L_{max}}}$	<i>Verteilungsfunktion des Quotienten aus der Summe der unsicheren Auftragszeiten zum Zeitpunkt des Zugangs und der maximalen Leistung [%]</i>

Eine Überschätzung der Auftragszeit verkürzt die Durchführungszeit und somit die Durchlaufzeit eines Auftrags. Analog verlängert eine Unterschätzung der Auftragszeit die Durchführungszeit und damit die Durchlaufzeit eines Auftrags. Das gilt auch für die Übergangszeiten der Aufträge in der Warteschlange des Arbeitssystems. Die Verteilungsfunktion der Durchlaufzeit eines Auftrags ist in Abbildung 16 dargestellt.



14097

Abbildung 16: Exemplarische Verteilungsfunktionen der Durchlaufzeit

### Terminabweichung im Abgang

Unsichere Auftragszeiten führen im Vergleich zur Planung zu Änderungen im Abgang des Arbeitssystems. Unter der Prämisse einer konstanten Leistung verursachen die unsicheren Auftragszeiten eine Abweichung zwischen dem geplanten und dem tatsächlichen Abgang. Jeder unsichere Auftrag erzeugt einen zusätzlichen (positiven oder negativen) Rückstand in Höhe der Unsicherheit. Weiterhin gilt die Prämisse, dass Reihenfolgeabweichungen ausgeschlossen sind. Der Rückstand zum Plan-Bearbeitungsende eines Auftrags setzt sich aus dem Rückstand zum Zeitpunkt des Zugangs eines Auftrags zuzüglich der Summe der Unsicherheiten der Aufträge am Arbeitssystem zusammen. Es entsteht ein zusätzlicher Rückstand in Höhe der Differenz der tatsächlichen und der geplanten Auftragszeit, der seinerseits zu einer Terminabweichung im Abgang führt. Es gilt:

$$\begin{aligned}
 RS(TAE_{Plan}) &= AB_{Plan}(TAE_{Plan}) - AB_{Ist}(TAE_{Plan}) \\
 &= RS(TZU_{Ist}) + \sum U = RS(TZU_{Ist}) + \sum ZAU_{Ist} - \sum ZAU_{Plan}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$RS$	Rückstand [Std]
$TAE$	Bearbeitungsende eines Auftrags [BKT]
$AB_{Plan}$	Plan-Abgang [Std]
$AB_{Ist}$	Ist-Abgang [Std]
$TZU_{Ist}$	Ist-Zugangstermin [BKT]
$U$	Unsicherheit [Std]

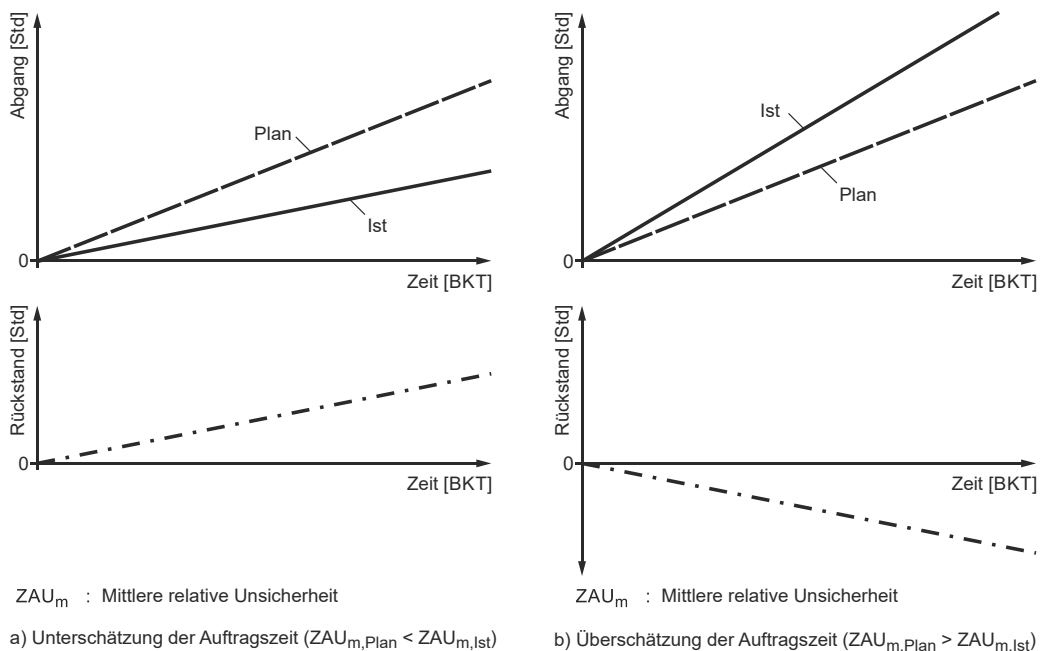
$ZAU_{Ist}$       *Ist-Auftragszeit [Std]*  
 $ZAU_{Plan}$       *Plan-Auftragszeit [Std]*

Die Terminabweichung eines einzelnen Auftrags setzt sich aus der rückstandsbedingten und der reihenfolgebedingten Terminabweichung zusammen. In diesem Fall prägen nur Rückstände die Terminabweichung. Es gilt zu prüfen, ob diese Rückstände auf unsichere Auftragszeiten zurückgeführt werden können.

$$TAA = TAA_{RS} = TAA_U \quad (17)$$

$TAA$               *Terminabweichung im Abgang [BKT]*  
 $TAA_{RS}$           *Terminabweichung aus Rückstand [BKT]*  
 $TAA_U$             *Terminabweichung aus unsicheren Auftragszeiten [BKT]*

Abbildung 17 zeigt, wie sich unsichere Auftragszeiten auf den Rückstand eines Arbeitssystems auswirken. Dargestellt sind der geplante und der tatsächliche Abgang in Vorgabestunden an einem Arbeitssystem über die Zeit für die beiden Szenarien Über- und Unterschätzung. Die Überschätzung der Auftragszeiten verursacht einen negativen Rückstand am Arbeitssystem und führt zu einer negativen Terminabweichung (siehe Abbildung 17a). Bei einer Unterschätzung der Auftragszeiten treten hingegen ein positiver Rückstand und eine positive Terminabweichung auf (siehe Abbildung 17b). Für einen einzelnen Auftrag setzt sich der Rückstand aus dem bereits vorhandenen Rückstand (unsichere Vorgängeraufträge) und dem neu erzeugten Rückstand (eigene unsichere Auftragszeit) zusammen.



14098

Abbildung 17: Wirkung unsicherer Auftragszeiten auf den Rückstand

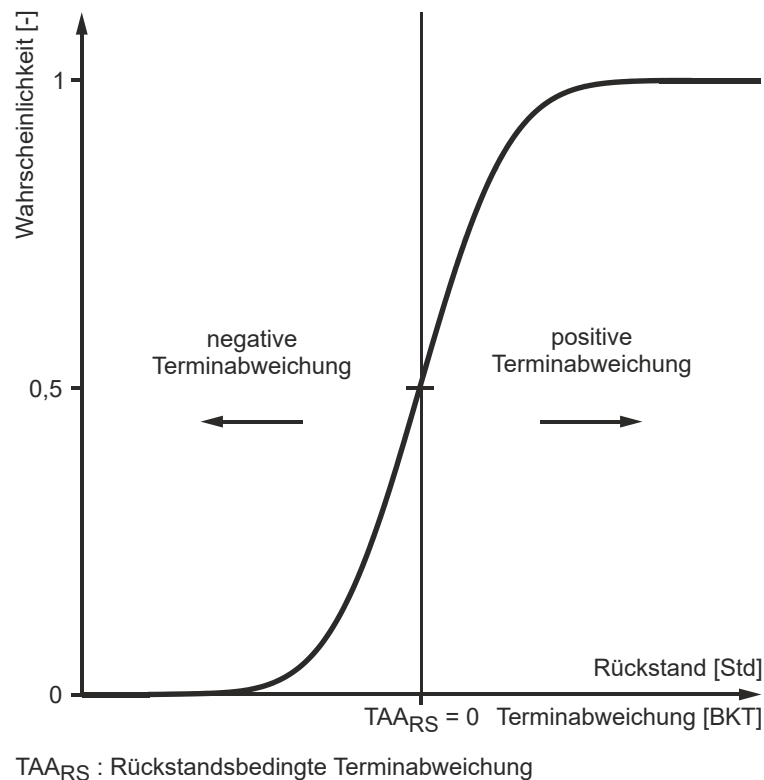
Neben unsicheren Auftragszeiten gibt es weitere Einflussgrößen auf den Rückstand, z.B. Abweichungen zwischen der Plan- und der Ist-Kapazität bzw. Störungen. Für die folgende Diskussion gilt die Prämisse, dass diese Einflussgrößen nicht auftreten. Im Fall von unsicheren Auftragszeiten ist der Rückstand ebenfalls eine Zufallsvariable (unsicher) und kann mit Hilfe einer Verteilungsfunktionen modelliert werden (vgl. Formel 16). Aufbauend auf dieser

Verteilungsfunktion lässt sich die Verteilungsfunktion der rückstandsbedingten Terminabweichungen bestimmen. Es gilt:

$$F_{TAA,RS} = F_{TAA,U} = F_{\frac{RS}{L_m}} \quad (18)$$

- $F_{TAA,RS}$  Verteilungsfunktion der Terminabweichung im Abgang aus Rückstand [%]
- $F_{TAA,U}$  Verteilungsfunktion der Terminabweichung im Abgang aus unsicheren Auftragszeiten [%]
- $F_{RS/L_m}$  Verteilungsfunktion des Quotienten aus Rückstand und mittl. Leistung [%]

Abbildung 18 zeigt die Verteilungsfunktionen des Rückstands und der rückstandsbedingten Terminabweichung. Der Verteilungstyp der beiden Kenngrößen ist identisch. Zudem können die unterschiedlichen Lage- und Streuparameter über die bekannten Formelzusammenhänge ineinander überführt werden.



14099

Abbildung 18: Verteilungsfunktion des Rückstands und der Terminabweichung aufgrund unsicherer Auftragszeiten

### Kapazitätsbedingte Kosten

Unsichere Auftragszeiten beeinflussen direkt den Kapazitätsbedarf für Mitarbeiter bzw. Maschinen zur Fertigstellung eines Auftrags und wirken sich unmittelbar auf die Kosten des Auftrags aus. Im Fall einer Über- bzw. Unterschätzung der Auftragszeit verursacht der verminderte bzw. erhöhte Kapazitätsbedarf proportionale Minder- oder Mehrkosten. Um die Kosten zu berechnen, ist der zusätzliche Kapazitätsbedarf mit dem Kostensatz pro Kapazitätseinheit zu multiplizieren:

$$K = U \cdot KS \quad (19)$$

$K$             *Kosten der Unsicherheit [€]*  
 $U$             *Unsicherheit [Std]*  
 $KS$           *Kostensatz [€/Std]*

Ist die Verteilungsfunktion für die tatsächliche Auftragszeit eines Auftrags bekannt, kann diese durch eine Transformation der Streu- und Lageparameter in die Verteilungsfunktion der kapazitätsbedingten Kosten überführt werden:

$$F_K = F_{U \cdot KS} \quad (20)$$

$F_K$             *Verteilungsfunktion der kapazitätsbedingten Kosten der Unsicherheit [%]*  
 $F_{U \cdot KS}$       *Verteilungsfunktion des Produktes aus Unsicherheit und Kostensatz [%]*

Abbildung 19 visualisiert eine exemplarische Verteilungsfunktion für die kapazitätsbedingten Kosten eines Auftrags aufgrund einer unsicheren Auftragszeit.

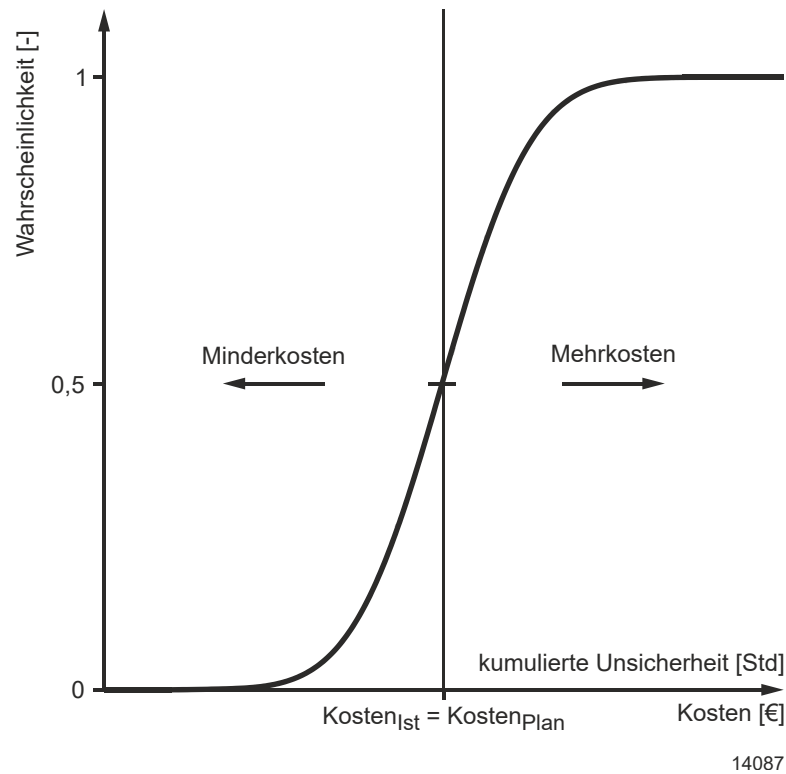


Abbildung 19: Exemplarische Verteilungsfunktion der unsicherheitsbedingten Kosten

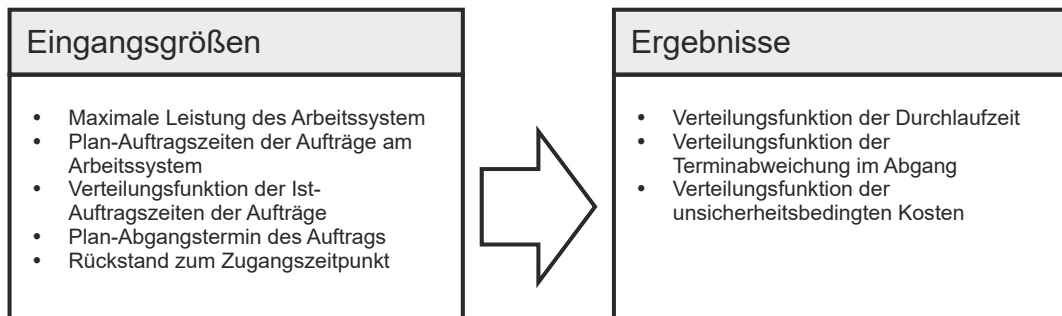
Tabelle 5 fasst die Wirkung von unsicheren Auftragszeiten auf die Durchlaufzeit, die Terminabweichung und die kapazitätsbedingten Kosten eines einzelnen Auftrags zusammen. Die Wirkung auf die Durchlaufzeit wird nach den Auslösern Auftrag oder Vorgängeraufträge differenziert. Während unsichere Auftragszeiten der Vorgängeraufträge die Übergangszeit eines Auftrags beeinflussen, verändert die unsichere Auftragszeit eines Auftrags dessen Durchführungszeit. Weiterhin wurde gezeigt, dass unsichere Auftragszeiten rückstandsbedingte Terminabweichungen auslösen.

Tabelle 5: Wirkung unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen eines Auftrags

Logistische Zielgröße		Auslöser	
Zielgröße	Komponente	Vorgängeraufträge	Auftrag
Durchlaufzeit	Übergangszeit	x	
	Durchführungszeit		x
Terminabweichung	Rückstandsbedingt	x	x
Kosten	Kapazitätsbedarf		x

**Voraussetzungen für die Modellierung der logistischen Zielgrößen eines Auftrags**

Um die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen eines einzelnen Auftrags zu ermitteln, müssen die maximale Leistung des Arbeitssystems, die Verteilungsfunktionen der Ist-Auftragszeiten der Aufträge im Bestand des Arbeitssystems zum Zugangszeitpunkt, deren Plan-Auftragszeiten, der Plan-Abgangstermin und die Höhe eines ggf. vorhandenen Rückstands bekannt sein. Ergebnis der zuvor entwickelten Modellierung sind die Verteilungsfunktionen für die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Terminabweichung im Abgang und Kosten. Dadurch ist es möglich, die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Wertebereich anzugeben. Abbildung 20 listet die notwendigen Eingangsdaten und die Ergebnisse der Modellierung von unsicheren Auftragszeiten auf.



14088

Abbildung 20: Eingangsdaten und Ergebnisse der Modellierung der Auswirkung unsicherer Auftragszeiten auf einen einzelnen Auftrag

**4.3.3 Modellierung der logistischen Zielgrößen für ein Arbeitssystem**

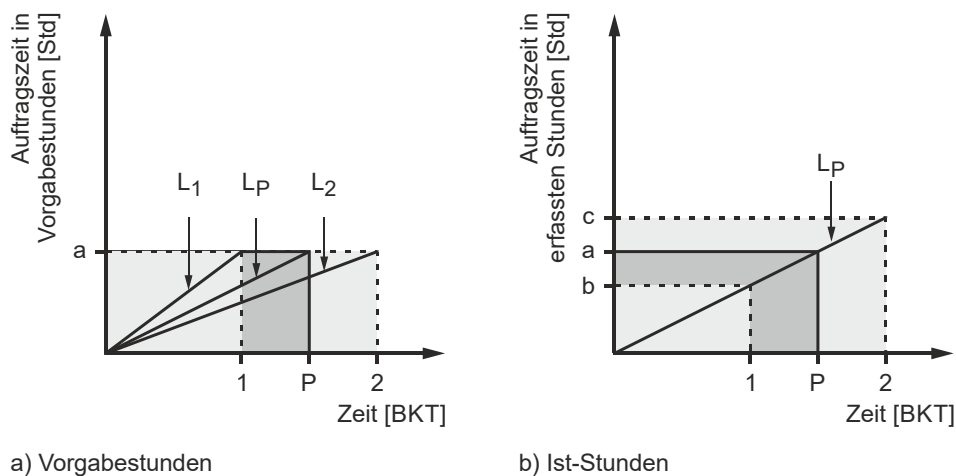
Unsichere Auftragszeiten beeinflussen neben dem einzelnen Auftragsdurchlauf auch die logistische Zielerreichung der Arbeitssysteme. Für eine zuverlässige Planung ist es erforderlich, die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf Arbeitssysteme zu kennen. Erst die Kenntnis darüber ermöglicht es dem Anwender, die Planungsparameter so zu konfigurieren, dass die logistische Zielerreichung trotz unsicherer Auftragszeiten gewährleistet werden kann. Die Idee, die diesem Abschnitt zu Grunde liegt, ist es, die Modellierung von logistischen Prozessen so zu erweitern, dass diese die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten abbildet. Die Modellierung soll in der Lage sein, die folgenden Fragestellungen zu beantworten:

- Kann die bestehende Modellierung von logistischen Prozessen unsichere Auftragszeiten abbilden? Es ist zu prüfen, inwiefern Durchlaufdiagramme, Kapazitätsprofile

und Produktionskennlinien geeignet sind, um die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten darzustellen.

- Wie wirken sich bestimmte Ausprägungen von unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen eines Arbeitssystems aus?
- Wie beeinflusst eine einzelne unsichere Auftragszeit ein Arbeitssystem?
- Wie beeinflussen mehrere unsichere Auftragszeiten ein Arbeitssystem?
- Wie ist es möglich, die unsicheren Auftragszeiten in der Planung zu berücksichtigen?
- Welche Schlussfolgerungen ergeben sich daraus?

Als erste Herausforderung zeigt sich, dass das Durchlaufdiagramm unsichere Auftragszeiten nicht dargestellt. Hintergrund ist, dass die Auftragszeiten üblicherweise als Vorgabezeiten in den Diagrammen aufgetragen werden. Um den Einfluss unsicherer Auftragszeiten auf ein Arbeitssystem zu beschreiben, gilt es zwischen den wahrgenommenen und den tatsächlichen Auswirkungen zu differenzieren. Der Unterschied wird anhand der Abbildung 21 erläutert. Sie stellt dar, wie sich der Abgangzeitpunkt eines Auftrags und die gemessene Leistung eines Arbeitssystems ändern, wenn die Vorgabezeit  $a$  (=Plan-Auftragszeit) die tatsächliche Auftragszeit überschätzt (Fall 1) bzw. unterschätzt (Fall 2). Hier ist für die drei Szenarien Planung, Über- und Unterschätzung die Angabe der Auftragszeiten in Vorgabestunden und Ist-Stunden gegenübergestellt. Der betrachtete Auftrag wird dann früher (Punkt 1 in Abbildung 21) oder später (Punkt 2 in Abbildung 21) als geplant (Punkt P in Abbildung 21) fertiggestellt. Die Steigung der Abgangskurven und die gemessene Leistung des Arbeitssystems variiert in den Szenarien. Der Beobachter nimmt eine Änderung der mittleren Leistung wahr. Eine Überschätzung bzw. eine Unterschätzung einer Auftragszeit werden demnach als eine Leistungssteigerung ( $L_1$ ) bzw. Leistungsminderung ( $L_2$ ) wahrgenommen. Tatsächlich unterscheiden sich jedoch weder die Kapazität noch die maximal mögliche Leistung (in Ist-Stunden) des Arbeitssystems. Abbildung 21b zeigt den tatsächlichen Zustand. Die Auftragszeit ist in Ist-Stunden auf der Ordinate aufgetragen (Punkte b und c in Abbildung 21b). Die Durchführungszeit variiert wie in Abbildung 21a, jedoch ist die mittlere Leistung in allen drei Szenarien konstant.



14089

Abbildung 21: Vergleich der wahrgenommenen und tatsächlichen Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten für die Szenarien Über- und Unterschätzung im Durchlaufdiagramm

Für die Beschreibung von unsicheren Auftragszeiten ist es von Bedeutung, bei der Analyse von Terminabweichungen im Abgang zu differenzieren, ob diese auf eine Abweichung der maximalen Leistung oder auf eine Abweichung der Ist-Auftragszeit von der Vorgabezeit zurückzuführen sind. Dieser Aspekt unterstreicht die Bedeutung von zuverlässigen Rückmelddaten.

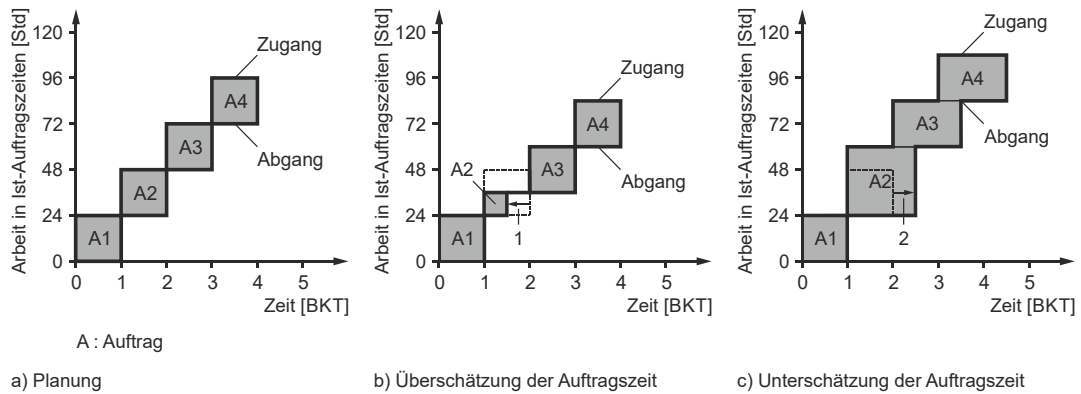
##### **Auswirkungen einer einzelnen unsicheren Auftragszeit auf ein Arbeitssystem**

In einem weiteren Beispiel mit vier Aufträgen (A1-A4) werden die Auswirkungen einer einzelnen unsicheren Auftragszeit auf ein Arbeitssystem erläutert, in dem die Aufträge in der Planung wie in einem idealen Produktionsprozess lückenlos aufeinander folgen (Abbildung 22a). Die Aufträge werden nach dem FIFO-Prinzip bearbeitet und die fixe Kapazität des Arbeitssystems beträgt (24 Std/BKT). Die Plan-Auftragszeit der Aufträge beläuft sich auf 24 Std und die Plan-Durchlaufzeit entsprechend auf 1 BKT. Die Auftragszeiten streuen nicht (ZAUs = 0). Übergangszeiten existieren in der Planung nicht, deshalb ist auch kein Vorziehen von Aufträgen möglich. Die drei Durchlaufdiagramme für die Szenarien Planung, Überschätzung und Unterschätzung visualisieren die Auswirkungen (Abbildung 22). Zugang und Abgang sind in Ist-Auftragszeiten dargestellt. Die Ist-Auftragszeit des zweiten Auftrags ist in den Szenarien Über- und Unterschätzung um 50 % kleiner bzw. größer als die Plan-Auftragszeit. Die Durchführungszeit und die Durchlaufzeit des Auftrags ändern sich in gleicher Höhe. Die unsichere Auftragszeit verursacht eine Änderung des Zu- bzw. Abgangs im Vergleich zur Planung. Die überschätzte Auftragszeit erzeugt temporär einen negativen Rückstand am Arbeitssystem und der Auftrag erfährt eine negative Terminabweichung (Punkt 1 in Abbildung 22). Neben der mittleren Auslastung sinkt auch der mittlere Bestand. Der negative Rückstand wird kompensiert, da kurzfristig kein Auftrag am Arbeitssystem ist.

Die unterschätzte Auftragszeit verursacht dagegen einen positiven Rückstand und eine positive Terminabweichung (Punkt 2 in Abbildung 22c). Dieser Rückstand ist ohne zusätzliche Maßnahmen von Dauer. Die nachfolgenden Aufträge müssen auf ihre Bearbeitung warten (Übergangszeit > 0) und erfahren eine positive Terminabweichung (Abbildung 22c). Die mittlere Durchlaufzeit und der mittlere Bestand steigen, dagegen sinkt die Termintreue [Haux17].

Bei einer Positionierung des Arbeitssystems im Unterlastbereich wird kein anderer Auftrag vorgezogen, die Kapazität des Arbeitssystems bleibt ungenutzt und die Leistung sinkt im Zeitraum zwischen Ist-Bearbeitungsende und Plan-Bearbeitungsende auf null. Eine Überschätzung der Auftragszeit hat keine Auswirkung auf nachfolgende Aufträge. Die Effekte sind in Abbildung 22b dargestellt.

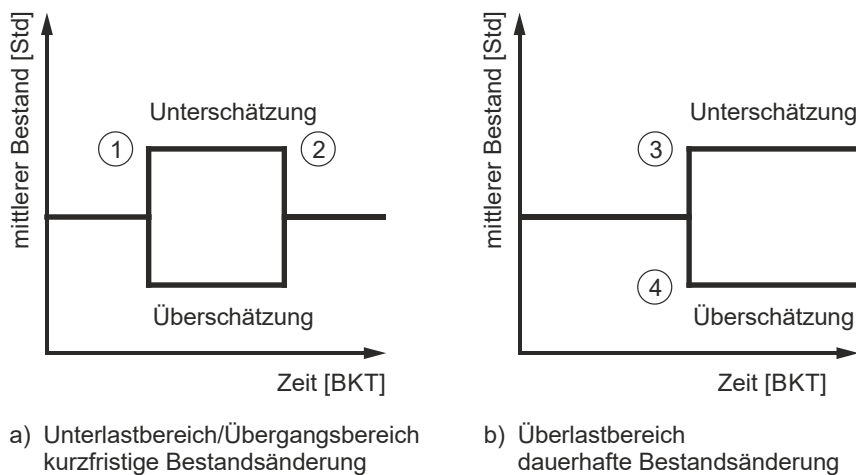
#### 4. Modellierung unsicherer Auftragszeiten für die Produktionsplanung



13130.2

Abbildung 22: Durchlaufdiagramme für die Szenarien Planung (a), Überschätzung der Auftragszeit (b) und Unterschätzung der Auftragszeit (c) nach [Haux17]

Eine einzelne unsichere Auftragszeit verursacht je nach Ausprägung der Unsicherheit eine Bestandserhöhung (Unterschätzung) oder eine Bestandssenkung (Überschätzung) am Arbeitssystem. Bei einer Positionierung im Unterlast- bzw. Übergangsbereich ändert sich der Bestand gegenüber der Planung nur temporär, weil sich der Rückstand durch die geplanten Auslastungsverluste wieder ausgleichen kann. Mit der Zeit wird der Rückstand abgebaut und es stellt sich der ursprüngliche Betriebspunkt wieder ein (Punkt 1 und 2 in Abbildung 23). Arbeitet das Arbeitssystem dagegen im Überlastbereich, ändert sich der Betriebspunkt des Arbeitssystems dauerhaft (Punkt 3 und 4 in Abbildung 23). Die mittlere Durchlaufzeit und die mittlere Leistung des Systems nehmen im Fall einer Unterschätzung zu, während sie im Fall einer Überschätzung sinken.



14090

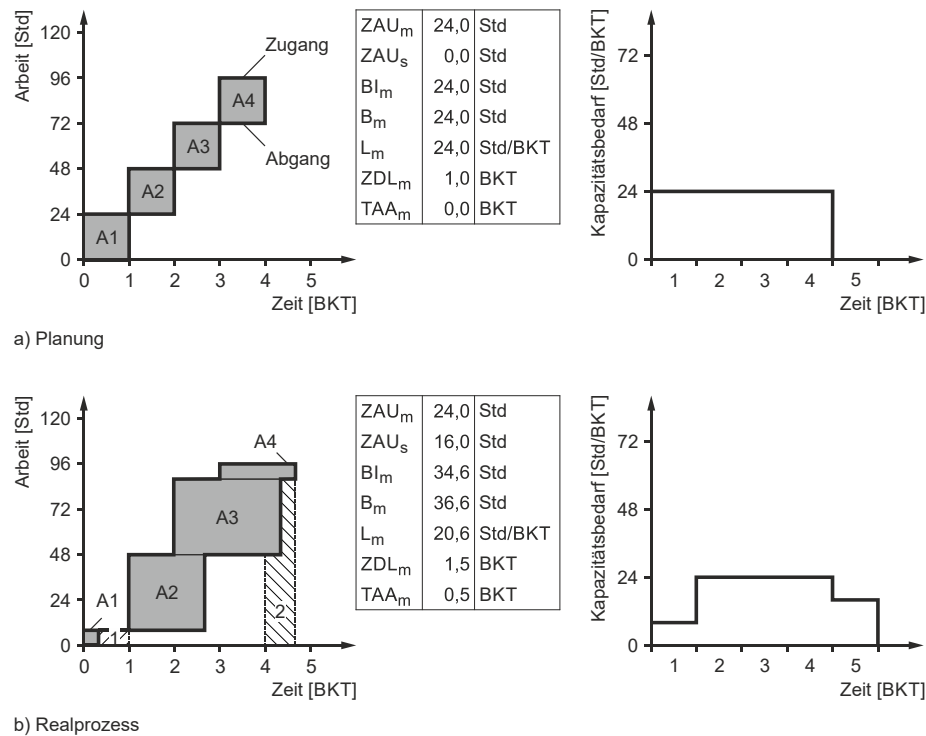
Abbildung 23: Wirkung einer einzelnen unsicheren Auftragszeit auf den mittleren Bestand

#### Auswirkungen mehrerer unsicherer Auftragszeiten auf ein Arbeitssystem

Wie eigene Untersuchungen in der schiffbaulichen Unikatproduktion ergeben haben, sind meist mehrere Auftragszeiten unsicher [Haux17]. Dies war der Anlass, die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf ein Arbeitssystem zu untersuchen. Dazu werden die zwei Szenarien Planung und Realprozess anhand der Durchlaufdiagramme, der logistischen Kennzahlen und der Kapazitätsbedarfsprofile miteinander verglichen (siehe Abbildung 24).

#### 4. Modellierung unsicherer Auftragszeiten für die Produktionsplanung

In der Planung haben alle vier Aufträge eine Vorgabezeit von 24 Std, sodass sich auch ein idealer Mindestbestand von 24 Std ergibt. Im Realprozess sind die Auftragszeiten unsicher ( $ZAU_m = 24$  Std,  $ZAU_s = 16$  Std). Betrachtet werden vier Aufträge mit einer Ist-Auftragszeit von 8 Std (A1, A4) bzw. 40 Std (A2, A3). Auslastungsverluste (Punkt 1 in Abbildung 24) und eine Überschreitung des geplanten Belegungszeitraums (Punkt 2 in Abbildung 24) sind im Durchlaufdiagramm zu erkennen. Zudem zeigt das Kapazitätsbedarfsprofil einen geänderten Kapazitätsbedarf. Die Aufträge A3 und A4 erfahren infolge der unsicheren Auftragszeiten eine Übergangszeit. Der ideale Mindestbestand zu Ist-Auftragszeiten erhöht sich gegenüber der Planung von 24 Std auf 34,6 Std. Zudem verschlechtern sich die logistischen Zielgrößen im Realprozess deutlich. Der zu Ist-Auftragszeiten bewertete mittlere Bestand ( $B_m$ ) ist mit 34,6 Std um fast 50 % größer als geplant, die mittlere Leistung ( $L_m$ ) sinkt mit 20,6 Std/BKT auf etwas mehr als 80 % der Plan-Leistung, die mittlere Durchlaufzeit ( $ZDL_m$ ) beträgt 1,5 BKT und ist damit 50 % größer als geplant. Die mittlere Terminabweichung im Abgang ist 0,5 BKT.



14201

Abbildung 24: Durchlaufdiagramm, logistische Kennzahlen und Kapazitätsbedarfsprofil für die Szenarien Planung und Realprozess nach [Haux17]

Ursache für die verminderte logistische Zielerreichung ist, dass die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten – Übergangszeiten und Auslastungsverluste – nicht in der Termin- und Kapazitätsplanung berücksichtigt werden, die keinen Bestandspuffer vorsieht. Wie Abbildung 25 zeigt, führen die unsicheren Auftragszeiten zum einen zu einem höheren idealen Mindestbestand und zu entsprechend veränderten idealen Kennlinien. Zum anderen entstehen im Realprozess sowohl Auslastungsverluste als auch Übergangszeiten, sodass die realen Kennlinien vom Idealprozess mit Unsicherheit noch abweichen. Aus der Veränderung der Auftragszeitstruktur resultiert ein erhöhter idealer Mindestbestand. Die Kennlinien für die Durchlaufzeit und die Leistung haben einen anderen Verlauf als geplant, die



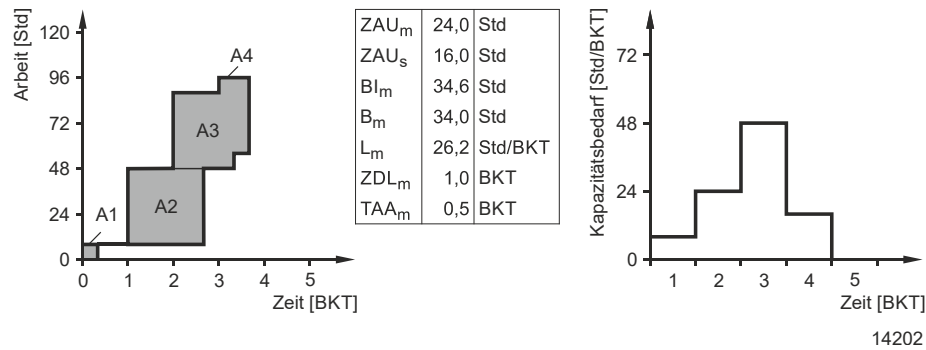


Abbildung 26: Durchlaufdiagramm, logistische Kennzahlen und Kapazitätsbedarfsprofil für den Realprozess mit Kapazitätsplanung nach [Haux17]

### Verallgemeinerte Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten ohne Gegenmaßnahmen

In diesem Absatz werden die generalisierten Auswirkungen von mehreren unsicheren Auftragszeiten auf ein Arbeitssystem untersucht. Da die Auftragszeiten äquivalent zum Kapazitätsbedarf sind, überträgt sich deren Unsicherheit eins zu eins auf den Kapazitätsbedarf. Je nach Ausprägung der Unsicherheit ergeben sich daraus verschiedene Kapazitätsbedarfsprofile. Abbildung 27 zeigt beispielhaft den Kapazitätsbedarf (dicke Linie) und das normale bzw. maximale Kapazitätsangebot (gepunktete Linien) für die drei Szenarien systematische Überschätzung, Unterschätzung und zufällige Unsicherheit über die Zeit. Die Aufträge werden in der Planung mit der Vorgabezeit berücksichtigt. Aufgrund der unsicheren Auftragszeiten weicht die tatsächliche Belastung des Arbeitssystems (Auftragszeit in Ist-Stunden) von der geplanten Belastung (Auftragszeit in Vorgabestunden) ab. Analog gilt dies für die gemessene und die tatsächliche mittlere Leistung. Die maximale Leistung ist bei einem unveränderten Kapazitätsangebot konstant.

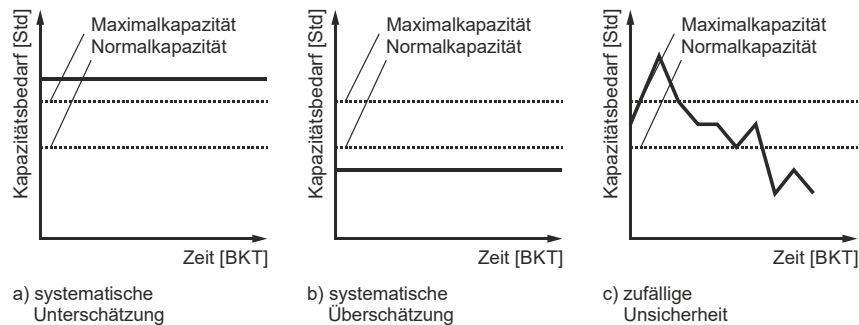


Abbildung 27: Kapazitätsbedarf für verschiedene Szenarien der Unsicherheit

Abbildung 28 zeigt die Bestandsentwicklung eines Arbeitssystems für die Szenarien systematische und zufällige Unsicherheit. Dazu ist jeweils der mittlere Bestand in Vorgabestunden für die Szenarien Überschätzung, Unterschätzung und Planung über die Zeit aufgetragen. Im Szenario „Überschätzung“ nimmt der mittlere Bestand im Vergleich zur Planung ab, weil das Arbeitssystem die Aufträge schneller abarbeiten kann als geplant (Abbildung 28a). Im Szenario „Unterschätzung“ nimmt der Bestand dagegen zu, weil der Ist-Abgang hinter dem Plan-Abgang zurückbleibt (Abbildung 28b). Im Szenario „Zufällige Unsicherheit“ schwankt der Ist-Bestand um den Plan-Bestand (Abbildung 28c).

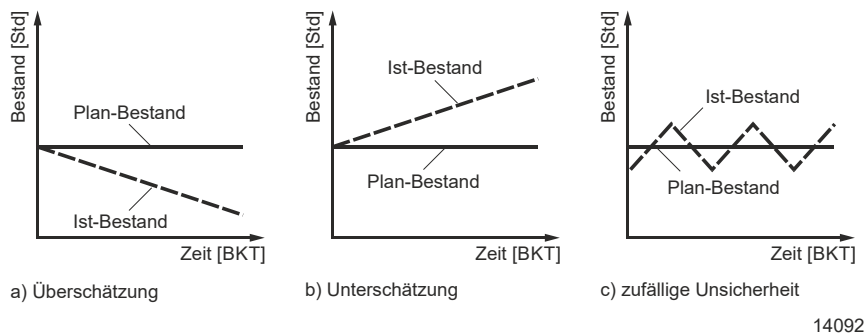


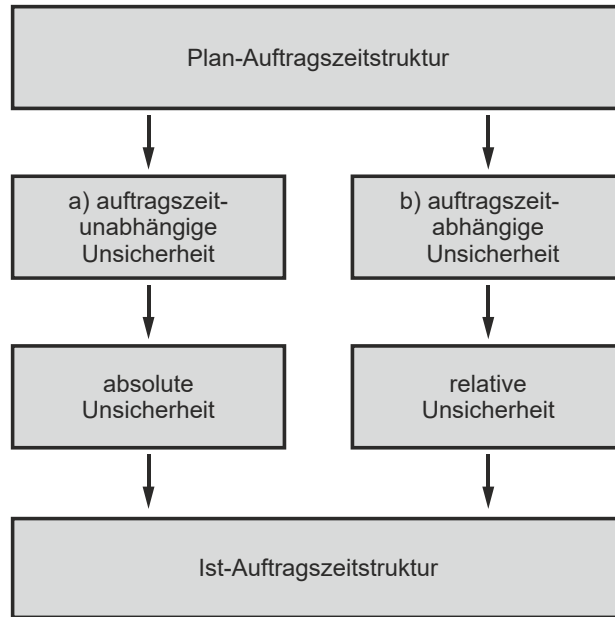
Abbildung 28: Bestandsentwicklung für verschiedene Szenarien der Unsicherheit

Zwei Erkenntnisse lassen sich daraus ableiten: Erstens sind die Kapazitätsbedarfsplanung bzw. die darauf aufbauende Kapazitätsbedarfsabstimmung an die Unsicherheit anzupassen. Zweitens nimmt ein Arbeitssystem aufgrund der Vernachlässigung von unsicheren Auftragszeiten in der Planung mindestens temporär einen instationären Zustand ein (siehe Abbildung 28a und b). Die Kennlinientheorie setzt jedoch einen stationären Zustand des Arbeitssystems voraus und kann daher unter diesen Bedingungen nur eingeschränkt genutzt werden. Um Produktionskennlinien dennoch für die Planung nutzen zu können, muss eine Möglichkeit geschaffen werden, die unsicheren Auftragszeiten so in der Auftragszeitstruktur abzubilden, dass sich kein instationärer Zustand einstellt.

### Modellierung der Auftragszeitstruktur bei unsicheren Auftragszeiten

Die Kenntnis der Auftragszeitstruktur ist für die logistische Positionierung eines Arbeitssystems von entscheidender Bedeutung (siehe Abschnitt 2.3.2). Die Auftragszeitstruktur leitet sich aus den zu fertigenden Aufträgen ab und kann als Verteilungsfunktion dargestellt werden. Unsichere Auftragszeiten verändern die mittlere Auftragszeit und/oder die Streuung der Auftragszeit und beeinflussen somit die tatsächliche Auftragszeitstruktur des Arbeitssystems. Die geplante und die tatsächliche Auftragszeitstruktur weichen voneinander ab. Infolgedessen verschiebt sich der ideale Mindestbestand (vgl. Formel 7) und damit der Verlauf der Kennlinien. Eine neue logistische Positionierung ist erforderlich. Die Herausforderung besteht darin, die tatsächliche Auftragszeitstruktur trotz unsicherer Auftragszeiten zumindest näherungsweise zu bestimmen. Hierfür soll eine Methode entwickelt werden.

Sowohl die Unsicherheit der Auftragszeit als auch die geplante Auftragszeitstruktur sind Zufallsvariablen (vgl. Abschnitt 2.3.1 und Unterkapitel 4.2) und können jeweils als Verteilungsfunktion modelliert werden. Die tatsächliche Auftragszeitstruktur ergibt sich aus den Ist-Auftragszeiten, welche sich aus den Plan-Auftragszeiten und der Unsicherheit ermitteln lassen. Der in dieser Arbeit entwickelte Lösungsansatz verknüpft die geplante Auftragszeitstruktur mit der (relativen) Unsicherheit der Auftragszeiten an diesem Arbeitssystem, um die tatsächliche Auftragszeitstruktur zu ermitteln. Vereinfachend wird zunächst die Annahme getroffen, dass alle Aufträge eines Arbeitssystems derselben Unsicherheit unterliegen. Die Ist-Auftragszeitstruktur lässt sich als Funktion der beiden Zufallsvariablen Plan-Auftragszeitstruktur und Unsicherheit darstellen. Für die auftragszeitunabhängige und die auftragszeitabhängige Unsicherheit ergeben sich verschiedene Berechnungsformeln für die Ist-Auftragszeitstruktur. Die beiden Varianten sind schematisch in Abbildung 29 abgebildet. Die entsprechenden Formeln werden im Anschluss detailliert erläutert.



14093

Abbildung 29: Schematische Berechnung der tatsächlichen Auftragszeitstruktur bei auftragszeitunabhängiger (a) und auftragszeitabhängiger (b) Unsicherheit

*Auftragszeitunabhängige Unsicherheit:* Die Ist-Auftragszeit setzt sich aus der Summe der Plan-Auftragszeit und der Unsicherheit zusammen. Unter der Annahme, dass die Plan-Auftragszeiten und die Unsicherheit unabhängige Zufallsvariablen sind, kann die Dichtefunktion der Ist-Auftragszeiten eines Arbeitssystems mittels Faltung der Dichtefunktionen der Plan-Auftragszeit und der Unsicherheit berechnet werden. Die mittlere Ist-Auftragszeit setzt sich aus der mittleren Plan-Auftragszeit und der mittleren Unsicherheit zusammen:

$$ZAU_{m,Ist} = ZAU_{m,Plan} + U_m \quad (21)$$

$ZAU_{m,Ist}$       mittlere Ist-Auftragszeit [Std]  
 $ZAU_{m,Plan}$      mittlere Plan-Auftragszeit [Std]  
 $U_m$              mittlere Unsicherheit [Std]

Für die Standardabweichung der Ist-Auftragszeit gilt:

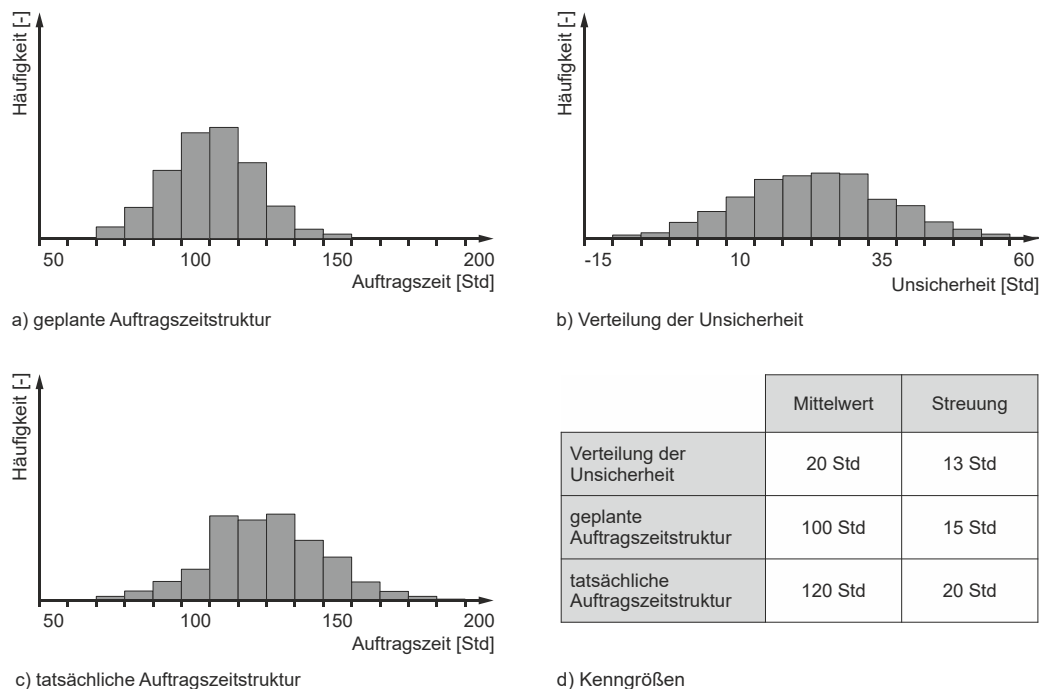
$$ZAU_{s,Ist} = \sqrt{ZAU_{s,Plan}^2 + U_s^2} \quad (22)$$

$ZAU_{s,Ist}$       Standardabweichung der Ist-Auftragszeit [Std]  
 $ZAU_{s,Plan}$      Standardabweichung der Plan-Auftragszeit [Std]  
 $U_s$              Standardabweichung der Unsicherheit [Std]

Allerdings können aus der Faltung negative Auftragszeiten entstehen. Um diese zu vermeiden, empfehlen sich zwei verschiedene Ansätze: Treten nur wenige negative Auftragszeiten auf, kann das Vorzeichen geändert werden. Der Mittelwert und die Standardabweichung der Ist-Auftragszeiten verschieben sich geringfügig. Sind jedoch aufgrund eines großen Wertebereichs der Unsicherheit zahlreiche negative Auftragszeiten zu erwarten, sollte die

Unsicherheit für einzelne Klassen von Plan-Auftragszeiten bestimmt werden, um negative Auftragszeiten zu vermeiden.

Die Zusammenhänge werden anhand eines Beispiels veranschaulicht. Die Plan-Auftragszeitstruktur hat eine mittlere Auftragszeit von 100 Stunden und eine Streuung der Auftragszeit von 15 Stunden. Weiterhin ist bekannt, dass eine auftragszeitunabhängige Unsicherheit mit einer systematischen und zufälligen Ausprägung vorliegt ( $U_E = 20$  Std und  $U_S = 13$  Std). Anhand der Formeln 21 und 22 lassen sich die Parameter der Ist-Auftragszeitstruktur berechnen. Die mittlere Ist-Auftragszeit ist gegenüber der mittleren Plan-Auftragszeit um 20 Stunden erhöht und beträgt 120 Stunden. Die Standardabweichung der Ist-Auftragszeit beträgt rund 20 Stunden. Die Histogramme der Plan- und Ist-Auftragszeitstruktur sowie das Histogramm der Unsicherheit und die Kenngrößen sind in Abbildung 30 dargestellt.



14094

Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung der Wirkung einer auftragszeitunabhängigen Unsicherheit auf die tatsächliche Auftragszeitstruktur

Eine systematische Unsicherheit verändert nur die mittlere Auftragszeit. Bei einer Überschätzung nimmt die mittlere Auftragszeit ab und bei einer systematischen Unterschätzung zu. Der Variationskoeffizient reagiert jeweils entgegengesetzt, da der Mittelwert im Nenner steht. Eine zufällige Unsicherheit (ohne systematische Unsicherheit) erhöht immer die Streuung der Auftragszeiten, sofern alle Aufträge von derselben Unsicherheit betroffen sind. Der Variationskoeffizient steigt, weil die Standardabweichung im Zähler steht. Sind die Aufträge eines Arbeitssystems von unterschiedlichen Ausprägungen der Unsicherheit betroffen, kann die Streuung der Auftragszeiten auch sinken. Eine systematische und zufällige Unsicherheit beeinflusst beide Parameter der Auftragszeitstruktur. Hier ist fallspezifisch zu prüfen, wie sich der Variationskoeffizient verändert. Die Veränderungen der Auftragszeitstruktur sind für unterschiedliche Ausprägungen der auftragszeitunabhängigen Unsicherheit in Tabelle 6 zusammengefasst. Diese Darstellung gilt für die Annahme, dass alle

Aufträge eines Arbeitssystems derselben Unsicherheit unterliegen. Die Art der Veränderung ist jeweils als Symbol dargestellt. Eine Zu- bzw. Abnahme ist mit einem Plus- oder Minuszeichen dargestellt. Ein Kreis symbolisiert keine Veränderung und bei dem Eintrag k. A. ist keine pauschale Aussage möglich.

Tabelle 6: Wirkung einer auftragszeitunabhängigen Unsicherheit auf die Auftragszeitstruktur

Szenario	U	ZAU <sub>m</sub>	ZAU <sub>s</sub>	ZAU <sub>v</sub>
Systematisch unterschätzt	U <sub>m</sub> > 0 U <sub>s</sub> = 0	+	o	-
Systematisch überschätzt	U <sub>m</sub> < 0 U <sub>s</sub> = 0	-	o	+
Zufällig	U <sub>m</sub> = 0 U <sub>s</sub> > 0	o	+	+
Systematisch unterschätzt & zufällig	U <sub>m</sub> > 0 U <sub>s</sub> > 0	+	+	k. A.
Systematisch überschätzt & zufällig	U <sub>m</sub> < 0 U <sub>s</sub> > 0	-	+	k. A.

*Auftragszeitabhängige Unsicherheit:* Unter der Prämisse, dass die Auftragszeiten am Arbeitssystem einer auftragszeitabhängigen Unsicherheit unterliegen, kann die Ist-Auftragszeitstruktur nicht mittels Faltung ermittelt werden, da die Plan-Auftragszeitstruktur und die Unsicherheit nicht voneinander unabhängig sind. Allerdings sind die relative Unsicherheit und die Plan-Auftragszeitstruktur unabhängige Zufallsvariablen. Durch Umformulieren von Formel 11, kann die Ist-Auftragszeit als Produkt aus relativer Unsicherheit zzgl. 100 % und Plan-Auftragszeit dargestellt werden. Hierdurch ist es möglich, die Formeln für das Produkt zweier unabhängiger Zufallszahlen zu nutzen (vgl. [Benj14]), um die tatsächliche Auftragszeitstruktur zu berechnen. Dazu müssen die Verteilungsparameter der geplanten Auftragszeitstruktur und der relativen Unsicherheit bekannt sein. Die Formel zur Berechnung der mittleren Ist-Auftragszeit lautet:

$$ZAU_{m,Ist} = ZAU_{m,Plan} \cdot (1 + U_{r,m}) \quad (23)$$

ZAU<sub>m,Ist</sub>      mittlere Ist-Auftragszeit [Std]  
 ZAU<sub>m,Plan</sub>    mittlere Plan-Auftragszeit [Std]  
 U<sub>r,m</sub>          mittlere relative Unsicherheit [-]

Die Standardabweichung der Ist-Auftragszeit berechnet sich nach:

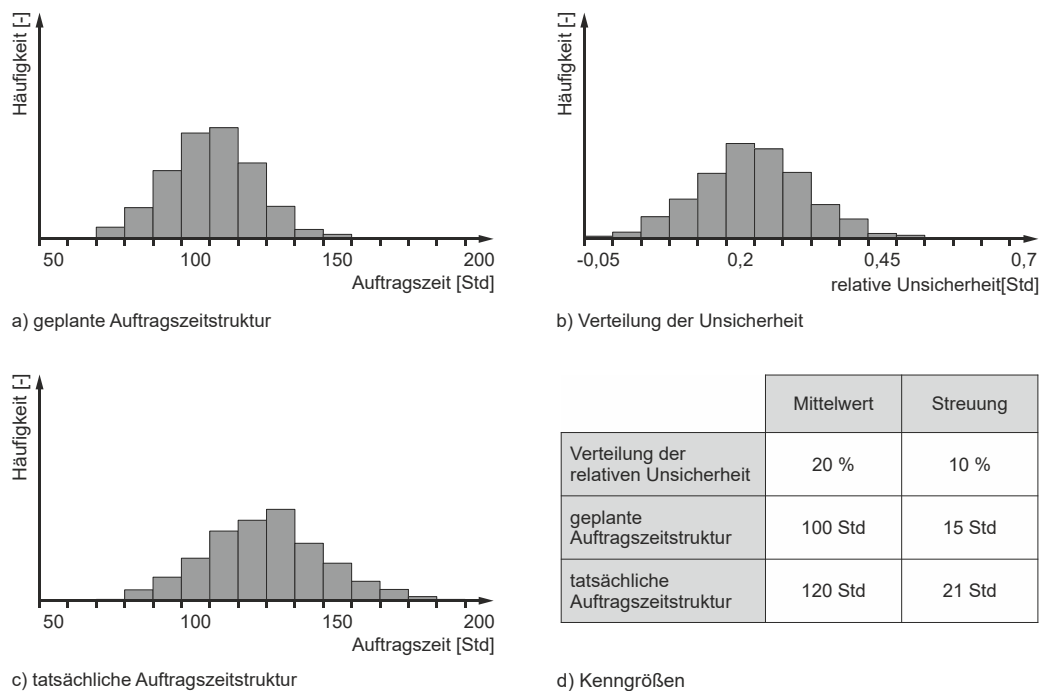
$$ZAU_{s,Ist} = \sqrt{ZAU_{s,Plan}^2 \cdot U_{r,s}^2 + ZAU_{s,Plan}^2 \cdot (1 + U_{r,m})^2 + U_{r,s}^2 \cdot ZAU_{m,Plan}^2} \quad (24)$$

ZAU<sub>s,Ist</sub>      Standardabweichung der Ist-Auftragszeit [Std]  
 ZAU<sub>s,Plan</sub>    Standardabweichung der Plan-Auftragszeit [Std]  
 U<sub>r,s</sub>          Standardabweichung der relativen Unsicherheit [-]  
 U<sub>r,m</sub>          mittlere relative Unsicherheit [-]

Der erste Term bildet die Veränderung der geplanten Standardabweichung durch zufällige Unsicherheit ab. Der zweite Term bildet die Veränderung der geplanten Standardabwei-

chung durch die systematische Unsicherheit ab. Der dritte Term berücksichtigt die Veränderung der Standardabweichung aus der zufälligen Unsicherheit und der mittleren Plan-Auftragszeit.

Beispielhaft wird das Vorgehen dargestellt. Laut Plan beträgt die mittlere Auftragszeit 100 Stunden und die Streuung der Auftragszeiten 15 Stunden. Die mittlere relative Unsicherheit beläuft sich auf 20 % und die Standardabweichung der Unsicherheit ist 10 %. Die tatsächliche mittlere Auftragszeit umfasst 120 Stunden (vgl. Formel 23). Die Streuung der Auftragszeit nimmt um 6 Stunden zu und beträgt 21 Stunden (vgl. Formel 24). Die Histogramme der Plan- und Ist-Auftragszeitstruktur sowie das Histogramm der Unsicherheit und die Kenngrößen sind in Abbildung 31 dargestellt.



14095

Abbildung 31: Beispielhafte Darstellung der Wirkung einer auftragszeitabhängigen Unsicherheit auf die tatsächliche Auftragszeitstruktur

Bei einer systematischen relativen Unsicherheit sind sowohl die mittlere Auftragszeit als auch die Standardabweichung der Auftragszeit um den Faktor der relativen Unsicherheit vergrößert bzw. vermindert. Die Verteilungsfunktion ist gestreckt bzw. gestaucht. Der Variationskoeffizient ist konstant. Bei einer zufälligen relativen Unsicherheit weist die mittlere Auftragszeit keine Änderung auf, während die Standardabweichung der Auftragszeiten zunimmt. Liegt eine systematische und zufällige relative Unsicherheit vor, ist die mittlere Auftragszeit proportional zum Erwartungswert der relativen Unsicherheit. Die Streuung der Auftragszeit nimmt fallspezifisch zu oder ab. Die Veränderungen der Auftragszeitstruktur sind für die unterschiedlichen Ausprägungen der auftragszeitabhängigen Unsicherheit in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Wirkung einer auftragszeitabhängigen Unsicherheit auf die Auftragszeitstruktur

Szenario	$U_r$	$ZAU_m$	$ZAU_s$	$ZAU_v$
Systematisch unterschätzt	$U_{r,m} > 0$ $U_{r,s} = 0$	+	+	o
Systematisch überschätzt	$U_{r,m} < 0$ $U_{r,s} = 0$	-	-	o
Zufällig	$U_{r,m} = 0$ $U_{r,s} > 0$	o	+	+
Systematisch unterschätzt & zufällig	$U_{r,m} > 0$ $U_{r,s} > 0$	+	+	k. A.
Systematisch überschätzt & zufällig	$U_{r,m} < 0$ $U_{r,s} > 0$	-	+	k. A.

### Berechnung der Auftragszeitstruktur bei Klassen von Unsicherheit

Häufig sind nicht alle Aufträge in gleichem Umfang von der Unsicherheit betroffen, sondern einzelne Klassen von Aufträgen weisen vorhersehbar eine bestimmte Ausprägung der Unsicherheit auf. In diesem Fall setzt sich die tatsächliche Auftragszeitstruktur aller Aufträge aus den Auftragszeitstrukturen der einzelnen Klassen zusammen. Um die Kenngrößen mittlere Auftragszeit und Standardabweichung der Auftragszeit zu berechnen, sind je Klasse die folgenden Parameter zu bestimmen: die mittlere Auftragszeit, die Standardabweichung der Auftragszeit und der Anteil der Aufträge der Klasse an der Gesamtanzahl an Aufträgen. In Anlehnung an Eckstein berechnen sich die mittlere Auftragszeit und die Standardabweichung der Auftragszeit wie folgt [Ecks14]: Die mittlere Auftragszeit errechnet sich aus der Summe der gewichteten mittleren Auftragszeiten je Klasse. Die Gewichte entsprechen den Anteilen der Aufträge der Klasse an der Gesamtanzahl an Aufträgen:

$$ZAU_m = \sum_{i=1}^n (ZAU_m^i \times p_i) \quad (25)$$

$ZAU_m$             mittlere Auftragszeit [Std]  
 $ZAU_m^i$         mittlere Auftragszeit der Aufträge der Klasse  $i$  [Std]  
 $p_i$               Anteil der Aufträge der Klasse  $i$  an der Gesamtanzahl an Aufträgen [%]

Die Standardabweichung der Auftragszeit berechnet sich zu:

$$ZAU_s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (ZAU_m^i - ZAU_m)^2 \times p_i + \sum_{i=1}^n (ZAU_s^i)^2 \times p_i} \quad (26)$$

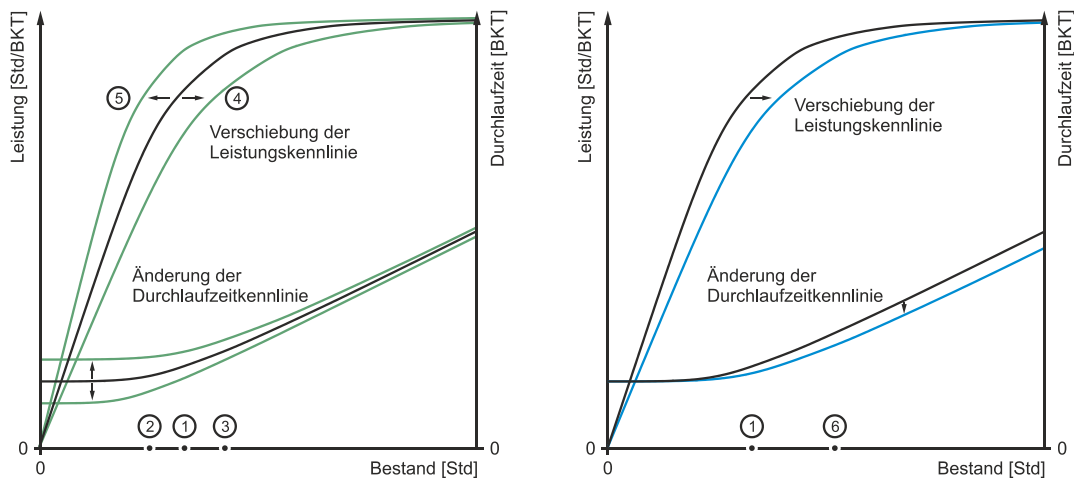
$ZAU_s$             Standardabweichung der Auftragszeit [Std]  
 $ZAU_m^i$         mittlere Auftragszeit der Aufträge der Klasse  $i$  [Std]  
 $ZAU_m$         mittlere Auftragszeit [Std]  
 $p_i$               Anteil der Aufträge der Klasse  $i$  an der Gesamtanzahl an Aufträgen [%]  
 $ZAU_s^i$         Standardabweichung der Auftragszeit der Aufträge der Klasse  $i$  [Std]

Die Terme unter der Wurzel sind die innere und äußere Varianz. Der erste Term ist ein Maß für die Unterschiede zwischen den Klassen (äußere Varianz). Der zweite Term ist ein Maß für die Streuung in den Klassen (innere Varianz).

### Auswirkung der unsicheren Auftragszeitstruktur auf die Produktionskennlinien

Unsichere Auftragszeiten beeinflussen die Auftragszeitstruktur, die ihrerseits maßgeblich den Verlauf der Produktionskennlinien bestimmt. Dieser Abschnitt erklärt die Auswirkungen der unterschiedlichen Ausprägungen unsicherer Auftragszeiten auf den Verlauf der Produktionskennlinien. Die Effekte sind in Abbildung 32 abgebildet.

Eine systematische Unsicherheit verursacht eine Abweichung zwischen der geplanten und der tatsächlichen mittleren Auftragszeit. Eine Überschätzung bzw. Unterschätzung der Auftragszeiten vermindert bzw. erhöht den idealen Mindestbestand (Punkte 2 und 3 in Abbildung 32) gegenüber dem ursprünglich geplanten Wert (Punkt 1 in Abbildung 32), da er proportional zur mittleren Auftragszeit ist (vgl. Formel 7). Dadurch ändert sich auch die Steigung der Leistungskennlinie im Unterlastbereich (Punkte 4 und 5). Ein erhöhter idealer Mindestbestand führt zu einer geringeren Steigung der Leistungskennlinie, entsprechend erhöht sich die Steigung der Leistungskennlinie bei einem verminderten idealen Mindestbestand. Bei einer Überschätzung der Auftragszeiten ist der tatsächliche ideale Mindestbestand kleiner als der geplante ideale Mindestbestand, sodass sich die Leistung bei einem bestimmten Bestandswert erhöht und die tatsächliche mittlere Durchlaufzeit kleiner ist als mit Plan-Auftragszeiten prognostiziert. Bei einer Unterschätzung der Auftragszeiten ist der tatsächliche ideale Mindestbestand größer als der geplante ideale Mindestbestand, sodass entsprechend auch die mittlere Durchlaufzeit unterschätzt wird. Die Grenzen zwischen dem Unterlast-, Übergangs- und Überlastbereich verschieben sich.



a) Geänderter Verlauf der Produktionskennlinien bei systematischer Unsicherheit

b) Geänderter Verlauf der Produktionskennlinien bei zufälliger Unsicherheit

	mittlere Durchlaufzeit	mittlere Leistung
systematische Überschätzung	sinkt	steigt
systematische Unterschätzung	steigt	sinkt
zufällige Unsicherheit	referenz-abhängig	sinkt

- : Szenario keine Unsicherheit
- : Szenario systematische Unsicherheit
- : Szenario zufällige Unsicherheit

c) Veränderung der logistischen Zielgrößen infolge der Unsicherheit gegenüber der Planung

Abbildung 32: Exemplarische Veränderung der Produktionskennlinien durch Unsicherheit

Eine zufällige Unsicherheit erhöht die Streuung der Auftragszeiten, sodass der tatsächliche ideale Mindestbestand größer ist als geplant (Punkt 6 in Abbildung 32). Folglich sinkt die Steigung der Leistungskennlinie. Die Interpretation der Durchlaufzeitkennlinie ist etwas komplexer: Sie ist abhängig von der gewählten Referenzgröße. Für ein vergleichbares Bestandsniveau verläuft die Durchlaufzeitkennlinie ab dem Übergangsbereich unterhalb des geplanten Verlaufs. Allerdings ist für eine vergleichbare Leistung ein höheres Bestandsniveau erforderlich, sodass die mittlere Durchlaufzeit im Ergebnis trotzdem leicht steigt. Liegt gleichzeitig eine zufällige und systematische Unsicherheit vor, ist individuell zu prüfen, ob der ideale Mindestbestand gegenüber der Planung zu- oder abnimmt.

### **4.4 Zwischenfazit**

In diesem Kapitel wurden zunächst Anforderungen an die Modellierung von unsicheren Auftragszeiten formuliert. Danach wurden Merkmale und Ursachen unsicherer Auftragszeiten erläutert. Auf Grundlage der Merkmale wurden Klassen und Szenarien der Unsicherheit abgeleitet. Die Wirkung unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen ist qualitativ beschrieben. Die entwickelte Modellierung ermöglicht es, trotz unsicherer Auftragszeiten die logistischen Kenngrößen eines Auftrags oder eines Arbeitssystems zu berechnen. Auf diesem Wege ermittelte Plan-Parameter sind zuverlässiger. Die vorgeschlagene Modellierung erfüllt die Anforderungen aus Unterkapitel 4.1. Um die Modellierung während der Planung nutzen zu können, sind quantifizierte Unsicherheiten als Eingangsgröße für die Berechnung der Kennlinien erforderlich. Weiterhin besteht der Bedarf, die Ergebnisse der Modellierung in ein Hilfsmittel zu überführen, sodass der Anwender konkrete Maßnahmen bestimmen kann.

## 5 Analyse von unsicheren Auftragszeiten

Obwohl die logistischen Zielgrößen nun auch bei unsicheren Auftragszeiten modelliert werden können, sind die Herausforderungen der Planung aufgrund von unsicheren Auftragszeiten noch nicht gelöst. Es fehlen Handlungsempfehlungen, Methoden und Hilfsmittel, um beispielsweise die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten zu ermitteln und eine Empfehlung treffen zu können, wann welche Maßnahme zu ergreifen ist.

Aus diesem Grund gilt es, ein Vorgehen zu entwickeln, das den Anwender unterstützt, unsichere Auftragszeiten in der Planung zielgerichtet und aufwandsarm zu analysieren. Die entwickelte Analyse umfasst vier Phasen, die detailliert in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert werden. Sie baut auf den Ergebnissen des vorherigen Kapitels auf und verknüpft diese miteinander. Unterkapitel 5.1 vermittelt einen Überblick über die Phasen der Analyse. Die Analyse von unsicheren Auftragszeiten untergliedert sich in diese vier Phasen: *Identifizieren unsicherer Auftragszeiten*, *Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten*, *Bewerten unsicherer Auftragszeiten* und *Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten*. Die Unterkapitel 5.2, 5.3, 5.4 und 5.5 erläutern jeweils detailliert eine der vier Phasen. Das Kapitel endet mit einem Zwischenfazit.

### 5.1 Überblick

Das Ziel der Analyse von unsicheren Auftragszeiten ist, im Planungsprozess Transparenz über die Unsicherheit zu erzeugen und dann die Unsicherheit in der Planung zu berücksichtigen. Die Kenntnis über das Auftragspektrum bildet die Grundlage für Entscheidungen im Planungsprozess, um angemessen auf unsichere Auftragszeiten zu reagieren. Die Analyse von unsicheren Auftragszeiten muss gewisse Anforderungen erfüllen (vgl. Unterkapitel 4.1).

Um unsichere Auftragszeiten in der Planung berücksichtigen zu können, ist die Kenntnis über die Unsicherheit unerlässlich. Hierzu sind zunächst Aufträge bzw. einzelne Arbeitspakete oder Arbeitsvorgänge mit unsicheren Auftragszeiten vollständig zu identifizieren. Die erste Phase „*Identifizieren unsicherer Auftragszeiten*“ bildet daher den Startpunkt der Analyse. Um die Komplexität und den Aufwand der Analyse zu minimieren, sind nur von Unsicherheit betroffene Arbeitssysteme zu identifizieren. Die Arbeitssysteme einer Produktion unterliegen unterschiedlichen Restriktionen. Diese beeinflussen die Fähigkeit, auf unsichere Auftragszeiten reagieren zu können. Daher gilt es, frühestmöglich betroffene Arbeitssysteme zu identifizieren. Darüber hinaus lassen sich aus dem Auftreten von unsicheren Auftragszeiten Rückschlüsse auf die Ursachen der Informationsdefizite im Planungsprozess schließen, die ihrerseits maßgeblich die Menge an potenziellen Maßnahmen einschränken. Die erste Phase der Analyse beantwortet drei relevante Fragen:

- Welche Aufträge sind unsicher?
- Welche Arbeitssysteme sind betroffen?
- Was sind die Ursachen für die Unsicherheit?

Unmittelbar auf die erste Phase folgt die zweite Phase „*Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten*“. Um die potenziellen Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten zuverlässig bestimmen zu können, bedarf es einer realitätsnahen Modellierung der unsicheren Auftragszeiten. Hierfür ist es erforderlich, die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten zu quantifizieren.

Je nachdem, ob alle oder nur einige Aufträge mit Unsicherheit behaftet sind, ergeben sich unterschiedliche Anforderungen, um die reale Auftragszeitstruktur näherungsweise zu berechnen. Zudem ergeben sich in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Planungsprozesses unterschiedliche Anforderungen, wie die Ausprägung zu bestimmen ist. Weil die Auswirkungen sowohl aus Auftrags- als auch aus Arbeitssystem-sicht zu betrachten sind, ist die Ausprägung der Unsicherheit sowohl für einzelne Aufträge als auch für das Arbeitssystem zu erfassen. Auf Grundlage der Ausprägung ist dann die Art und die Klasse der Unsicherheit zu ermitteln. Anhand der Klasse der Unsicherheit kann die Qualität der Arbeitsplanung bewertet werden. Die zweite Phase der Analyse liefert dem Anwender Antworten auf folgende Fragen:

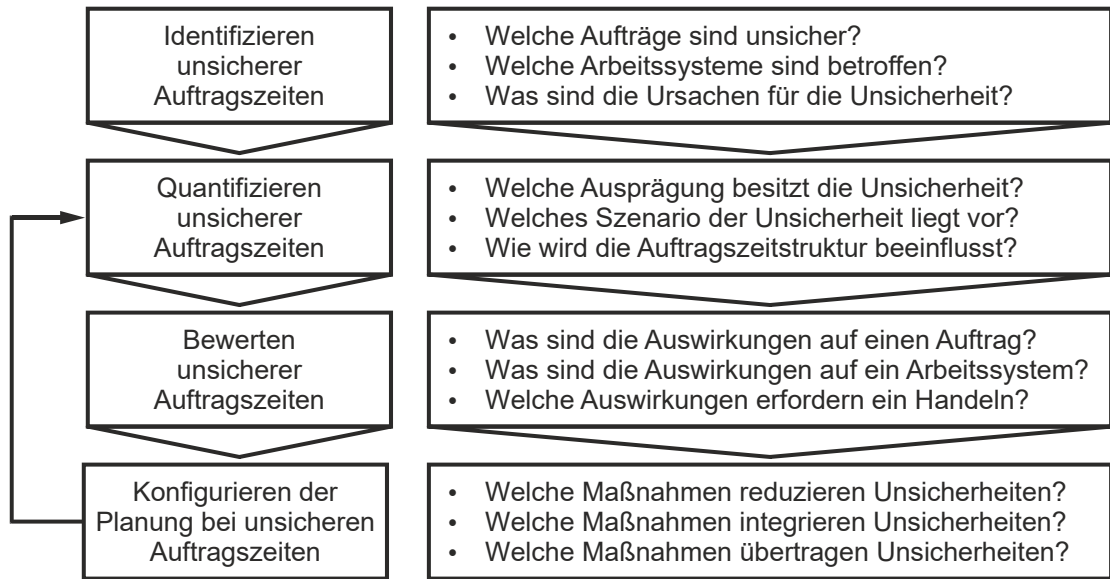
- Welche Ausprägung besitzt die Unsicherheit?
- Welches Szenario liegt vor?
- Wie sieht die reale Auftragszeitstruktur aus?

In der dritten Phase „*Bewerten unsicherer Auftragszeiten*“ gilt es, den konkreten Handlungsbedarf in der Produktionsplanung zu identifizieren, da nicht jede unsichere Auftragszeit die logistische Zielerreichung gefährdet. Vor dem Hintergrund limitierter Ressourcen sind die Maßnahmen sorgfältig und zielgerichtet zu ergreifen. Weiterhin muss der Anwender stets in der Lage sein, die logistische Zielerreichung zu überblicken. Andernfalls bestünde das Risiko, einzelne Zielgrößen zu vernachlässigen und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit zu vermindern. Als objektive Entscheidungsgrundlage dienen die logistischen Zielgrößen. Deshalb sind die Auswirkungen der unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen aus Auftrags- und Arbeitssystem-sicht zu ermitteln. Der Abgleich zwischen der geplanten logistischen Zielerreichung und der realen logistischen Zielerreichung unter Berücksichtigung der Unsicherheit zeigt die erforderlichen Handlungsfelder auf. Folgende Fragestellungen sind in dieser Phase zu beantworten:

- Was sind die Auswirkungen auf die Aufträge?
- Was sind die Auswirkungen auf die Arbeitssysteme?
- Wo besteht Handlungsbedarf?

In der vierten Phase „*Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten*“ gilt es nun, dem zuvor in der dritten Phase identifizierten Handlungsbedarf zu begegnen. Grundsätzlich stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, um unsicheren Auftragszeiten in der Planung der Unikatproduktion zu berücksichtigen. Die Maßnahmen nutzen unterschiedliche Wirkmechanismen und unterliegen verschiedenen Restriktionen. Diese Charakteristika gilt es herauszuarbeiten, damit der Anwender die Maßnahmen später zielgerichtet einsetzen kann. Nach Abschluss dieser letzten Phase steht für einen Anwendungsfall fest, welche Arten von Maßnahmen zu ergreifen sind, welchen Umfang die Maßnahmen haben und welche Auswirkungen die Maßnahmen auf die logistische Zielerreichung haben. Ein iteratives Vorgehen der Phasen II-IV Quantifizieren, Bewerten und Integrieren stellt sicher, dass die Produktionsplanung erst abgeschlossen ist, wenn die logistische Zielerreichung trotz unsicherer Auftragszeiten gewährleistet ist.

Die Phasen und die angeführten Fragen sind in Abbildung 33 zusammengefasst.



14100.1

Abbildung 33: Vier Phasen der Analyse von unsicheren Auftragszeiten

### 5.2 Identifizieren unsicherer Auftragszeiten

Die erste Phase unterstützt den Anwender, Aufträge mit unsicheren Auftragszeiten in der Menge an Aufträgen möglichst korrekt und zuverlässig zu erkennen. Erst die Kenntnis über die unsicheren Aufträge ermöglicht einen zielgerichteten Eingriff in die Produktionsplanung, um die logistische Zielerreichung trotz Unsicherheit zu gewährleisten. Diese Phase gliedert sich in die drei Schritte: *Arbeitssystem- und Auftragsdaten sammeln*, *Planungsprozesse analysieren* sowie *Unsichere Auftragszeiten und ihre Ursachen erkennen* (siehe Abbildung 34).

Identifizieren unsicherer Auftragszeiten		
1. Arbeitssystem- und Auftragsdaten sammeln	2. Planungsprozess analysieren	3. Unsichere Auftragszeiten und deren Ursachen erkennen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeitssystem auswählen</li> <li>• Betrachtungszeitraum auswählen</li> <li>• Aufträge und Auftragszeiten erfassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eingangsinformationen erfassen</li> <li>• Informationsverarbeitung erfassen</li> <li>• Hilfsmittel erfassen</li> <li>• Prozessbeteiligte erfassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informationsdefizite je Auftrag erfassen</li> <li>• Unsichere Auftragszeiten dokumentieren</li> </ul>

14101

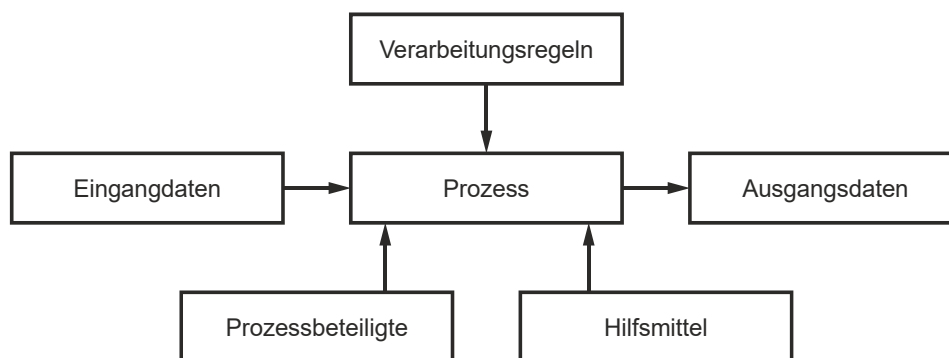
Abbildung 34: Inhalte der Phase „Identifizieren unsicherer Auftragszeiten“

Das Verfahren soll möglichst unsichere Auftragszeiten korrekt und zuverlässig identifizieren. Das bedeutet, einerseits sind alle unsicheren Auftragszeiten zu erkennen und andererseits sind sichere Auftragszeiten nicht fälschlicherweise als unsicher zu identifizieren. Zudem ist der Prozessschritt der Arbeitsplanung zu analysieren. Außerdem sind die Ursachen

der unsicheren Auftragszeiten zu ermitteln, da die Art bzw. der Ursprung der Informationsdefizite maßgeblich bestimmen, ob die Unsicherheit beseitigt werden kann. Die potenziellen Maßnahmen zur Handhabung der Unsicherheit werden festgelegt.

Im ersten Schritt „*Arbeitssystem- und Auftragsdaten sammeln*“ sind zunächst von Unsicherheit betroffene Arbeitssysteme auszuwählen. Hierzu empfiehlt sich zur Aufwandsminimierung der Austausch mit den Akteuren der Planungsprozesse. Diese kennen meist die Planungs- und Produktionsprozesse bzw. die Auftragsbestandteile und können abschätzen, welche Auftragszeiten mit Unsicherheit behaftet sind. Sofern diese Option nicht zur Verfügung steht, sind sämtliche Arbeitssysteme zu betrachten. Danach ist der Untersuchungszeitraum festzulegen, um die Menge der zu analysierenden Aufträge einzugrenzen. Steht der Untersuchungszeitraum fest, sind zum Abschluss alle Aufträge und deren geplante Auftragszeiten zu erfassen, die an dem ausgewählten Arbeitssystem in dem Untersuchungszeitraum bearbeitet werden sollen. Diese Informationen sind aus Dokumenten (Arbeits-, Termin- und Kapazitätsplänen) oder aus Software (ERP-System bzw. Excel) zu entnehmen.

Im zweiten Schritt „*Planungsprozess analysieren*“ ist die Arbeitsplanung und insbesondere die Vorgabezeitermittlung für das gewählte Arbeitssystem einer detaillierten Analyse zu unterziehen. Ziel ist es, Quellen unvollständiger Informationen im Planungsprozess zu erkennen, da diese Auslöser für unsichere Auftragszeiten sind (vgl. Abschnitt 2.1.2). Zunächst ist die Frage zu klären, welche Bestandteile des Planungsprozesses unsichere Auftragszeiten verursachen können. In Anlehnung an Davids Prozesskriterien wurden die Eingangsdaten, die Prozessbeteiligten, die Verarbeitungsregeln sowie die Werkzeuge als mögliche Quellen von unsicheren Auftragszeiten identifiziert (siehe Abbildung 35) [Davi08]. Diese lassen sich in die zwei Kategorien Input und Transformation unterscheiden. Die Eingangsdaten werden der Kategorie Input zugeordnet, während die drei anderen Quellen Prozessbeteiligte, Verarbeitungsregeln sowie Werkzeuge der Kategorie Transformation zugeordnet werden, da diese bei der Verarbeitung der Eingangsdaten zu Ausgangsdaten ihre Wirkung entfalten.



14102

Abbildung 35: Prozessdarstellung in Anlehnung an [Davi08]

Es gilt im Einzelfall zu prüfen, welche der vier Prozesskriterien unsichere Auftragszeiten verursachen. Folgende Fragen eignen sich, um den Planungsprozess aufzunehmen und hinsichtlich unsicherer Auftragszeiten zu analysieren:

- Welche Eingangsinformationen werden benötigt?

- Welche Eingangsinformationen stehen zur Verfügung?
- Woher kommen diese Informationen?
- Wie werden die Eingangsinformationen verarbeitet?
- Wer ist an der Planung beteiligt?

Je nach eingesetztem Verfahren zur Ermittlung der Auftragszeiten variieren die möglichen Quellen für eine geringe Datenqualität der Ausgangsdaten. Die Verfahren unterscheiden sich in ihrem Informationsbedarf. Erfahrungsbasierte Schätzverfahren und Berechnungsverfahren werden beispielhaft analysiert, um mögliche Ausprägungen der Quellen zu veranschaulichen. Erfahrungsbasierte Schätzverfahren benötigen nur wenige Informationen mit einem geringen Detaillierungsgrad. Allerdings beeinflusst die Erfahrung des Experten maßgeblich die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten. Verarbeitungsregeln und Hilfsmittel sind weniger relevant. Hingegen sind für Berechnungsverfahren zum Teil zahlreiche, sehr detaillierte Informationen erforderlich. Beispielsweise werden Konstruktionsdaten, Montagereihenfolgen und Prozessparameter benötigt, um die Auftragszeiten zu berechnen. Hier ist die Qualität der Eingangsdaten häufig der limitierende Faktor für die erreichbare Qualität der Planungsergebnisse. Ebenfalls von Bedeutung sind hier korrekte Verarbeitungsregeln, um falschen Berechnungsergebnissen vorzubeugen. Die Prozessbeteiligten und Hilfsmittel nehmen bei diesen Verfahren dagegen meist eine untergeordnete Rolle ein. Die Eingangsdaten sind die zentrale Einflussgröße auf die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten. Je präziser das zu produzierende Unikat spezifiziert ist, desto höher ist die Informationsverfügbarkeit.

Den Abschluss der ersten Phase bildet der Schritt „*Unsichere Auftragszeiten und deren Ursachen erkennen*“. Nachdem der Planungsprozess allgemein analysiert wurde, sind die unsicheren Auftragszeiten zu identifizieren und zu dokumentieren. Dazu ist das Informationsdefizit vorrangig für das Arbeitssystem bzw. für bestimmte Auftragsklassen anhand der vier Prozesskriterien zu beurteilen, um den Aufwand gering zu halten. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Datenqualität der Eingangsinformationen je Auftragsklasse. Es ist festzulegen, ob die Eingangsinformationen sicher, teils unsicher oder unsicher sind. Diese Daten werden in einer Liste dokumentiert (siehe Tabelle 8). Diese Liste enthält als Pflichtfelder das Arbeitssystem, die Auftragsklasse, die Plan-Auftragszeit und das Informationsdefizit. Optional können weitere Meta-Informationen hinzugefügt werden, wie beispielsweise ein Projektbezug.

Ergebnis dieser ersten Phase ist Transparenz über unsichere Auftragszeiten und ihre Ursachen für das untersuchte Arbeitssystem in dem gewählten Zeitraum. Dieses Vorgehen kann für jedes Arbeitssystem des zu untersuchenden Produktionssystems wiederholt werden. Hiermit ist die Grundlage geschaffen, um im Nachgang die Höhe der Unsicherheit zu bestimmen.

Tabelle 8: Exemplarische Darstellung der Liste unsicherer Auftragszeiten

Arbeits-system	Auftrags-klasse	Plan-Auftrags-zeit	Informa-tions-defizit	Ausprä-gung des Informati-onsdefizits	Meta-Informationen
2	A	100 Std	Inputdaten	sicher	Projekt 1
2	B	50 Std	Inputdaten	unsicher	Projekt 2

### 5.3 Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten

Quantifizierte unsichere Auftragszeiten sind Voraussetzung, um die möglichen Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen zu bestimmen. In dieser Phase werden die Ausprägungen der einzelnen unsicheren Auftragszeiten und deren Auswirkung auf die Auftragszeitstruktur erfasst. Diese Phase ist in zwei Schritte untergliedert: Zunächst sind die Ausprägungen der unsicheren Auftragszeiten zu bestimmen (Auftragssicht). Dafür sind der Verteilungstyp sowie die Lage- und Streuparameter anzugeben. Dann ist die Auftragszeitstruktur zu ermitteln (Arbeitssystem Sicht). Abbildung 36 zeigt die Phase *Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten* inklusive der beiden Schritte. In diesem Unterkapitel werden verschiedene Ansätze vorgestellt.

Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten			
Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten ermitteln		Ist-Auftragszeitstruktur ermitteln	
Aufträge Klassen zuordnen		Monte-Carlo-Simulation	Vereinfachte Berechnung
Einsatz von Erfahrungswerten	Einsatz von Rückmeldedaten		

14103

Abbildung 36: Inhalte der Phase „Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten“

#### 5.3.1 Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten quantifizieren

Ziel des ersten Schritts ist es, für alle unsicheren Aufträge die Ausprägung der Unsicherheit zu ermitteln. Hierfür sind der Erwartungswert und die Standardabweichung anzugeben (vgl. Unterkapitel 4.2). Gegebenenfalls kann der Auftrag einer bestehenden Klasse von unsicheren Auftragszeiten zugeordnet werden. Die Herausforderung besteht darin, ein Verfahren einzusetzen, das die Ausprägung der Unsicherheit möglichst zuverlässig und präzise erfasst sowie zugleich eine Pseudogenauigkeit vermeidet. Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass zwei verschiedene Verfahren eingesetzt werden können, um unsichere Auftragszeiten in der Planung zu quantifizieren. Diese nutzen entweder Rückmeldedaten oder Erfahrungswissen. Daneben kommt in der Praxis auch eine Kombination der beiden Verfahren zum Einsatz. Häufig setzt sich ein Auftrag aus mehreren Teilaufträgen zusammen. Einzelne Teilaufträge sind standardisierte Baugruppen, die bereits in der Vergangenheit produziert wurden. Für diese Teilaufträge kann der Kapazitätsbedarf zuverlässig aus den Rückmeldedaten bestimmt werden, wenn die tatsächlichen Auftragszeiten gemessen und dokumentiert sind. Wiederum andere Teilaufträge sind Neuentwicklungen. Es liegen keine Rückmeldedaten vor und der Kapazitätsbedarf (Auftragszeit) ist durch einen erfahrenen Planer zu bestimmen. Metadaten der Aufträge dienen bei beiden Vorgehensweisen als Referenzdaten, um die Ausprägung der Unsicherheit zu bestimmen.

#### Aufträge klassifizieren

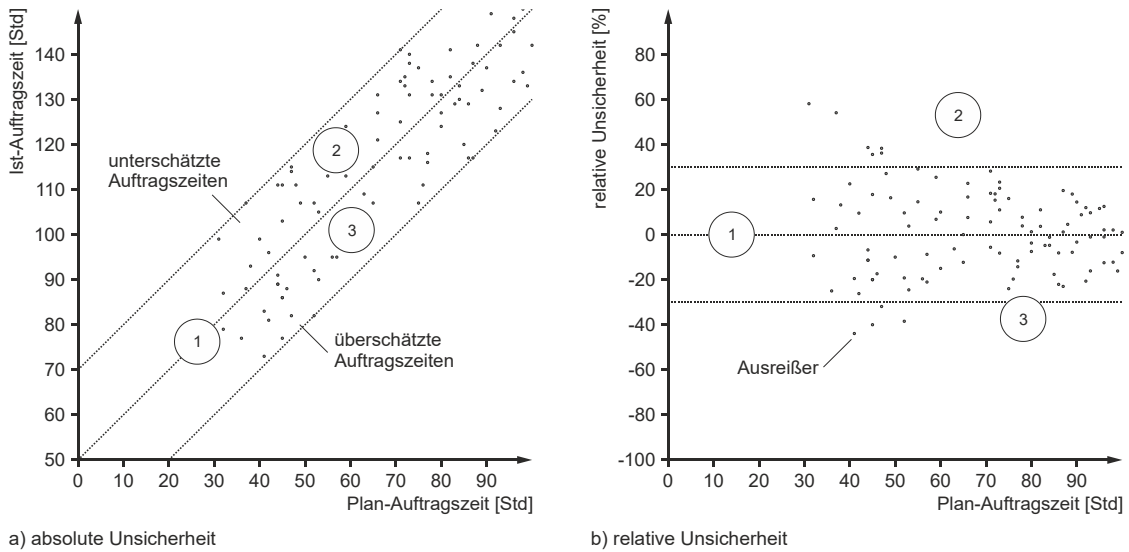
Trotz des Unikatcharakters ist häufig ein gewisses Maß an Vergleichbarkeit zwischen vergangenen und zukünftigen Aufträgen gegeben, da identische Produktions- und Planungsprozesse in der Auftragsabwicklung zum Einsatz kommen. In der Regel sind die Aufträge

auch nicht gleichermaßen mit Unsicherheit behaftet. Beispielsweise gibt es auch in der Unikatproduktion vereinzelt standardisierte Baugruppen, die in unterschiedlichen Unikaten zum Einsatz kommen. Aufgrund der hohen Informationsqualität erzeugt die Arbeitsplanung für diese Standardaufträge häufig Auftragszeiten ohne oder mit nur sehr geringer Unsicherheit. Wiederum andere Aufträge verfügen nur über unvollständige Eingangsdaten und somit über eine ausgeprägte Unsicherheit. Um diese unterschiedlichen Ausprägungen besser in der Planung berücksichtigen zu können, ist festzustellen, ob sämtliche betrachtete Aufträge in identischem Umfang von der Unsicherheit betroffen sind oder sich Klassen von Aufträgen mit identischen Unsicherheiten identifizieren lassen. Die Herausforderung besteht darin, diese Klassen zu identifizieren. In dieser Arbeit kommen dafür zwei verschiedene Ansätze zum Einsatz: Zum einen kann eine Klassifizierung anhand der Plan-Auftragszeit erfolgen. Zum anderen können die Aufträge anhand von Metadaten gruppiert werden. Potenziell relevante Metadaten sind Bauteiltyp, Baugruppe, Produktgeometrie, Auftraggeber, Funktion, Arbeitssystem oder Zeitpunkt der Planung. Die Einteilung in Klassen gestattet es, die Ausprägung zukünftiger unsicherer Auftragszeiten zu prognostizieren.

### **Einsatz von Rückmeldedaten**

Stehen dennoch Rückmeldedaten in Gestalt von Ist-Auftragszeiten zur Verfügung, lässt sich die absolute und die relative Unsicherheit für jeden Auftrag rückwirkend bestimmen (vgl. Unterkapitel 4.1). Der Einsatz von Rückmeldedaten setzt voraus, dass die Unternehmen die tatsächlichen Ist-Auftragszeiten messen und dokumentieren. Die Erhebung der Daten scheitert häufig am Aufwand oder dem Datenschutz. Dennoch empfiehlt es sich vor dem Hintergrund der unsicheren Auftragszeiten, die Rückmeldedaten zu erheben. Voraussetzung ist eine ausreichende Datenqualität der Rückmeldedaten. Dazu muss der reale Kapazitätsbedarf jedem Auftrag bzw. Arbeitsvorgang korrekt zugeordnet werden, andernfalls werden falsche Unsicherheiten ermittelt. Es besteht dann die Gefahr, dass unwirksame oder sogar kontraproduktive Maßnahmen ergriffen werden.

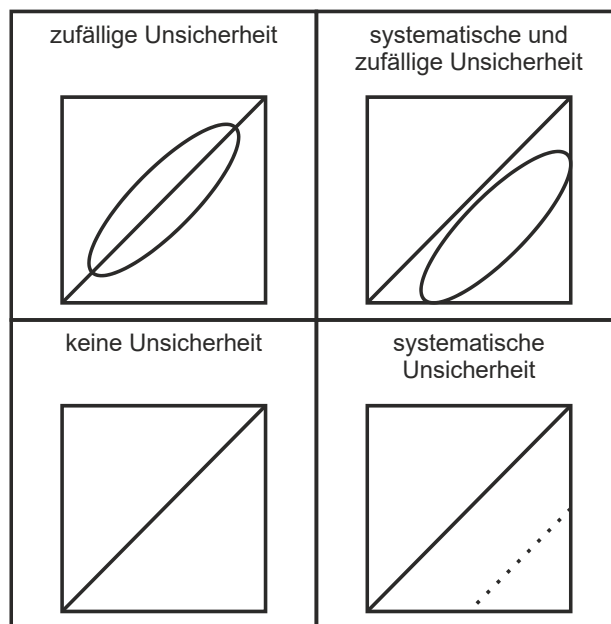
Einen schnellen Überblick über die Ausprägung unsicherer Auftragszeiten liefern Streudiagramme. Indem die Plan- und Ist-Auftragszeiten einander gegenübergestellt werden, sind sowohl systematische als auch zufällige Unsicherheit deutlich zu erkennen. In einem Streudiagramm werden auf der Abszisse die Plan-Auftragszeiten und auf der Ordinate die Ist-Auftragszeiten aufgetragen. Zusätzlich wird die Winkelhalbierende eingezeichnet. Anschließend werden sämtliche Aufträge des gewählten Untersuchungszeitraums als Punkte in das Streudiagramm eingetragen. Sichere Aufträge sind Punkte auf oder in unmittelbarer Nähe der Winkelhalbierenden (P1). Unterschätzte Auftragszeiten liegen im Streudiagramm oberhalb der Winkelhalbierenden (P2). Die Punkte unterhalb der Winkelhalbierenden markieren überschätzte Auftragszeiten (P3). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine obere und untere Grenze zu definieren, um Ausreißer zu identifizieren. Signifikante Abweichungen zwischen Plan- und Ist-Auftragszeiten werden unmittelbar sichtbar. Alternativ kann auch eine relative Darstellung der Abweichung im Streudiagramm erfolgen. Die Abszisse gibt die Plan-Auftragszeit an und auf der Ordinate ist die relative Unsicherheit aufgetragen. In Abbildung 37 sind die zwei Streudiagramme beispielhaft dargestellt.



14104

Abbildung 37: Absolutes Streudiagramm (a) und relatives Streudiagramm (b)

Das Streudiagramm bildet drei verschiedene Streuungen ab. Der Wertebereich, über den sich die Punkte auf der Abszisse bzw. Ordinate erstrecken, vermittelt einen Eindruck über die Streuung der Plan- und Ist-Auftragszeiten. Der vertikale Abstand der Punkte zur Winkelhalbierenden zeigt die Höhe der Unsicherheit. Die beiden unterschiedlichen Arten des Streudiagramms ermöglichen es, auftragszeitunabhängige und auftragszeitabhängige Unsicherheit darzustellen. Die unterschiedlichen Ausprägungen von Unsicherheit zeigen sich im Streudiagramm in Gestalt von charakteristischen Punktwolken. Abbildung 38 zeigt exemplarische Streudiagramme für die vier Szenarien „Sicher“, „Systematisch“, „Zufällig“, „Systematisch und Zufällig“ [Kuck13].



14105

Abbildung 38: Beispielhafte Streudiagramme für verschiedene Szenarien der Unsicherheit

Bedingt durch das gewählte Vorgehen, Arbeitssystem für Arbeitssystem zu analysieren, werden in einem Streudiagramm die Aufträge eines Arbeitssystems für einen definierten Zeitraum dargestellt. Grundsätzlich können in einem Streudiagramm auch die Arbeitsvorgänge eines Auftrags unabhängig vom Arbeitssystem untersucht werden. Ein weiterer Vorteil des Streudiagramms ist, dass es eine Korrelation zwischen den beiden Variablen aufdeckt. Es erfolgt keine Aussage über die Stärke der Korrelation [Kuck13].

### *Bestimmen einer empirischen Verteilungsfunktion auf Basis von Rückmeldedaten*

Um die Auswirkungen der unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen abbilden zu können (vgl. Unterkapitel 4.3), sind die einzelnen unsicheren Auftragszeiten durch eine Verteilungsfunktion zu beschreiben. Um die Unsicherheit auch auf andere Aufträge übertragen zu können, sind aus den Rückmeldedaten empirische Verteilungsfunktionen für die Unsicherheit bzw. die relative Unsicherheit zu ermitteln. Zunächst ist für jede Klasse von unsicheren Auftragszeiten ein Datenschnitt durchzuführen. Auf Basis dieser Daten ist ein Histogramm zu erstellen. Weiterhin sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Unsicherheit und der relativen Unsicherheit zu bestimmen.

Ziel ist es, die Verteilungsfunktion auch für zukünftige Aufträge zu verwenden. Experten ordnen die Aufträge einer Klasse von Unsicherheit zu. In dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass in der Unikatproduktion Projekte mit einer ähnlichen Plan-Auftragszeitstruktur derselben Unsicherheit unterliegen, sofern keine wesentlichen Änderungen im Auftragsabwicklungsprozess vorgenommen werden.

### **Schätzen von Verteilungsparametern auf Basis von Erfahrungswissen**

Die Plan- und Rückmeldedaten der Produktionsplanung der Unikatproduktion haben häufig eine geringe Datenqualität. Dies ist im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückzuführen. Zum einen werden die Plandaten im Nachgang an die Erstellung meist nicht aktualisiert. Zum anderen wird der Kapazitätsbedarf nicht zuverlässig auf den richtigen Auftrag verbucht, sodass die Rückmeldedaten fehlerhaft sind. Stehen der Produktionsplanung keine Rückmeldedaten oder vergleichbare Referenzdaten zur Verfügung, bleibt nur die Möglichkeit, auf das Erfahrungswissen der Mitarbeiter zurückzugreifen, um die Ausprägung einer Unsicherheit zu quantifizieren. Als Unterstützung dienen die Erkenntnisse aus Phase 1 (vgl. Unterkapitel 5.2). Die Eingangsinformationen für die erfahrungsbasierte Auftragszeitermittlung sind in der Regel grob detaillierte technische Zeichnungen und weitere Informationen, wie zum Beispiel die Aufteilung nach Funktionsbereichen, die Spezifikationen besonderer technischer Systeme und Prozessparameter, wie beispielsweise Orientierung und Lage der Bauteile bei der Montage.

Zuerst muss der Anwender entscheiden, ob eine auftragszeitabhängige Unsicherheit vorhanden ist. Danach ist die unsichere Auftragszeit mittels einer Dreipunktschätzung zu quantifizieren (vgl. Unterkapitel 2.5). Dafür ist zusätzlich zur Plan-Auftragszeit (Modus), eine minimale und eine maximale Auftragszeit festzulegen und im Anschluss der Erwartungswert und die Standardabweichung der Auftragszeit gemäß der Formeln 27 und 28 zu berechnen:

$$ZAU_{u,E} = \frac{ZAU_{u,min} + 4 \times ZAU_{u,mod} + ZAU_{u,max}}{6} \quad (27)$$

$$ZAU_{u,s} = \frac{ZAU_{u,max} - ZAU_{u,min}}{6} \quad (28)$$

$ZAU_{u,E}$	<i>Erwartungswert der unsicheren Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_{u,min}$	<i>Minimum der unsicheren Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_{u,mod}$	<i>Modus der unsicheren Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_{u,max}$	<i>Maximum der unsicheren Auftragszeit [Std]</i>
$ZAU_{u,s}$	<i>Standardabweichung der unsicheren Auftragszeit [Std]</i>

Die Lage des Modus beeinflusst maßgeblich die Ausprägung der systematischen Unsicherheit eines einzelnen Auftrags. Bei einer hohen Informationsverfügbarkeit ist der Abstand zwischen Maximum und Minimum kleiner zu wählen als bei einer geringen Informationsverfügbarkeit. Erfolgt die Berechnung einer unsicheren Auftragszeit aus der Summe zahlreicher Teilschätzungen, kann die Verteilung als normalverteilt angenommen werden. Grund dafür ist der zentrale Grenzwertsatz [Jako13].

### Zwischenfazit

Sowohl der erfahrungsbasierte als auch der rückmeldedatenbasierte Ansatz ermöglichen es, unsichere Auftragszeiten zu quantifizieren. Beide Ansätze schaffen die Grundlage für die Bewertung der unsicheren Auftragszeiten. Zudem können die quantifizierten unsicheren Auftragszeiten als Referenzgröße für die Unsicherheit zukünftiger Aufträge eingesetzt werden, um die Planungsqualität zu steigern. Dazu empfiehlt es sich, die Metadaten der von Unsicherheit betroffenen Aufträge auf Gemeinsamkeiten zu untersuchen und etwaige Gemeinsamkeiten zu dokumentieren. Indem die Metadaten der vergangenen und zukünftigen Aufträge miteinander verglichen werden, kann deren Ähnlichkeit geprüft werden und dann im Nachgang die Ausprägung der Unsicherheit quantifiziert werden.

Mit beiden Ansätzen können vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. Die Randbedingungen limitieren die Eignung der Verfahren. Unter der Voraussetzung, dass Rückmeldedaten zur Verfügung stehen und die Unsicherheit aufgrund der Ähnlichkeit des Auftragspektrums übertragbar ist, ist der rückmeldedatenbasierte Ansatz gegenüber dem erfahrungsbasierten Ansatz zu präferieren. Dieser gewährleistet eine transparente, objektive Quantifizierung der Unsicherheit und kann anwenderunabhängig eingesetzt werden.

### 5.3.2 Quantifizieren der Auftragszeitstruktur bei unsicheren Auftragszeiten

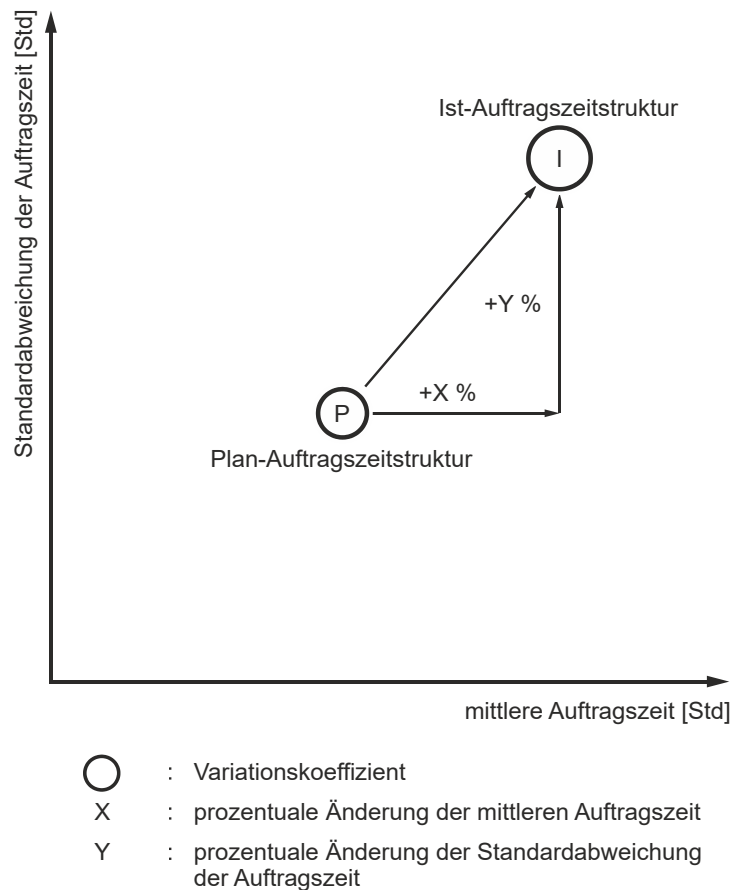
Nachdem nun die unsicheren Auftragszeiten quantifiziert wurden, gilt es die Auftragszeitstruktur zu ermitteln. Dazu werden nun zwei Lösungsansätze vorgestellt (siehe Tabelle 9). Welcher der beiden Lösungsansätze zu wählen ist, hängt von der Beschaffenheit der Unsicherheit am Arbeitssystem ab. Unterliegen einzelne Klassen von Aufträgen eines Arbeitssystems einer identischen Unsicherheit, kann die tatsächliche Auftragszeitstruktur mit Hilfe einer vereinfachten Berechnung (vgl. Abschnitt 4.3.3) berechnet werden. Dabei berechnet sich die tatsächliche Auftragszeitstruktur einer Klasse aus der geplanten Auftragszeitstruktur und der für diese Klasse ermittelten Unsicherheit. Die tatsächliche Auftragszeitstruktur des Arbeitssystems setzt sich aus den berechneten Auftragszeitstrukturen je Klasse zusammen (vgl. Abschnitt 4.3.3). Haben die Aufträge eines Arbeitssystems unterschiedliche Ausprägungen der Unsicherheit, ist der Lösungsansatz Monte-Carlo-Simulation zu wählen. Die erforderlichen Verteilungsfunktionen der einzelnen unsicheren Auftragszeiten sind bereits aus dem vorherigen Arbeitsschritt bekannt (siehe Abschnitt 5.3.1). Um ein ausreichend kleines 95 %-Konfidenzintervall sicherzustellen, sind 1000 Simulationsläufe durchzuführen

[Sieb10, VDI97]. In jedem Simulationslauf werden die mittlere Auftragszeit und die Streuung der Auftragszeiten ermittelt. Im Anschluss werden die Mittelwerte für die mittlere Auftragszeit und die Standardabweichung der Auftragszeit bestimmt. Anhand eines Beispiels konnte gezeigt werden, dass beide Verfahren zum gleichen Ergebnis führen. Der Versuchsplan ist im Anhang hinterlegt (siehe Anhang A).

Tabelle 9: Verfahren zum Quantifizieren der Auftragszeitstruktur Monte-Carlo-Simulation (a) und vereinfachte Berechnung (b)

Verfahren	Monte-Carlo-Simulation	Vereinfachte Berechnung
Eingangsdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan-Auftragszeit je Auftrag</li> <li>• Unsicherheit je Auftrag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan-Auftragszeitstruktur je Klasse</li> <li>• Anteil der Aufträge je Klasse</li> <li>• Unsicherheit je Klasse</li> </ul>
Schritte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulation Verteilungsfunktion der Auftragszeitstruktur bestimmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ist-Auftragszeitstruktur je Klasse ermitteln</li> <li>• Ist-Auftragszeitstruktur des Arbeitssystems berechnen</li> </ul>
Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ist-Auftragszeitstruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ist-Auftragszeitstruktur</li> </ul>

Im Anschluss können die geplante und die tatsächliche Auftragszeitstruktur visuell miteinander verglichen werden, um einen ersten Eindruck über den erforderlichen Handlungsbedarf zu vermitteln. In einem Streudiagramm mit den Dimensionen mittlere Auftragszeit und Standardabweichung werden die Plan- und Ist-Auftragszeitstruktur eingetragen (Abbildung 39). Der Abstand zwischen Punkten zeigt den Handlungsbedarf für die Termin- und Kapazitätsplanung. Große Abstände implizieren umfangreiche Anpassungen in der Termin- und Kapazitätsplanung.



14106

Abbildung 39: Gegenüberstellung der Plan- und Ist-Auftragszeitstruktur im Streudiagramm

#### 5.4 Bewerten unsicherer Auftragszeiten

Um den unsicheren Auftragszeiten zielgerichtet und wirksam zu begegnen, sind diese zu bewerten und zu priorisieren. Die Bewertung kann sowohl ursachenorientiert als auch wirkungsorientiert erfolgen. Die ursachenorientierte Bewertung beurteilt die Qualität der Arbeitsplanung bzw. der Vorgabezeitermittlung anhand der quantitativen Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten. Die Grundlagen hierzu wurden in der Phase zuvor geschaffen (vgl. Abschnitt 5.3.1). Zielrichtung ist die Reduzierung der Unsicherheit durch einen verbesserten Prozess der Vorgabezeitermittlung.

Für Unternehmen sind darüber hinaus die Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen relevant. Der wirkungsorientierte Ansatz bewertet die logistische Zielerreichung, um darauf aufbauend Maßnahmen für die PPS abzuleiten. Hierfür müssen die Auswirkungen der unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen bekannt sein. Unterkapitel 4.3 liefert die theoretischen Zusammenhänge, um die Kennzahlen zu ermitteln. Aufbauend auf den Ergebnissen aus Unterkapitel 5.1 leitet sich der Bedarf ab, bei der Bewertung von unsicheren Auftragszeiten zwischen einer Auftragssicht und einer Arbeitssystemansicht zu differenzieren. Je nach Fokus der Bewertung sind andere Kennzahlen erforderlich. Die Kennzahlen bilden die Entscheidungsgrundlage für den Änderungsbedarf der Planungsprozesse.

Unabhängig von der Zielsetzung der Bewertung umfasst diese Phase drei Tätigkeiten. Zu Beginn sind die Kennzahlen für jeden Anwendungsfall zu ermitteln. Dann sind die maximal zulässigen Abweichungen zwischen Ist- und Plan-Parametern zu bestimmen. Zuletzt sind diese Werte einander gegenüberzustellen. Wird hier ein zuvor definierter Grenzwert überschritten, besteht Handlungsbedarf. Um die Situation intuitiv und schnell zu bewerten, ist der Nutzer auch in dieser Phase durch geeignete Visualisierungen zu unterstützen. Abbildung 40 zeigt die Inhalte der Phase „Bewerten unsicherer Auftragszeiten“. Dargestellt sind jeweils für die Bewertung der Arbeitsplanung sowie für die Auftrags- und die Arbeitssystem-sicht die durchzuführenden Tätigkeiten. Unterstützt wird die Bewertung von unsicheren Auftragszeiten durch geeignete Visualisierungen.

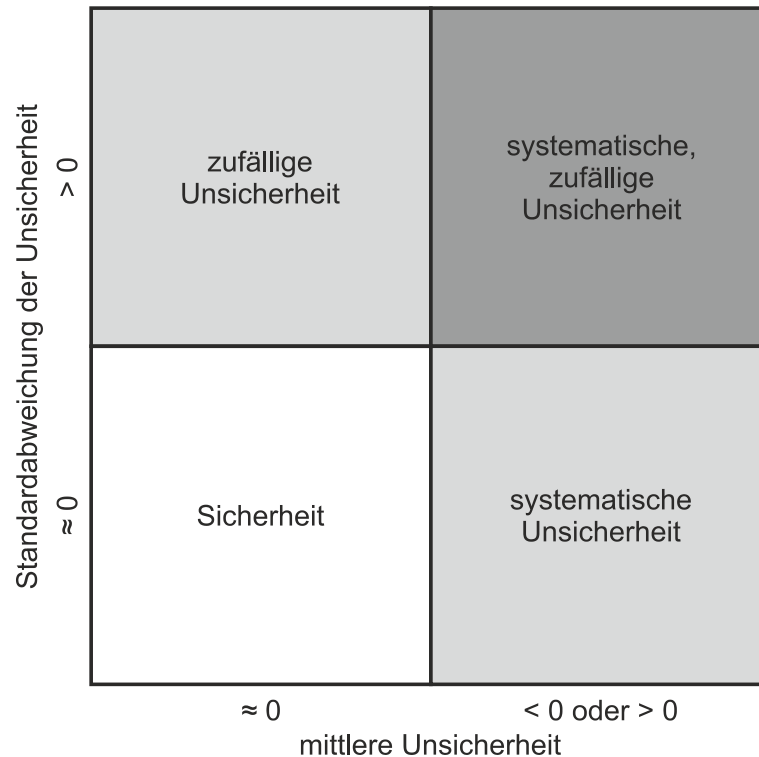
Bewerten unsicherer Auftragszeiten		
Arbeitsplanung (Abschnitt 5.4.1)	Auftrag (Abschnitt 5.4.2)	Arbeitssystem (Abschnitt 5.4.3)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Szenario der Unsicherheit bestimmen</li> <li>• Auftragszeit-treue ermitteln</li> <li>• Auftragszeit-treue bewerten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logistische Kenngrößen für Ist-Auftragszeiten berechnen</li> <li>• Toleranzbereiche erfassen</li> <li>• Gegenüberstellung der Ziel- und Plan-Parameter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logistische Kenngrößen für Ist-Auftragszeiten berechnen</li> <li>• Toleranzbereiche erfassen</li> <li>• Gegenüberstellung der Ziel- und Plan-Parameter</li> </ul>

14107

Abbildung 40: Inhalte der Phase „Bewerten unsicherer Auftragszeiten“

#### 5.4.1 Bewertung der Arbeitsplanung

Mit Hilfe der Szenarien der Unsicherheit kann die Vorgabezeitermittlung, die Bestandteil der Arbeitsplanung ist, bewertet werden (siehe Abbildung 41). Die auch als Matrix der Unsicherheit bezeichnete Darstellung ermöglicht es, sowohl einzelne Auftragszeiten als auch sämtliche Aufträge eines Arbeitssystems qualitativ zu bewerten. Der Auftrag ist entsprechend seiner Kennwerte einem Szenario zuzuordnen. Liegt keine bzw. eine geringe Ausprägung der Unsicherheit vor, sind keine Anpassungen der Planung erforderlich. Ist ein Auftrag von einer systematischen Unsicherheit betroffen, besteht Handlungsbedarf. Die systematische Unsicherheit ist zu beseitigen, indem deren Ursache beseitigt wird. Darüber hinaus sind die Planwerte in der Termin- und Kapazitätsplanung kurzfristig zu korrigieren. Meist ist eine zufällige Unsicherheit nicht vollständig auszuschließen.



14083

Abbildung 41: Szenarien der Unsicherheit zur Bewertung der Arbeitsplanung

### Auftragszeitstreue

Die Auftragszeitstreue ist ein Maß zur Beurteilung der Gesamtheit aller Aufträge eines Zeitraumes an einem Arbeitssystem. Sie ist definiert als prozentualer Anteil der Aufträge, deren Auftragszeit innerhalb einer definierten Auftragszeittoleranz liegt und variiert zwischen 0 und 100 % (vgl. Formel 29). Man kann sie als logistische Prozess-Sicherheit der Arbeitsplanung deuten (in Anlehnung an [Wien03, Yu01]).

$$TZAU = \frac{\text{AnzAuf mit } U_{r,UG} \leq U_r \leq U_{r,OG}}{\text{AnzAuf}} \times 100 \quad (29)$$

$TZAU$	Auftragszeitstreue [%]
$AnzAuf$	Anzahl Aufträge [-]
$U_{r,UG}$	Untergrenze der relativen Unsicherheit [%]
$U_r$	relative Unsicherheit [%]
$U_{r,OG}$	Obergrenze der relativen Unsicherheit [%]

Die Auftragszeitstreue quantifiziert die Ausprägung der relativen Unsicherheit. Sie kann anhand der Verteilungsfunktion der relativen Unsicherheit veranschaulicht werden (siehe Abbildung 42). Auf der Ordinate ist die relative Unsicherheit in Prozent und auf der Abszisse die kumulierte Wahrscheinlichkeit aufgetragen. Es empfiehlt sich, die Ober- und Untergrenze des Toleranzbereichs in Höhe der verfügbaren Kapazitätsflexibilität zu wählen. Unter der Prämisse, dass die Aufträge nacheinander bearbeitet werden, gehen auf diesem Wege nur diejenigen Aufträge negativ in die Bewertung ein, die einen nicht kompensierbaren Rückstand erzeugen.

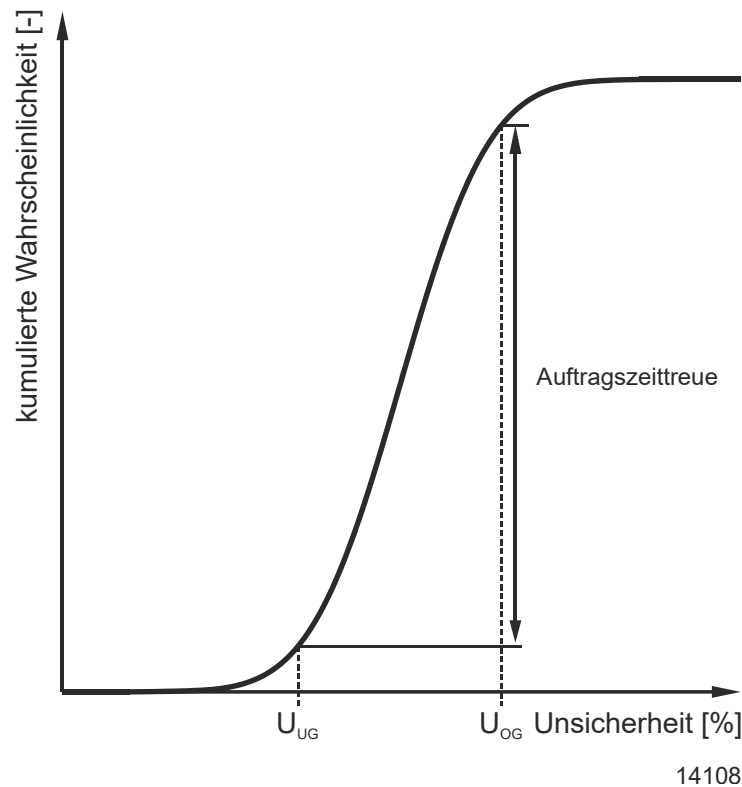


Abbildung 42: Exemplarische Verteilungsfunktion einer relativen Unsicherheit inklusive Auftragszeittreue

#### 5.4.2 Auftragssicht – Bewertung eines Auftrags mit unsicherer Auftragszeit

Die Auswirkung unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen eines Auftrags sind dahingehend zu bewerten, ob Maßnahmen zur Handhabung der Unsicherheit zu ergreifen sind. Um die Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen eines einzelnen Auftrags zu bestimmen, sind die Verteilungsfunktionen der Terminabweichung im Abgang, der Durchlaufzeit und der Abweichungen der Auftragszeit zu bilden (siehe Abschnitt 4.3.2). Die Bewertung erfolgt, indem die Konfidenzintervalle der logistischen Zielgrößen mit den Toleranzbereichen gegenübergestellt werden. Für einen einzelnen Auftrag sind drei Kennzahlen von Bedeutung: die Terminabweichung im Abgang, die Durchlaufzeit und die Kosten. In der Unikatproduktion ist die termingerechte Lieferung vor dem Hintergrund der hohen Pönalen häufig von zentraler Bedeutung. Daher dient die Wahrscheinlichkeit für eine termintreue Lieferung als primäres Entscheidungskriterium. Nachfolgend wird für jede Kennzahl das Vorgehen beschrieben.

##### Terminabweichung

Die Termineinhaltung eines Auftrags wird unter der Prämisse bewertet, dass ein Plan-Abgangstermin und eine definierte Termintoleranz für die Fertigstellung des Auftrags vorliegen. Auf Basis der entwickelten Modellierung ist die Verteilungsfunktion für die Terminabweichung des zu bewertenden Auftrags zu ermitteln (vgl. Abschnitt 4.3.2 Formeln 16-18). Weiterhin gelten die Prämisse, dass keine Reihenfolgeabweichungen auftreten und dass die Ist-Kapazität der Plan-Kapazität entspricht. Unterschreitet die errechnete Wahrscheinlichkeit, einen Auftrag innerhalb der Termintoleranz abschließen zu können, eine definierte

Grenzwahrscheinlichkeit dahingehend, dass der Auftrag innerhalb der zulässigen Termintoleranz fertiggestellt wird, sind Maßnahmen zu ergreifen. Die Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung des Toleranzbereichs ist durch den Anwender festzulegen. Die Formel 30 lautet:

$$F_{TT} = F_{TAA}(TAA_{OG}) - F_{TAA}(TAA_{UG}) \quad (30)$$

$F_{TT}$	Wahrscheinlichkeit für den termintreuen Abgang eines Auftrags [-]
$F_{TAA}(x)$	Wahrscheinlichkeit eines Auftrags für eine Terminabweichung im Abgang kleiner gleich $x$ [-]
$TAA_{OG}$	Obergrenze Terminabweichung im Abgang [BKT]
$TAA_{UG}$	Untergrenze Terminabweichung im Abgang [BKT]

### Durchlaufzeit

Zunächst ist die Verteilungsfunktion für die Durchlaufzeit des Auftrags zu bilden (vgl. Abschnitt 4.3.2 Formel 14). Zugleich muss der Anwender einen Toleranzbereich für die Durchlaufzeit festlegen. Der Anwender berechnet die Wahrscheinlichkeit, dass die Durchlaufzeit des Auftrags innerhalb dieses Toleranzbereichs liegt. Weiterhin ist eine geforderte Wahrscheinlichkeit anzugeben. Nun gleicht der Anwender die geforderte und die berechnete Wahrscheinlichkeit miteinander ab. Ist die geforderte Wahrscheinlichkeit größer als die berechnete Wahrscheinlichkeit, so besteht Handlungsbedarf:

$$F_{ZDL,T} = F_{ZDL}(ZDL_{OG}) - F_{ZDL}(ZDL_{UG}) \quad (31)$$

$F_{ZDL,T}$	Wahrscheinlichkeit für eine Durchlaufzeit innerhalb der Toleranz [%]
$F_{ZDL}(x)$	Wahrscheinlichkeit für eine Durchlaufzeit kleiner gleich $x$ [%]
$ZDL_{OG}$	Obergrenze der Durchlaufzeit [BKT]
$ZDL_{UG}$	Untergrenze der Durchlaufzeit [BKT]

### Kosten

Eine unsichere Auftragszeit beeinflusst den Kapazitätsbedarf für die Bearbeitung des Auftrags. Die Höhe der Unsicherheit wirkt sich direkt auf die Herstellkosten aus und ist ergebniswirksam. Aus finanzieller Sicht ist vor allem eine unterschätzte Auftragszeit kritisch zu betrachten, da zusätzliche Kosten den Gewinn reduzieren. Eine überschätzte Auftragszeit hat positive und negative Effekte auf die Kosten. Einerseits können Leerkosten für ungenutzte Kapazitäten entstehen, wenn die Kapazitäten nicht anderweitig genutzt werden. Andererseits sinken die Herstellkosten, wenn es gelingt, die eingeplanten Mitarbeiter anderweitig zu beschäftigen bzw. ihre Arbeitszeit zu verkürzen. Unternehmen können eine Obergrenze für die Zusatzkosten aus der Unsicherheit definieren. Wird sie überschritten, sind zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen. Der Anwender kann die Obergrenze der Kosten auftragspezifisch festlegen, z.B. in Höhe des Deckungsbeitrags.

$$F_{K,T} = F_K(K_{OG}) \quad (32)$$

$F_{K,T}$	Wahrscheinlichkeit für Kosten der Unsicherheit innerhalb der Toleranz [%]
$F_K(x)$	Wahrscheinlichkeit für Kosten der Unsicherheit kleiner gleich $x$ [%]
$K_{OG}$	Obergrenze der Kosten [€]

### 5.4.3 Arbeitssystemansicht – Bewertung der logistischen Zielgrößen eines Arbeitssystems bei unsicheren Auftragszeiten

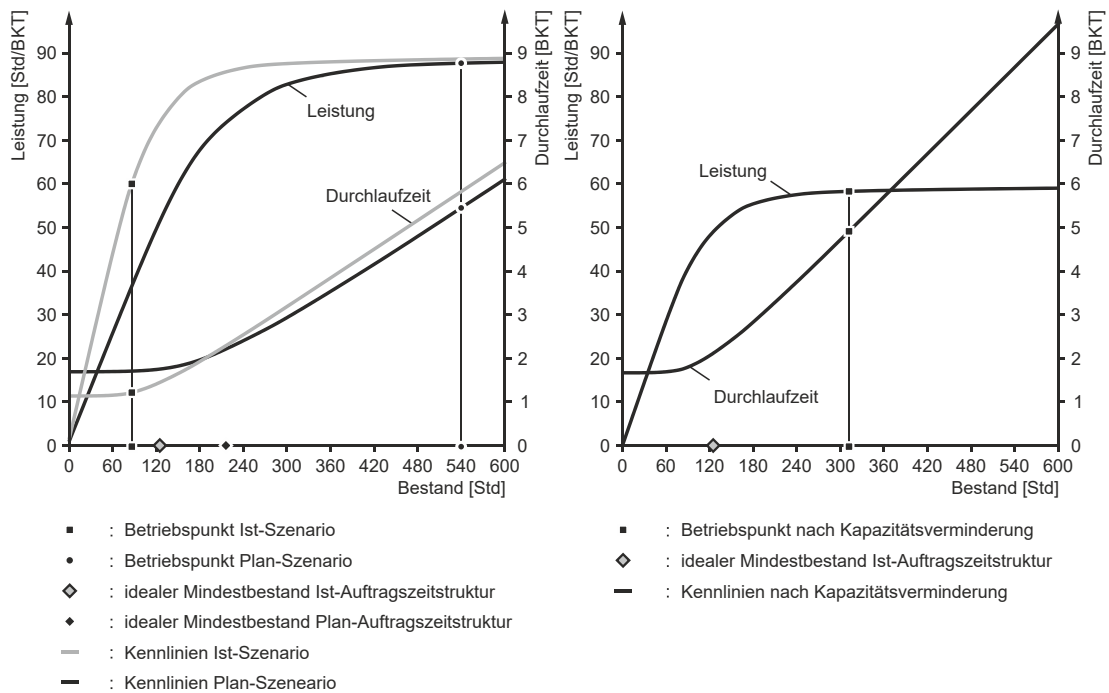
Ziel dieser Phase ist es, die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf das betrachtete Arbeitssystem zu bewerten, um potenziellen Handlungsbedarf aufzuzeigen. Zunächst ist zu prüfen, ob in Folge einer systematischen Unsicherheit ein instationärer Zustand am Arbeitssystem vorliegt. Hierzu wird für den Untersuchungszeitraum die vorhandene Kapazität mit dem tatsächlichen Kapazitätsbedarf abgeglichen. Wird eine Kapazitätslücke identifiziert, besteht akuter Handlungsbedarf, das Kapazitätsangebot des Arbeitssystems zu erhöhen, um Rückstände und damit Verspätungen zu reduzieren. Analog ist das Kapazitätsangebot bei einem Überangebot an Kapazität zu reduzieren, um Produktivitätsverluste zu vermeiden.

Darüber hinaus sind jeweils die Produktionskennlinien für die geplante und die tatsächliche Auftragszeitstruktur zu bestimmen (vgl. Abschnitt 4.3.3) und zu vergleichen. Aufgrund der veränderten Auftragszeitstruktur ergibt sich ein geänderter Verlauf der Kennlinien. Je stärker sich die Kennlinien unterscheiden, desto umfangreicher ist der Anpassungsbedarf für die Termin- und Kapazitätsplanung. Die in der Termin- und Kapazitätsplanung getroffenen Annahmen für die Auftrags- und Durchlaufzeiten sind infolge der unsicheren Auftragszeiten häufig falsch. Anhand der Plan- und Rückmeldedaten (mittlerer Bestand, mittlere Durchlaufzeit oder mittlere Leistung) sind der geplante Betriebspunkt und der Betriebspunkt des Ist-Szenarios zu ermitteln (siehe Formeln in Abschnitt 2.3.2 und im Anhang Teil B). Zusätzlich kann der Anwender aus den Kennlinien der tatsächlichen Auftragszeitstruktur mögliche Betriebspunkte ableiten und deren logistische Kenngrößen mit den ursprünglich geplanten Betriebspunkten abgleichen.

Ein Beispiel erläutert das Vorgehen. Die Kennlinien und die Betriebspunkte für das Plan- und das Ist-Szenario sowie das Szenario Kapazitätsanpassung sind in Abbildung 43 dargestellt. Die Plan-Kapazität des Arbeitssystems beträgt 90 Std/BKT. Die Planung sieht eine mittlere Auftragszeit von 150 Std und eine Standardabweichung der Auftragszeit von 100 Std vor. Entgegen der ursprünglichen Planung beträgt die tatsächliche mittlere Auftragszeit nur 100 Std, sodass ein Überangebot an Kapazität besteht. Um Produktivitätsverluste zu vermeiden, ist das Kapazitätsangebot um ein Drittel auf 60 Std/BKT zu reduzieren. Abbildung 43a enthält die Produktionskennlinien der geplanten und der tatsächlichen Auftragszeitstruktur bei einer unveränderten Kapazität. Um eine hohe Auslastung zu erzielen, wird das Arbeitssystem gemäß der Planung bei einem mittleren Bestand in Höhe des 2,5-fachen idealen Mindestbestands positioniert. Der geplante Betriebspunkt hat einen mittleren Bestand von 540 Std. Das Arbeitssystem erreicht eine Auslastung von ca. 98 % und die Durchlaufzeit beträgt 5,4 BKT. Aufgrund der Überschätzung der mittleren Auftragszeit um ein Drittel erzielt das Arbeitssystem (mit den Ist-Auftragszeiten gerechnet) jedoch nur eine mittlere Leistung in Höhe von ca. 59 Std/BKT anstelle der geplanten mittleren Leistung von 88 Std/BKT. Die Auslastung fällt auf rund 66 % ab, die mittlere Durchlaufzeit sinkt auf 1,2 BKT und der mittlere Bestand beträgt 85 Std. Besonders kritisch zu bewerten, ist die geringe Auslastung am tatsächlichen Betriebspunkt. Um eine höhere Auslastung zu erzielen, wird die Kapazität um ein Drittel auf 60 Std/BKT reduziert. Abbildung 43b visualisiert die Kennlinien nach der Kapazitätsanpassung und den neuen Betriebspunkt. Die mittlere Leistung bleibt mit 59 Std/BKT konstant, sodass die Auslastung auf ca. 98 % steigt. Der neue Betriebspunkt hat einen Bestand in Höhe von 312 Std und eine Durchlaufzeit von 4,9 BKT. Im

## 5. Analyse von unsicheren Auftragszeiten

Vergleich zum geplanten Betriebspunkt wird bei gleicher Auslastung eine geringere mittlere Durchlaufzeit erzielt, weil die Ist-Auftragszeiten – auch bezogen auf den geringeren Mittelwert von 100 Std – deutlich weniger streuen als in der Planung.



a) Plan- und Ist-Szenario

b) nach Kapazitätsverminderung (KV)

	Plan	Ist	KV	Einheit
ZAU <sub>m</sub>	150	100	100	Std
ZAU <sub>s</sub>	100	50	50	Std
BI <sub>min</sub>	216	125	125	Std
B <sub>m</sub>	540	85	312	Std
L <sub>m</sub>	88	59	59	Std/BKT
ZDL <sub>m</sub>	5,4	1,2	4,9	BKT

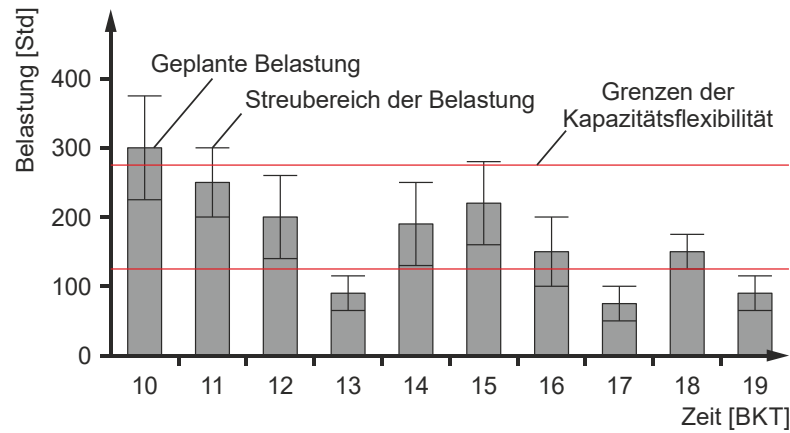
c) Kenngrößen der Szenarien

14109

Abbildung 43: Exemplarische Produktionskennlinien zur Bewertung der Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen des Arbeitssystems

Obwohl die Erkenntnisse aus der Gegenüberstellung der Produktionskennlinien eine verbesserte Planung ermöglichen, können aufgrund einer großen zufälligen Unsicherheit oder aufgrund von Wechselwirkungen mehrerer unsicherer Auftragszeiten kurzfristige Rückstände am Arbeitssystem entstehen. Aufträge erfahren signifikante Terminabweichungen. Abhilfe schafft hier der Ansatz nach Koppold, unsicheren Auftragszeiten mit Hilfe von Kapazitätsflexibilität zu begegnen [Kopp17]. In der Unikatproduktion umfasst ein Arbeitssystem häufig mehrere Bauplätze, auf denen unterschiedliche Arbeitsvorgänge parallel bearbeitet werden. Dem Arbeitssystem ist eine gemeinsame Kapazitätsgruppe zugeordnet. Um die Kapazitätsflexibilität angemessen zu dimensionieren, werden der mittlere Kapazitätsbedarf und dessen mögliche Streuung mit dem geplanten Kapazitätsangebot und der verfügbaren Kapazitätsflexibilität abgeglichen. Ist die Differenz zwischen Kapazitätsbedarf und

-angebot größer als die verfügbare Kapazitätsflexibilität, sind weitere Maßnahmen zu ergreifen. Abbildung 44 zeigt beispielhaft für einen Zeitraum die geplante Belastung inklusive des Streubereichs und der Grenzen der Kapazitätsflexibilität.



14110

Abbildung 44: Geplante Belastung einer Kapazitätsgruppe inklusive Streubereich und Grenzen der Kapazitätsflexibilität in Anlehnung an [Kopp17]

### 5.5 Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten

Nachdem die unsicheren Auftragszeiten bewertet und potenzielle Handlungsfelder identifiziert wurden, sind nun Maßnahmen zu ergreifen, um den unsicheren Auftragszeiten zu begegnen und eine bestmögliche logistische Zielerreichung sicherzustellen. Bei Wahl der konkreten Maßnahmen sind die jeweiligen Randbedingungen der Produktionsplanung und der betroffenen Arbeitssysteme zu berücksichtigen.

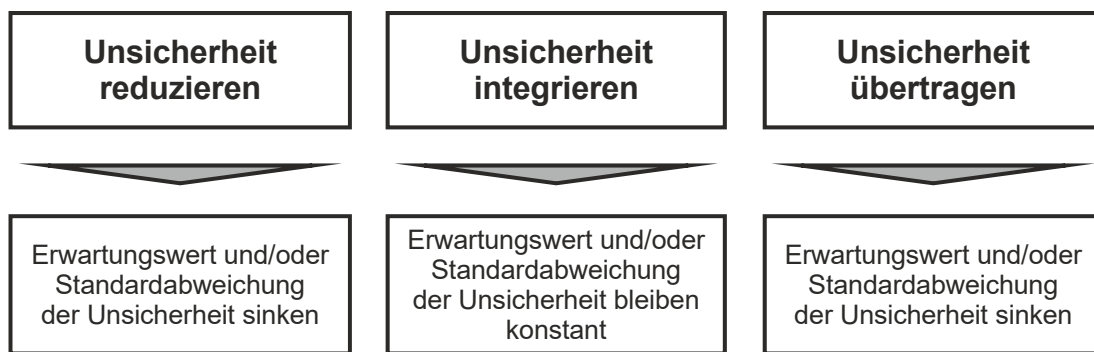
Die Ursache eines Informationsdefizits bestimmt, ob die Unsicherheit reduziert werden kann oder integriert werden muss. Daneben beeinflussen weitere Faktoren die Eignung der Maßnahmen, wie beispielsweise der Auftrag, die Ausprägung und der Typ der Unsicherheit, der Zeithorizont, das Budget, die Verfügbarkeit bzw. der Umfang der Maßnahmen. Nach der Auswahl der Maßnahmen ist die logistische Zielerreichung erneut zu prüfen. Um die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen zu minimieren, stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung. Diese beruhen auf den drei Wirkmechanismen „*Unsicherheit reduzieren*“, „*Unsicherheit integrieren*“ und „*Unsicherheit übertragen*“:

- *Unsicherheit reduzieren*: Diese Maßnahmen reduzieren die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten, sprich der Erwartungswert und/oder die Streuung der Unsicherheit werden aktiv vermindert. Hierzu sind Defizite der Arbeitsplanung zu beseitigen. Sie greifen in die Arbeitsplanung ein und verändern deren Struktur bzw. Merkmale. Dadurch werden Informationsdefizite vermindert oder beseitigt, die Auslöser der unsicheren Auftragszeiten sind. Es werden vier Stellgrößen differenziert, um die Informationsdefizite zu beseitigen: Eingangsinformationen verbessern, Informationsverarbeitung verändern, Prozessbeteiligte befähigen, Werkzeuge und Hilfsmittel optimieren. Relevante Maßnahmen sind die Erzeugung neuer Informationen, die Einbeziehung zusätzlicher Informationen und die Aufbereitung vorhandener Informationen. Die Umgestaltung der Prozesse ist mit einem erheblichen

Aufwand verbunden. Werden diese Maßnahmen eingesetzt, ist der Schritt Quantifizieren im Anschluss erneut durchzuführen.

- *Unsicherheit integrieren*: Eine logistische Positionierung, die unsichere Auftragszeiten berücksichtigt, ermöglicht es Unternehmen, sich bewusst im Spannungsfeld der logistischen Zielgrößen zu positionieren. Im Gegensatz zur ersten Kategorie reduzieren diese Maßnahmen die Unsicherheit nicht. Ergo bleiben der Erwartungswert und die Streuung der Unsicherheit unverändert.
- *Unsicherheit übertragen*: Die dritte Kategorie von Maßnahmen bewirkt, dass das Risiko von unsicheren Auftragszeiten auf einen Dritten übertragen wird, wie z.B. bei einem Werkvertrag mit festem Termin und festen Kosten. Der Erwartungswert und die Streuung der Unsicherheit der übertragenen Aufträge bleiben unverändert. Es findet lediglich ein Wandel von einem internen kapazitiven Risiko in ein externes zeitliches Risiko statt. Damit geht eine Änderung der Auftragszeitstruktur und der Terminplanung des Unikatproduzenten einher.

Die verschiedenen Kategorien von Maßnahmen und deren Wirkmechanismus sind in Abbildung 45 dargestellt und werden nachfolgend detailliert erläutert.



14111

Abbildung 45: Maßnahmenkategorien zur Handhabung von unsicheren Auftragszeiten

### 5.5.1 Maßnahmen zur Reduzierung unsicherer Auftragszeiten

Eine Möglichkeit, die Zuverlässigkeit der Termin- und Kapazitätsplanung zu erhöhen, besteht darin, die systematische und zufällige Unsicherheit der Auftragszeiten zu reduzieren. Hierzu sind bestehende Informationsdefizite in der Arbeitsplanung zu beseitigen. Diese wurden bereits in der Phase „Identifizieren unsicherer Auftragszeiten“ ermittelt (vgl. Unterkapitel 5.2). Die Ursache der Informationsdefizite bestimmt, welcher Bestandteil der Arbeitsplanung anzupassen ist. Es sind vier Maßnahmen zu differenzieren: Eingangsinformationen verbessern, Werkzeuge und Hilfsmittel verändern, Prozessbeteiligte befähigen, Informationsverarbeitung verbessern (siehe Abbildung 46).

Unsicherheit reduzieren	
Eingangsinformationen verbessern	Hilfsmittel verbessern
Prozessbeteiligte befähigen	Verarbeitungsregeln überarbeiten

14112

Abbildung 46: Übersicht Maßnahmen „Unsicherheit reduzieren“

Die Einzelmaßnahmen werden nachfolgend erläutert. Ob die Maßnahmen durchgeführt werden können, ist abhängig von den Randbedingungen der spezifischen Auftragsabwicklung. Aufgrund der Randbedingungen in der Unikatproduktion können unsichere Auftragszeiten häufig nur mit großem Aufwand reduziert werden. Darum liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Modellierung und Integration von unsicheren Auftragszeiten in die Produktionsplanung und -steuerung. Aus Gründen der Vollständigkeit werden die Maßnahmen zur Reduzierung der Unsicherheit dennoch allgemein anhand einer vereinfachten Black-Box-Darstellung der Arbeitsplanung erläutert. Auf eine detaillierte Beschreibung der Informationsverarbeitung innerhalb der Arbeitsplanung wird verzichtet.

### **Eingangsinformationen verbessern**

Sind die Eingangsinformationen der Auslöser für die unsicheren Auftragszeiten, ist meist die Datenqualität nicht ausreichend. Um die Datenqualität der Eingangsinformationen zu erhöhen, sind die Dimensionen der Datenqualität wie die Aktualität, die Vollständigkeit, die Verfügbarkeit und der Umfang der Daten zu verbessern [Ste17]. Es ist zu prüfen, wie die Eingangsinformationen verbessert werden können. Dabei ist zwischen dem Einsatz von vorhandenen und neuen Informationen zu differenzieren. Diese Maßnahme lässt sich meist nur mittelfristig realisieren. Deshalb eignet sie sich insbesondere für Arbeitssysteme mit einer ausgeprägten Unsicherheit:

- *Vorhandene Informationen erschließen:* Unter der Prämisse, dass die für die Arbeitsplanerstellung notwendigen Informationen im Unternehmen vorhanden sind, diese aber nicht eingesetzt werden, ist der Informationsfluss anzupassen. Die präziseren und aktuelleren Informationen über das zu produzierende Unikat beseitigen Informationsdefizite und ermöglichen eine zuverlässigere und damit sicherere Planung der Auftragszeiten. Der Informationsfluss ist einmalig anzupassen. Die organisatorischen sowie die hardware- und softwaretechnischen Anpassungen bestimmen den Aufwand zur Änderung der Informationsflüsse.
- *Neue Informationen erzeugen:* Die zum Zeitpunkt der Arbeitsplanung bereitgestellten Informationen sind nicht ausreichend detailliert. Eine Detaillierung bereits bestehender Planungsergebnisse verbessert den Umfang und die Vollständigkeit der Daten. Allerdings erzeugen die zusätzlichen Planungsaktivitäten einen Mehraufwand. Eine manuelle Durchführung der zusätzlichen Planungsaktivitäten ist zeit-

und kostenintensiv. Die monetären Einsparungen infolge der gesteigerten Datenqualität müssen größer sein als die Kosten aus den zusätzlichen Planungsaktivitäten.

### **Werkzeuge und Hilfsmittel verändern**

Durch zusätzliche Werkzeuge und Hilfsmittel kann der Anwender bei der Auftragszeitermittlung entlastet werden und einen höheren Anteil seiner Arbeitszeit dazu verwenden, besonders unsichere Auftragszeiten zu bestimmen.

### **Prozessbeteiligte befähigen**

Schulungen, Weiterbildungen und der gezielte Erfahrungsaustausch befähigen die Prozessbeteiligten, zuverlässigere Aussagen über die Höhe der Auftragszeiten zu treffen. Die Unsicherheit wird reduziert. Anhand eines Beispiels wird diese Maßnahme beispielhaft erläutert: In der Ausgangssituation erfolgt die Auftragszeitermittlung manuell durch einen Anwender. Dieser bestimmt anhand von technischen Übersichtszeichnungen für jeden Auftrag eine Auftragszeit. Anwender mit unterschiedlichem Erfahrungswissen schätzen die Auftragszeit bei identischen Aufträgen unterschiedlich hoch ein. Ziel der Maßnahme ist es, den unerfahrenen Mitarbeiter zu befähigen, die Auftragszeiten anhand von nachvollziehbaren Kriterien zuverlässiger abzuschätzen.

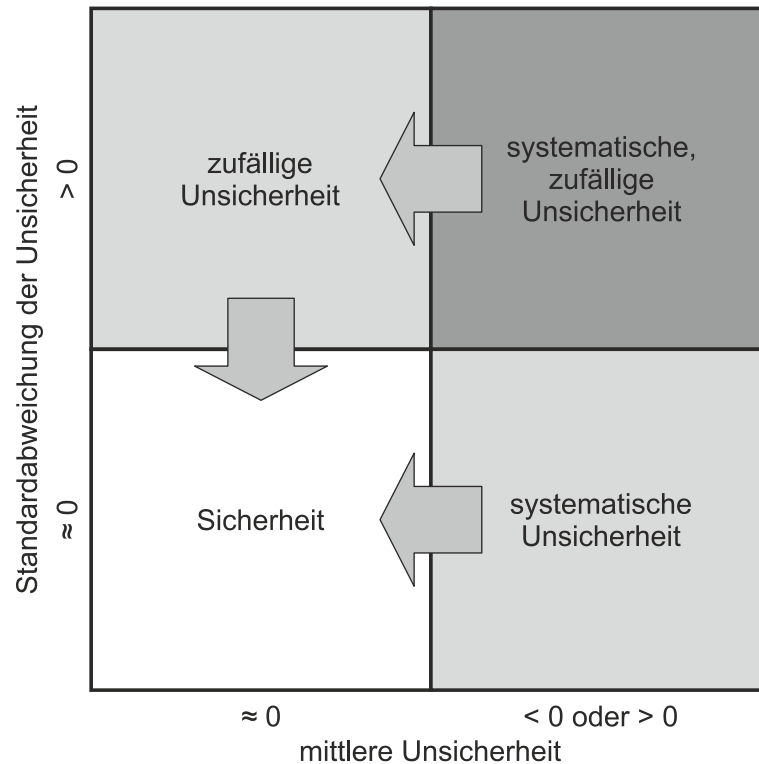
### **Informationsverarbeitung verbessern**

Liefert die Arbeitsplanung trotz qualitativ hochwertiger Eingangsinformationen unsichere Auftragszeiten, bildet die Informationsverarbeitung den Schwachpunkt innerhalb der Arbeitsplanung. In diesem Fall ist eine detaillierte Analyse der Auftragszeiterzeugung durchzuführen, um die Quelle der Unsicherheit zu identifizieren und zu beseitigen. Unsicherheiten treten z.B. auf, wenn Schätzungen und Annahmen über den Aufbau des Unikats fester Bestandteil der Planung sind oder fehlerhafte Berechnungsformeln vorliegen. Auch ein Mangel an Struktur und an Transparenz über die Beschaffenheit des Produktes führt zu unsicheren Auftragszeiten. Zudem sind die Parameter der Planung bzw. die Abhängigkeiten, auf deren Basis die Auftragszeiten abgeleitet werden, zu verifizieren. Erfolgt stattdessen eine standardisierte Bewertung der Auftragszeiten anhand definierter Parameter, wird die Standardabweichung der Unsicherheit verringert. Die Herausforderung besteht darin, das Expertenwissen in Zusammenhänge zu überführen und diese zu verifizieren.

Eine Schätzung durch Zerlegung reduziert die zufällige Unsicherheit, da die Standardabweichung der Summe der Teilschätzungen für Teilarbeitspakete kleiner ist als die Standardabweichung einer einzelnen Schätzung für das Gesamtarbeitspaket (vgl. [Jako13])

### **Wirkung der Maßnahmen**

Die Maßnahmen zielen darauf ab, sowohl die systematische als auch die zufällige Unsicherheit zu reduzieren (siehe Abbildung 47).



14113

Abbildung 47: Wirkrichtungen der Maßnahmen „Unsicherheit reduzieren“

Der Zustand der Sicherheit ist nicht zu erreichen. Im Idealfall kann die Ausprägung der unsicheren Auftragszeit jedoch so weit reduziert werden, dass dieser Auftrag nicht mehr als kritisch bewertet wird (siehe Formel 33):

$$TZAU < TZAU_{krit} \quad (33)$$

$TZAU$                       *Auftragszeittreue [%]*  
 $TZAU_{krit}$                 *kritische Auftragszeittreue [%]*

**Vor- und Nachteile**

Maßnahmen zur Reduzierung der Unsicherheit bieten einige Vorteile. Die Qualität der Eingangsdaten der Termin- und Kapazitätsplanung nimmt zu. In der Folge muss die Fertigungssteuerung weniger durch unsichere Auftragszeiten bedingte Planungsfehler kompensieren. Die Kenntnis der tatsächlichen Auftragszeitstruktur ist Voraussetzung für eine korrekte logistische Positionierung des Arbeitssystems. Zuverlässigere Auftragszeiten reduzieren unsicherheitsbedingte Rückstände und somit Terminabweichungen. Die Termintreue steigt und das Risiko von Strafzahlungen nimmt ab. Zugleich werden Auslastungsverluste und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Aufträgen und Arbeitssystemen vermieden (Abschnitt 4.3.3). Der Einsatz von Zeitpuffern, Kapazitätsflexibilität und Pufferbeständen kann zurückgefahren werden. Die Minimierung der Puffer ermöglicht es, zusätzliche Optimierungspotenziale in der Planung zu heben und so die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu steigern. Eine zuverlässige Abschätzung des Kapazitätsbedarfs gestattet eine exakte Kostenrechnung. Hierdurch werden Finanzmittel für andere Investitionen frei.

Diese Maßnahmen haben jedoch auch Nachteile: Zum einen können die Informationsdefizite in der Unikatproduktion zum Teil nur bedingt reduziert werden, da der Ursprung extern bedingt ist. Zum anderen erfordern diese Maßnahmen meist umfangreiche Prozessanpassungen mit einem hohen Initialaufwand bzw. erhöhten Aufwänden in der Arbeitsplanung und vorgelagerten Aufgaben. Darum gilt es jeweils zu prüfen, ob die Maßnahmen wirtschaftlich sind.

### 5.5.2 Maßnahmen zur Integration von unsicheren Auftragszeiten

Die verbleibende Unsicherheit der Auftragszeiten ist in der Planung zu berücksichtigen. Aufgrund der geänderten Auftragszeitstruktur sind die Parameter für die Termin- und Kapazitätsplanung kritisch zu hinterfragen. Um die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten gering zu halten, sind Maßnahmen in der Produktionsplanung und -steuerung zu ergreifen. Dafür sind sowohl für die systematische als auch die zufällige Unsicherheit Maßnahmen zu identifizieren. Sie beruhen auf einem von drei Wirkmechanismen: einer Änderung der Auftragszeitstruktur, einer Änderung der Kapazitätsstruktur oder einer Änderung der Terminplanung. Um die Maßnahme und deren Umfang zu bestimmen, sind zunächst die Auswirkungen der Unsicherheit auf die logistischen Zielgrößen zu ermitteln. Hierfür ist der entwickelte Modellierungsansatz aus Kapitel 4 einzusetzen. Zum einen sind die Produktionskennlinien für die tatsächliche Auftragszeitstruktur zu berechnen. Zum anderen ist bei einer systematischen Unsicherheit der Kapazitätsbedarf zu korrigieren, damit die Zielsetzung erreicht wird. Nachfolgend werden zunächst Maßnahmen zur Integration von systematischer Unsicherheit aufgezeigt. Im Anschluss werden Maßnahmen zur Integration von zufälliger Unsicherheit vorgestellt.

#### Maßnahmen zur Integration von systematischer Unsicherheit

Es wurden drei Maßnahmen identifiziert, um einer systematischen Unsicherheit zu begegnen. Dies sind eine *Anpassung der Kapazitätsangebotsplanung*, eine *Anpassung des Kapazitätsbedarfs* und schließlich eine *Anpassung der Terminplanung*. Der Umfang der Maßnahmen kann mittels der Produktionskennlinien bestimmt werden.

*Anpassung der Kapazitätsangebotsplanung:* Tritt eine systematische Unsicherheit auf, ist das Kapazitätsangebot an den veränderten Kapazitätsbedarf anzupassen. Eine systematische Überschätzung der Auftragszeit erfordert eine Kapazitätsreduzierung, hingegen ist bei einer systematischen Unterschätzung die Kapazität zu erhöhen. Die Höhe der Unsicherheit determiniert die Dimension der Kapazitätsanpassung. Diese Maßnahme verändert die Kapazitätsstruktur, sie beeinflusst die maximale Leistung des Arbeitssystems und damit die Auslastung. Sie kann die Einhaltung der ursprünglich geplanten Durchlaufzeiten und Terminpläne ermöglichen.

*Anpassung der Beschaffungsartzuordnung:* Weiterhin kann einer systematischen Unsicherheit auch mittels einer veränderten Beschaffungsartzuordnung begegnet werden. Ihr Einsatz empfiehlt sich, wenn die unternehmenseigenen Mittel zur Kapazitätsanpassung ausgeschöpft sind. Im Fall einer systematischen Unterschätzung der Auftragszeiten übersteigt der Kapazitätsbedarf das Kapazitätsangebot. Die Fremdvergabe von Aufträgen an externe Dienstleister reduziert die Belastung des ausgewählten Arbeitssystems und verhindert auf diese Weise einen instationären Zustand. Voraussetzungen sind zum einen die entsprechende Qualifikation des externen Dienstleisters und zum anderen dessen kurzfristige Ver-

füßbarkeit. Wird bei einer systematischen Überschätzung der Auftragszeiten das Kapazitätsangebot eines Arbeitssystems nicht wie geplant ausgeschöpft und eine Minderauslastung des Arbeitssystems droht, kann es sinnvoll sein, weniger Aufträge extern fertigen zu lassen. Indem Aufträge in Eigenregie anstatt von externen Dienstleistern bearbeitet werden, steigt die Auslastung des Arbeitssystems. Diese Maßnahme beeinflusst die Auftragszeitstruktur.

*Anpassung der Terminplanung:* Tritt eine systematische Unsicherheit auf und es besteht kein oder nur ein eingeschränkter Handlungsspielraum beim Kapazitätsangebot, dann sind die Plan-Durchlaufzeiten anzupassen, um eine zuverlässige Terminplanung zu gewährleisten. Diese Maßnahme ändert weder die Kapazitäts- noch die Auftragszeitstruktur. Bei einer Überschätzung der Auftragszeiten sind Aufträge vorzuziehen. Im Gegensatz dazu sind die Plan-Durchlaufzeiten bei einer Unterschätzung zu erhöhen. Die Belegungsdauer des Arbeitssystems nimmt zu und der Durchsatz sinkt. Der Umfang der Maßnahme leitet sich unmittelbar aus der Höhe der systematischen Unsicherheit ab. In der Unikatproduktion stehen erhöhte Plan-Durchlaufzeiten jedoch meist im Widerspruch zu dem vereinbarten Liefertermin, sodass andere Maßnahmen in der Regel vorzuziehen sind.

### **Maßnahmen zur Integration von zufälligen Unsicherheiten**

Um die Auswirkungen einer zufälligen Unsicherheit zu minimieren, empfiehlt es sich, die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und ggf. die Terminplanung anzupassen. Eine bestandsregelnde Auftragsfreigabe kann bei einer Überschätzung der Auftragszeit Auslastungsverluste vermeiden. Die Kapazitätssteuerung kann durch Nutzung von Kapazitätsflexibilität Rückstände verringern, die aus einer Unterschätzung der Auftragszeit resultieren. Wenn die Kapazitätsflexibilität nicht ausreicht, um die zufällige Unsicherheit zu kompensieren, sind Lieferzeitpuffer einzuplanen. Die drei Maßnahmen werden nachfolgend erläutert.

*Rückstandsgeregelte Kapazitätssteuerung:* Um mögliche unsicherheitsbedingte Rückstände zu reduzieren, ist eine Rückstandsregelung zu implementieren. Ein unsicherheitsbedingter Rückstand entsteht, wenn Aufträge wegen unterschätzter Auftragszeiten verspätet fertiggestellt werden (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die Rückstandsregelung erhöht die Kapazität des Arbeitssystems temporär unter Nutzung der vorhandenen Kapazitätsflexibilität, wenn definierte Eingriffsgrenzen überschritten werden. Der Rückstand wird abgebaut und rückstandsbedingte Terminabweichungen im Abgang werden reduziert. Um das Potenzial der Rückstandsregelung zu realisieren, ist der tatsächliche Fertigungsfortschritt zu messen, um eine Überschreitung der Eingriffsgrenzen zuverlässig erkennen zu können. Insbesondere bei Aufträgen mit großen Auftragszeiten sind zusätzliche Meilensteine zu definieren, um potenzielle Rückstände bereits frühzeitig erkennen zu können. Die Wirkung der Rückstandsregelung ist von der Größe der Auftragszeit abhängig. Bei großen Auftragszeiten ist es unter Umständen möglich, dass ein unsicherheitsbedingter Rückstand, der aufgrund einer Unterschätzung der Plan-Auftragszeit dieses Auftrags entsteht, bis zum Plan-Abgangstermin abgebaut ist. Dies gilt für Aufträge mit kleinen Auftragszeiten nicht. Allerdings können sich die über- und unterschätzten Auftragszeiten der Aufträge bei kleinen Auftragszeiten ( $ZAU_{\text{Plan}} < KAP_{\text{Plan}}$ ) über den Tag ausgleichen, die Eingriffsgrenzen werden im Vergleich zu großen Auftragszeiten seltener überschritten.

Mögliche Formen der Kapazitätsflexibilität sind Zusatzschichten, Überstunden oder zusätzliche Arbeitssysteme mit identischer Qualifikation [Lödd16]. Technische, rechtliche und organisatorische Restriktionen limitieren den Einsatz. Beispielsweise ist die Anzahl der Mitarbeiter, die zeitgleich auf einem Bauplatz arbeiten können, begrenzt. Nachteilig ist der zusätzliche monetäre Aufwand für das Vorhalten von Kapazitätsflexibilität.

*Bestandsregelnde Auftragsfreigabe:* Um Auslastungsverluste in Folge der zufälligen Unsicherheit bei einer Überschätzung der Auftragszeit ( $ZAU_{Ist} < ZAU_{Plan}$ ) zu vermeiden (vgl. Abbildung 23b in Abschnitt 4.3.3), kann eine bestandsregelnde Auftragsfreigabe, z.B. eine Conwip-Steuerung, implementiert werden. Die Conwip-Steuerung hat sehr einfache Verfahrensregeln und gibt Aufträge vorzeitig frei, sobald eine zuvor definierte Bestandsgrenze unterschritten wird. Der Bestand in der Fertigung wird kontinuierlich mit Hilfe von sog. Conwip-Karten erfasst, welche jedem Auftrag zugeordnet sind.

*Lieferzeitpuffer:* Lieferzeitpuffer sind einzuplanen, um unsicherheitsbedingte Terminabweichungen im Abgang zu kompensieren, die nicht durch die Auftragsfreigabe bzw. die Kapazitätssteuerung aufgefangen werden können. Dazu ist nicht nur ein Lieferzeitpuffer am Ende des Auftrags einzuplanen, sondern auch kleinere Lieferzeitpuffer für die Teilaufträge, da die Unikatproduktion von konvergierenden Materialflüssen gekennzeichnet ist. Ein Lieferzeitpuffer gleicht Terminabweichungen im Abgang aus und verhindert so eine Lieferterminabweichung. Zudem werden die Teilaufträge entkoppelt, sodass mögliche Verspätungen nicht bzw. in geringerem Umfang auf nachfolgende Aufträge bzw. Arbeitssysteme übertragen werden. Die um den Lieferzeitpuffer erhöhten Durchlaufzeiten sind in der Terminplanung zu berücksichtigen.

Der gezielte Einsatz dieser Maßnahmen ermöglicht es, Termine trotz unsicherer Auftragszeiten einzuhalten. Die verschiedenen Maßnahmen, um unsichere Auftragszeiten in der PPS zu berücksichtigen, sind in Abbildung 48 dargestellt.

Unsicherheit integrieren	
Maßnahmen für systematische Unsicherheit	Maßnahmen für zufällige Unsicherheit
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung der Terminplanung</li> <li>• Anpassung der Kapazitätsangebotsplanung</li> <li>• Anpassung der Beschaffungsartzuordnung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rückstandsgeregelte Kapazitätssteuerung</li> <li>• Bestandsregelnde Auftragsfreigabe</li> <li>• Lieferzeitpuffer</li> </ul>

14114

Abbildung 48: Übersicht Maßnahmen „Unsicherheit integrieren“

### 5.5.3 Maßnahmen zur Übertragung von unsicheren Auftragszeiten auf Dritte

Eine weitere Möglichkeit unsicheren Auftragszeiten zu begegnen, stellt die Fremdvergabe von Aufträgen mit unsicheren Auftragszeiten dar. Die Ausprägung der Unsicherheit und die Auftragszeitstruktur eines Arbeitssystems können durch die Make-or-Buy-Entscheidung gezielt beeinflusst werden. Der Unikatproduzent überträgt die Risiken der unsicheren Auftragszeiten auf den Dienstleister. Die Fremdvergabe transformiert das kapazitätsbedingte

Risiko in ein zeitliches und monetäres Risiko. Dies realisiert sich beispielsweise, wenn der Dienstleister den fremdvergebenen Auftrag verspätet bereitstellt. Wird diese Maßnahme gewählt, ändert sich die Auftragszeitstruktur und damit der Verlauf der Produktionskennlinien und der interne Kapazitätsbedarf. Im Anschluss sind die Parameter der Termin- und Kapazitätsplanung anzupassen.

### 5.6 Zwischenfazit

Mit der in diesem Kapitel vorgestellten *Analyse von unsicheren Auftragszeiten* steht nun ein Werkzeug zur Verfügung, um unsicheren Auftragszeiten in der Planung der Unikatproduktion aktiv zu begegnen. Die Analyse umfasst die vier Phasen *Identifizieren unsicherer Auftragszeiten*, *Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten*, *Bewerten unsicherer Auftragszeiten* und *Konfigurieren der Produktionsplanung bei unsicheren Auftragszeiten*. Sie zeigt Aufträge und Arbeitssysteme auf, die von unsicheren Auftragszeiten betroffen sind. Die identifizierten unsicheren Auftragszeiten werden quantifiziert und die Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen ermittelt. Hierzu nutzt die Analyse die Erkenntnisse aus Kapitel 4. Die Bewertung erfolgt anhand der logistischen Zielgrößen. Die letzte Phase der Analyse umfasst ein breites Portfolio an Maßnahmen, um unsicheren Auftragszeiten und ihren Auswirkungen gezielt zu begegnen. Diese Maßnahmen setzen in den unterschiedlichen Planungs- und Steuerungsaufgaben an (Arbeitsplanung, Terminplanung und Kapazitätsplanung). Mit dem präsentierten Maßnahmenspektrum ist es möglich, sowohl systematische als auch zufällige Ausprägungen der Unsicherheit zu berücksichtigen. Hier gilt es im Einzelfall unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu entscheiden, welche Maßnahmen zu ergreifen sind. Weiterhin besteht der Bedarf, die entwickelte Analyse anhand eines Anwendungsbeispiels zu evaluieren.



## 6 Anwendungsbeispiele

Die Modellgüte der entwickelten Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion ist beispielhaft zu evaluieren, um den Nutzen der entwickelten Methode zu veranschaulichen. Dazu wird für die Auftragsicht ein fiktives Beispiel eingesetzt. Für die Arbeitssystemeicht geschieht dies anhand eines Praxisbeispiels aus der Planung der schiffbaulichen Unikatproduktion, welches zwei Arbeitssysteme umfasst.

Ziel ist es, die logistische Zielerreichung zukünftig zu verbessern, indem unsichere Auftragszeiten in der Planung berücksichtigt werden. Daher sind die zuvor beschriebenen Methoden und Werkzeuge aus Kapitel 4 und Kapitel 5 zu nutzen, um unsichere Auftragszeiten zu identifizieren, zu analysieren, zu bewerten und um Handlungsempfehlungen für die Planung abzuleiten. Unterkapitel 6.1 enthält ein fiktives Beispiel zur Evaluierung der Modellierung unsicherer Auftragszeiten aus Auftragsicht. Unterkapitel 6.2 führt den Leser in das zweite Anwendungsbeispiel ein und beschreibt die Ergebnisse der ersten Phase der Analyse. Die Unterkapitel 6.3 und 6.4 beschreiben jeweils für ein Arbeitssystem die Ergebnisse der Phasen zwei bis vier. Das Kapitel endet mit einer Evaluation der Modellierung (Unterkapitel 6.5).

### 6.1 Anwendungsbeispiel für die Auftragsicht

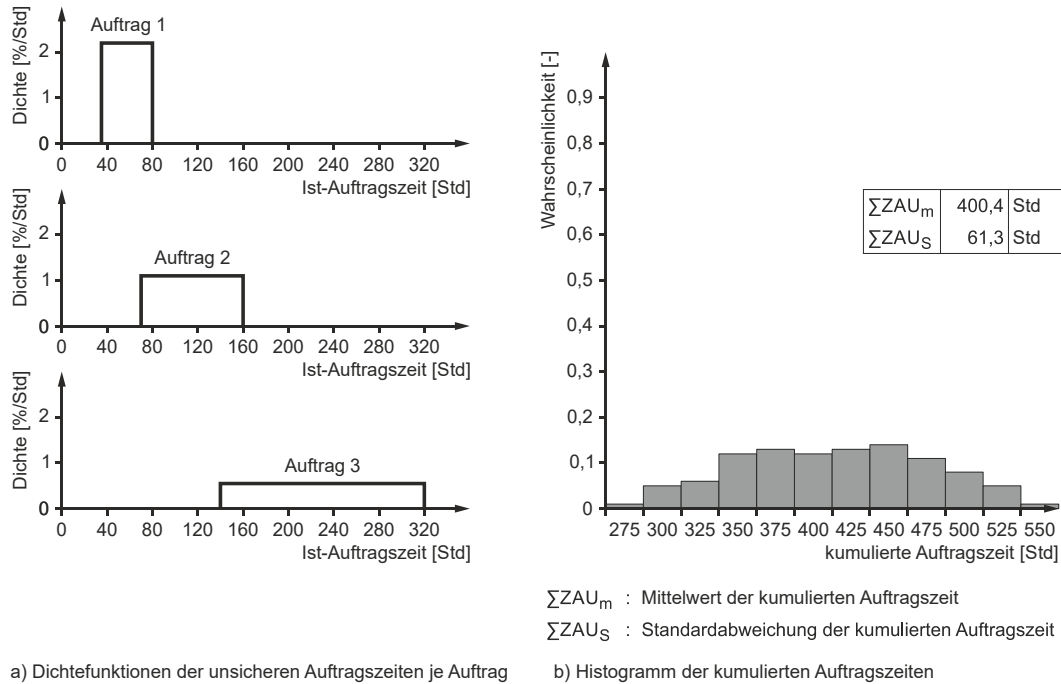
Anhand eines fiktiven Beispiels sollen die Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten beispielhaft ermittelt und bewertet werden, um die Eignung dieser Modellierung zu demonstrieren.

Untersucht werden die Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten auf den Auftrag A1 ( $ZAU_{\text{Plan}} = 100$  Std) am Arbeitssystem B. Das Arbeitssystem bearbeitet zwei weitere Aufträge (A2 und A3) mit Plan-Auftragszeiten in Höhe von 50 bzw. 200 Std. Die Aufträge dieses Arbeitssystems unterliegen einer relativen Unsicherheit ( $U_{r,m} = 15\%$  und  $U_{r,s} = 26\%$ ). Die relative Unsicherheit ist gleichverteilt. Tabelle 10 enthält die Plan-Auftragszeiten, die relative Unsicherheit sowie die minimale und maximale Ist-Auftragszeit für jeden Auftrag.

Tabelle 10: Kenngrößen der Aufträge A1 bis A3

Auftrag	$ZAU_{m,Plan}$ [Std]	$U_{r,m}$ [%]	$U_{r,s}$ [%]	$ZAU_{Ist,min}$ [Std]	$ZAU_{Ist,max}$ [Std]
A1	100	15	26	70	160
A2	50	15	26	35	80
A3	200	15	26	140	320

Die maximale Leistung des Arbeitssystems beträgt 50 Std/BKT. Der Auftrag A1 werde zum Plan-Starttermin ( $TZU = 1$ ) freigegeben, zeitgleich starte die Bearbeitung von Auftrag A3. Der Plan-Abgangstermin ist am Ende von Tag 7. Der Auftrag A2 befindet sich in der Warteschlange vor Auftrag A1. Reihenfolgevertauschungen sind nicht zulässig. Zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe von Auftrag A1 liegt kein Rückstand vor. Der Kostensatz für den zusätzlichen Kapazitätsbedarf beläuft sich auf 50 € pro Stunde. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation wird aufbauend auf den Dichtefunktionen der unsicheren Auftragszeiten das Histogramm der kumulierten Auftragszeiten berechnet (siehe Abbildung 49).



a) Dichtefunktionen der unsicheren Auftragszeiten je Auftrag

b) Histogramm der kumulierten Auftragszeiten

14115

Abbildung 49: Dichtefunktionen und Histogramm der unsicheren Auftragszeiten

Mit Hilfe der Formeln aus Abschnitt 4.3.2 werden die Histogramme der Durchlaufzeit, der Terminabweichung im Abgang und der kapazitätsbedingten Kosten ermittelt und visualisiert (siehe Abbildung 50). Für die Durchlaufzeit und die Terminabweichung sei jeweils eine positive Abweichung in Höhe von einem Tag zulässig. Die zulässige Obergrenze der Kosten betrage 1000 €. Diese Toleranzbereiche sollen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % eingehalten werden (95 %-Konfidenzintervall).

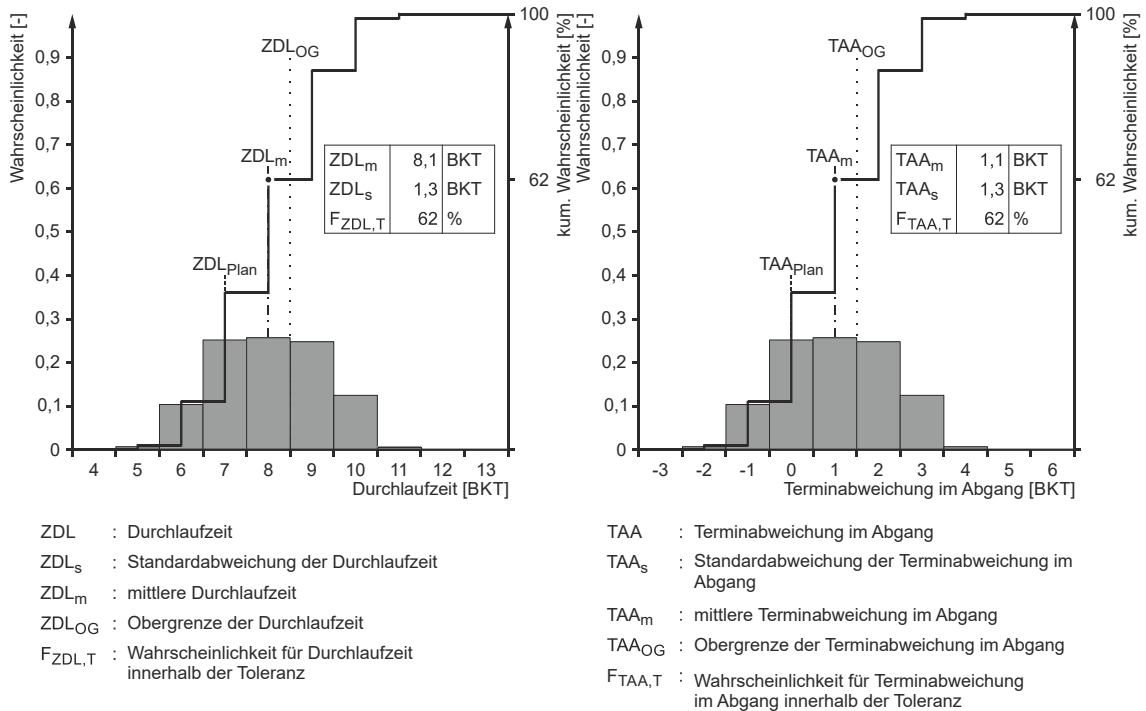
Der Erwartungswert und die Standardabweichung der Durchlaufzeit ergeben sich nach Formel 14 zu 8,1 BKT bzw. rund 1,3 BKT. Um die mittlere Terminabweichung zu bestimmen, ist zunächst der Rückstand abzuschätzen, der zum Plan-Endtermin 50 Std erreicht. Die mittlere Terminabweichung ist 1,1 BKT und die Standardabweichung der Terminabweichung beläuft sich auf 1,3 BKT.

Der Auftrag A1 erzielt die geforderte Durchlaufzeit und die maximal zulässige Terminabweichung nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 62 % und unterschreitet die geforderte Wahrscheinlichkeit. Es sind Maßnahmen zu ergreifen, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen.

Um die Kenngrößen der unsicherheitsbedingten Kosten des Auftrags A1 zu berechnen, sind zuvor die mittlere Unsicherheit und die Standardabweichung der Unsicherheit des Auftrags A1 zu ermitteln, diese betragen 15,8 Std bzw. 25,9 Std. Die mittleren Kosten bzw. die Standardabweichung der Kosten ergeben sich gemäß Formel 19 zu 790 € bzw. 1295 €. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 45 % überschreiten die unsicherheitsbedingten Kosten die maximal zulässigen Kosten in Höhe von 1000 €. Der Toleranzbereich der Kosten wird im Vergleich zur Durchlaufzeit bzw. Terminabweichung mit einer deutlich geringeren Wahrscheinlichkeit eingehalten. Dies ist auf die Gleichverteilung der Kosten zurückzuführen, während die Verteilungen der Durchlaufzeit einer Dreiecksverteilung ähneln.

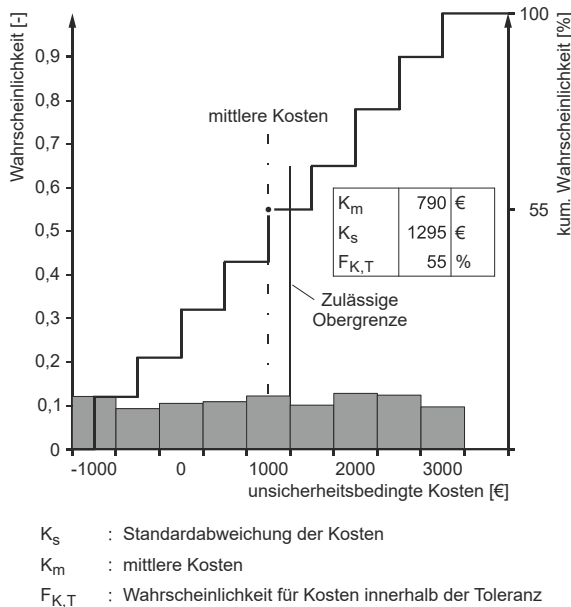
## 6. Anwendungsbeispiele

Die Differenz zwischen den Erwartungswerten und Planwerten der logistischen Zielgrößen ist auf die systematische Unsicherheit zurückzuführen. Die zufällige Unsicherheit verursacht ihrerseits die Streuung der Standardabweichung der logistischen Zielgrößen.



a) Durchlaufzeit

b) Terminabweichung im Abgang



c) Kosten

14116

Abbildung 50: Histogramme der logistischen Zielgrößen des Auftrags A1

Es besteht Handlungsbedarf. Die systematische Unsicherheit ist in der Arbeitsplanung zu beseitigen. Um die fristgerechte Fertigstellung des Auftrags trotz der zufälligen Unsicherheit sicherzustellen, sind geeignete Maßnahmen der Fertigungssteuerung zu ergreifen (vgl. hierzu Abschnitt 5.5.2).

Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, die Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen eines Auftrags zu modellieren und hieraus Handlungsbedarfe für die PPS abzuleiten. Jedoch wäre die Bewertung zahlreicher Aufträge aufwendig, sodass eine Arbeitssystemansicht hilfreich ist.

### 6.2 Beschreibung des Anwendungsbeispiels für die Arbeitssystemansicht

Unsichere Auftragszeiten sind typisch für die Auftragsabwicklung einer Werft. Die Schiffe werden aus verschiedenen Baugruppen zusammengesetzt. Betroffen sind die Aufträge eines bestimmten Baugruppentyps. Die Montage der Baugruppen erfolgt in zwei Arbeitsschritten auf zwei verschiedenen Arbeitssystemen. Die betroffenen Baugruppen werden auf den unteren Decks eines Schiffs eingebaut. Sie setzen sich aus einem Rahmen und Rohrleitungen zusammen. Der Rahmen wird aus Stahlträgern zusammengeschweißt. Die Rohrleitungen werden mit Hilfe von Haltern an den Stahlträgern des Rahmens befestigt. Die Montage der Baugruppen unterteilt sich in die zwei Montageschritte Rahmenbau und Rohrmontage. Sie erfolgt als Baustellenmontage auf acht Montagearbeitsplätzen. Jeder Montagearbeitsplatz kann einen Auftrag bearbeiten. Zu jeder Baugruppe existieren zwei Aufträge, je einer für den Rahmenbau und einer für die Rohrmontage. Die Montageschritte werden von unterschiedlichen Kapazitätsgruppen *Schiffbauer* und *Monteur* ausgeführt und werden daher als jeweils separates Arbeitssystem betrachtet.

Für beide Arbeitssysteme Rahmenbau und Rohrmontage steht jeweils ein Datensatz mit den Plan- und Rückmeldedaten von 377 Aufträgen zur Verfügung. Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich für das Arbeitssystem Rahmenbau über 350 Betriebskalendertage und für das Arbeitssystem Rohrmontage über 330 Betriebskalendertage. Jeder Auftrag ist einem von vier Schiffen (S1-S4) zugeordnet. Die Schiffe S1, S2 und S3 sind Schwesterschiffe. Ihre Konstruktion weist eine hohe Ähnlichkeit auf. Dies zeigt sich in einer vergleichbaren Anzahl an Aufträgen je Schiff (S1 = 104, S2 = 106 und S3 = 108). Die Konstruktion von Schiff S4 unterscheidet sich deutlich. Es umfasst nur 59 Aufträge. Die Aufträge eines Schiffs erstrecken sich über einen Zeitraum von circa sechs Monaten. Die Datensätze enthalten die folgenden Einträge: Projektnummer, Auftragsnummer, Start-Termin, Endtermin, Plan-Auftragszeit, Ist-Auftragszeit und Auftragszeit für Änderungen. Vereinfachend werden für die Analyse die Ist-Auftragszeit und die Auftragszeit aus Änderungen zusammengefasst. Am ersten Arbeitssystem ist die mittlere Auftragszeit der Schwesterschiffe mit Werten in Höhe von circa 85 Stunden nahezu identisch. Dagegen übertrifft die mittlere Auftragszeit des Schiffs S4 mit 103 Stunden die der anderen deutlich. Die Standardabweichung der Auftragszeiten liegt für alle Schiffe bei rund 71 Stunden. Am zweiten Arbeitssystem zeigt sich, dass die vier Schiffe mit einer mittleren Auftragszeit zwischen 93 und 101 Stunden bzw. einer Standardabweichung zwischen 79 und 85 Stunden eine sehr ähnliche Auftragsstruktur aufweisen. Die Kenngrößen der Plan- und Ist-Auftragszeitstrukturen sind in Tabelle 11 enthalten.

Tabelle 11: Plan- und Ist-Auftragszeitstruktur je Schiff an Arbeitssystem I und II

Kenngrößen	Aufträge [-]	Arbeitssystem I		Arbeitssystem II	
		ZAU <sub>m,Plan</sub> [Std]	ZAU <sub>s,Plan</sub> [Std]	ZAU <sub>m,Plan</sub> [Std]	ZAU <sub>s,Plan</sub> [Std]
Schiff 1	104	85	75	93	81
Schiff 2	106	84	70	96	79
Schiff 3	108	85	69	94	79
Schiff 4	59	103	69	101	85
Gesamt	377	88	71	95	80

An den Arbeitssystemen wird fünf Tage die Woche in zwei Schichten á 7,5 Stunden gearbeitet. Maximal zwei Mitarbeiter können einen Auftrag simultan bearbeiten. Das geplante Kapazitätsangebot je Arbeitssystem beträgt 120 Stunden pro Betriebskalendertag.

### Phase 1: Identifizieren unsicherer Auftragszeiten

Zunächst wurde der Planungsprozess für die beiden Arbeitssysteme im Gespräch mit den beteiligten Planern erfasst. Startpunkt der Planung ist der Generalplan. Hierbei handelt es sich um eine vereinfachte Konstruktionszeichnung des Schiffs. Sie umfasst die Stahlstruktur und enthält die Position struktureller Systeme wie beispielsweise die Position des Schiffsmotors oder der Wasseraufbereitung. Im unteren Deck befindet sich ein Großteil des Leitungssystems. Insbesondere der Maschinenraum ist ausrüstungsintensiv. Auf Basis des Generalplans wird eine Einteilung in kleinere, fertigbare Baugruppen vorgenommen.

Der Planer orientiert sich bei der Einteilung der Baugruppen an Referenzprojekten und berücksichtigt verschiedene Restriktionen wie zum Beispiel die maximal zulässigen Abmessungen, das Maximalgewicht oder die Transportfähigkeit.

Die Parameter Dimension, Anzahl, Durchmesser, Gewicht, Komplexität und Verlauf der verbauten Rohrleitungen beeinflussen die Auftragszeit einer Baugruppe. Während Baugruppen in der Nähe des Maschinenraums sehr ausrüstungsintensiv sind, sind Baugruppen in dezentraler Lage weniger ausrüstungsintensiv. Sie haben in der Regel eine geringe Auftragszeit.

Zum Zeitpunkt der Baugruppeneinteilung liegen nur unvollständige Konstruktionsdaten vor. Die Eingangsinformation zur Bestimmung der Auftragszeit ist unvollständig. Zudem kommt es im Verlauf der voranschreitenden Planung häufig zu Änderungen der Rohrverläufe. Der erfahrene Anwender schätzt unter Berücksichtigung der Lage und der in diesem Bereich verbauten Systeme die Auftragszeit ab. Als wesentlicher Treiber für die Unsicherheit der Auftragszeiten wurde das Informationsdefizit über die tatsächliche Beschaffenheit der Baugruppen identifiziert.

## 6.3 Arbeitssystem I „Rahmenbau“

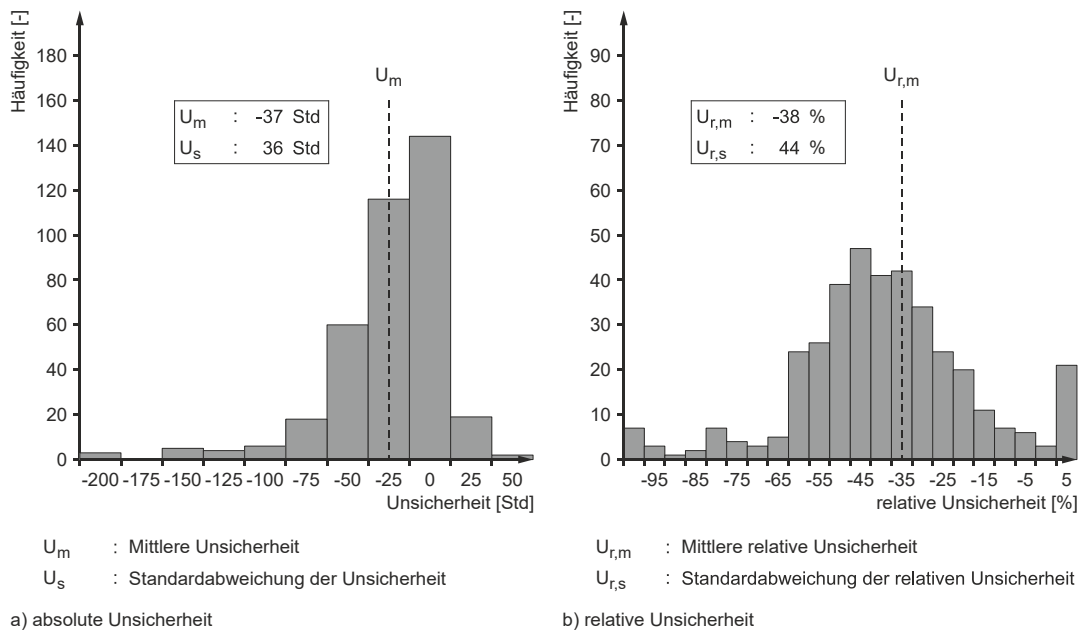
### 6.3.1 Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten

Ziel dieses Abschnitts ist es, die Ausprägung der Unsicherheit an diesem Arbeitssystem zu quantifizieren und Muster zu erkennen, um diese Erkenntnisse in die Planung zukünftiger Aufträge einfließen zu lassen. Zuerst wird die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten

auf Ebene des Arbeitssystems bestimmt. Außerdem werden hier bereits die Art der Unsicherheit und sofern möglich Klassen von Auftragszeiten ermittelt. Um mögliche Unterschiede in der Ausprägung der Unsicherheit in Abhängigkeit des Schiffs zu erkennen, wird die Ausprägung der Unsicherheit je Schiff bestimmt. Im Anschluss werden die Ausprägungen der Schiffe miteinander verglichen.

### Unsichere Auftragszeiten an Arbeitssystem I

Um einen ersten Eindruck über die Ausprägung der Unsicherheit zu erhalten, werden die absolute und die relative Unsicherheit als Histogramm dargestellt (siehe Abbildung 51). 354 Aufträge wurden überschätzt, 21 Aufträge wurden unterschätzt und zwei Aufträge sind ohne Unsicherheit.



14117

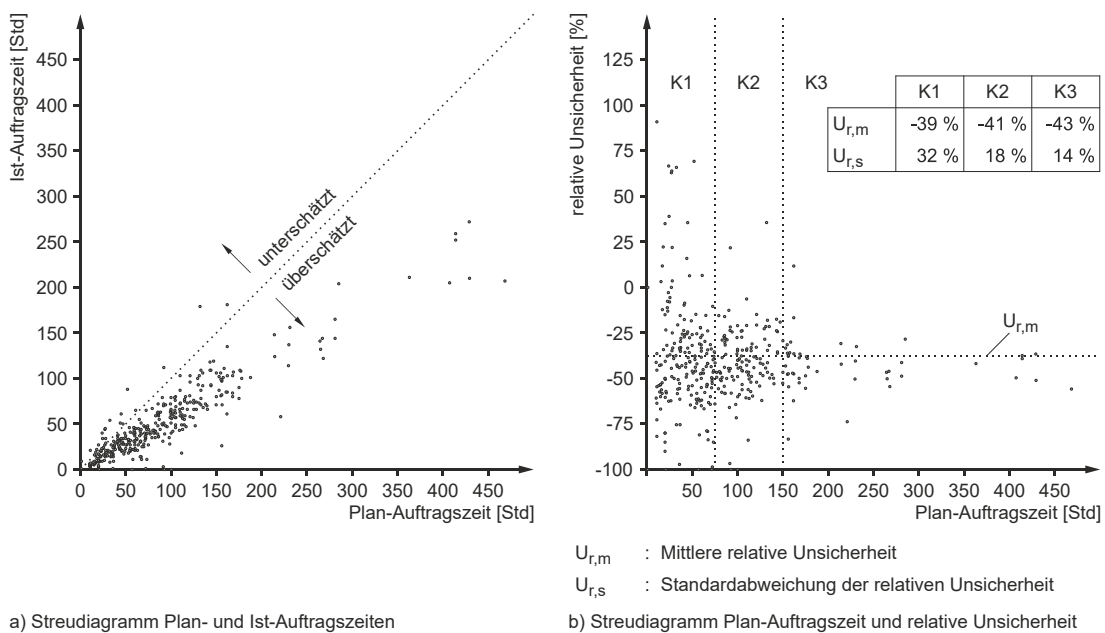
Abbildung 51: Histogramme der Unsicherheit an Arbeitssystem I

Zusätzlich wird die Ausprägung der Unsicherheit anhand von Kennzahlen quantifiziert. Die mittlere Unsicherheit beläuft sich auf -37 Stunden bzw. die mittlere relative Unsicherheit beträgt -38 %. Die Auftragszeiten werden systematisch überschätzt. Im Untersuchungszeitraum summieren sich die unsicheren Auftragszeiten dieses Arbeitssystems auf eine kumulierte Unsicherheit von -13.771 Stunden. Die negative systematische Unsicherheit ist ein Indiz für überdimensionierte Sicherheitsfaktoren in der Arbeitsplanung. Dies kann zu einem Kapazitätsüberangebot bzw. zu negativen Terminabweichungen führen, deshalb empfiehlt es sich, Anpassungen in der Arbeitsplanung und der darauf aufbauenden Termin- und Kapazitätsplanung in Betracht zu ziehen.

Weiterhin gilt es festzustellen, ob an diesem Arbeitssystem auch eine zufällige Unsicherheit vorliegt. Die Streuung der Unsicherheit beläuft sich auf 36 Stunden bzw. die Streuung der relativen Unsicherheit beträgt 44 %. Es liegt somit eine ausgeprägte zufällige Unsicherheit vor. Das Minimum der Unsicherheit liegt bei -262 Stunden, hingegen beträgt das Maximum der Unsicherheit 47 Stunden.

Eine zufällige Unsicherheit ist je nach Konfiguration der Produktionsplanung und -steuerung eine besondere Herausforderung in der Auftragsabwicklung. Deshalb gilt es im Anschluss an diesen Abschnitt zu prüfen, wie das Arbeitssystem dieser zufälligen Unsicherheit begegnen kann.

Nachdem die Ausprägung der zufälligen und systematischen Unsicherheit erfasst ist, sind zusätzlich der Typ der Unsicherheit und Klassen von Aufträgen mit vergleichbarer Ausprägung der Unsicherheit zu bestimmen. Dies erleichtert später die Auswahl von Maßnahmen zum Umgang mit unsicheren Auftragszeiten. Da in diesem Fall keine weiteren Parameter zur Verfügung stehen, werden die Aufträge anhand der Plan-Auftragszeiten in Klassen eingeteilt. Zwei Streudiagramme unterstützen die detaillierte Analyse der Ausprägung der Unsicherheit. Hier sind die Ist-Auftragszeiten bzw. die relative Unsicherheit über die Plan-Auftragszeit des jeweiligen Auftrags aufgetragen (siehe Abbildung 52).



14118

Abbildung 52: Streudiagramm Plan-Ist-Auftragszeiten (a) und Streudiagramm relative Unsicherheit und Plan-Auftragszeit (b) für Arbeitssystem I

In Abbildung 52a nimmt der Abstand zur Winkelhalbierenden und damit die Unsicherheit für Aufträge mit großen Auftragszeiten zu. Es wird daher angenommen, dass eine auftragszeitabhängige Unsicherheit vorliegt. Anhand der Abbildung 52b lässt sich ein weiteres Muster in der Ausprägung der relativen Unsicherheit erkennen. Für große Plan-Auftragszeiten sinkt die Streuung der relativen Unsicherheit. Die Aufträge konzentrieren sich mit zunehmender Plan-Auftragszeit rund um die mittlere relative Unsicherheit (Linie  $U_{r,m}$ ). Die zufällige Unsicherheit korreliert also negativ mit der Plan-Auftragszeit. Weiterhin gilt es zu prüfen, ob verschiedene Klassen von Unsicherheit vorliegen. Hierzu wird untersucht, bei welchen Plan-Auftragszeiten die vertikale Ausdehnung der Punkte eine signifikante Änderung erfährt. Daraus ergeben sich drei Klassen K1, K2 und K3. Für jede Klasse wurden separat die Kenngrößen der relativen Unsicherheit ermittelt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Kenngrößen je Auftragszeitklasse an Arbeitssystem I

Klasse	Klasse der Plan-Auftragszeiten	ZAU <sub>m,Plan</sub> [Std]	ZAU <sub>s,Plan</sub> [Std]	U <sub>r,m</sub> [%]	U <sub>r,s</sub> [%]	Anteil [%]
1	< 75 Std	42	20	-39	32	53
2	75-150 Std	108	20	-41	18	34
3	> 150 Std	224	91	-43	14	13

Die Streuungen unterscheiden sich deutlich je Klasse. Für die geringere zufällige relative Unsicherheit bei großen Plan-Auftragszeiten kommen zwei mögliche Ursachen in Betracht: Erstens bewirken umfangreichere Planungsaktivitäten bzw. eine größere Sorgfalt eine höhere Qualität der Auftragszeitermittlung. Zweitens gibt es einen Kompensationseffekt. Indem verschiedene Teilaufträge zu einem Auftrag zusammengefasst werden, heben sich die positive und negative Unsicherheit der Auftragszeiten der Teilaufträge gegenseitig auf.

Auch gilt es zu klären, ob sich der unterschiedliche Unikatcharakter der Schiffe in der Ausprägung der Unsicherheit widerspiegelt. Schließlich bestehen zwischen den Schwesterschiffen (S1, S2 und S3) und dem Schiff S4 deutliche Unterschiede sowohl in der Anzahl der Aufträge als auch der Auftragszeitstruktur. Um dieser Frage nachzugehen, werden die Kenngrößen der Unsicherheit jeweils für die Aufträge eines Schiffs ermittelt. Die Kenngrößen sind in Tabelle 13 dokumentiert.

Tabelle 13: Kenngrößen der Unsicherheit je Schiff an Arbeitssystem I

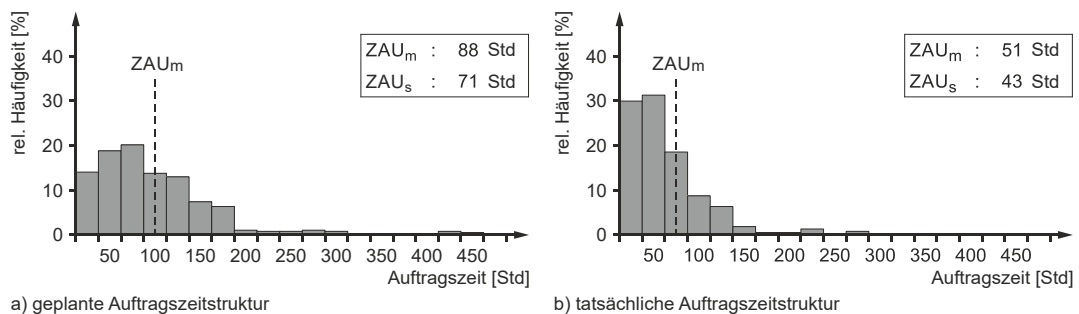
Kenngrößen	Schiff 1	Schiff 2	Schiff 3	Schiff 4
U <sub>m</sub> [Std]	-38	-33	-38	-38
U <sub>s</sub> [Std]	40	30	36	38
U <sub>max</sub> [Std]	22	17	47	36
U <sub>min</sub> [Std]	-261	-157	-219	-163
Kum. U [Std]	-3975	-3495	-4051	-2250
U <sub>r,m</sub> [%]	<b>-42</b>	<b>-39</b>	<b>-36</b>	<b>-34</b>
U <sub>r,s</sub> [%]	<b>27</b>	<b>25</b>	<b>71</b>	<b>26</b>
U <sub>r,max</sub> [%]	91	67	650	69
U <sub>r,min</sub> [%]	-100	-100	-100	-74

Der Vergleich der Kennzahlen zeigt eine große Übereinstimmung. Die Aufträge aller vier Schiffe unterliegen einer zufälligen, systematischen auftragszeitabhängigen Unsicherheit, die ähnlich stark ausgeprägt ist (fett markiert in Tabelle 13). Die gewichtete kumulierte Unsicherheit ist für das Schiff S4 am geringsten ausgeprägt. Für dieses Arbeitssystem konnte die Annahme, dass der übergeordnete Auftrag die Unsicherheit beeinflusst, nicht verifiziert werden. Der Vergleich der drei Schwesterschiffe ergibt eine minimale kumulierte Unsicherheit bei dem zuletzt gebauten Schiff S2. Die relative Unsicherheit [U<sub>r,m</sub> = 39 %; U<sub>r,s</sub> = 25 %] ist bei Schiff S2 am geringsten ausgeprägt. Dieses Schiff wurde nach den beiden anderen Schwesterschiffen gefertigt. Es ist anzunehmen, dass das verbesserte Planungsergebnis auf Erfahrungswissen der zwei Vorgängerschiffe zurückzuführen ist. Auffällig ist zudem die

große Standardabweichung von Schiff S3, diese ist auf einen einzelnen Auftrag zurückzuführen. Wird der Datensatz von Schiff S3 bereinigt, ergibt sich ein Wert von 25 % für die Standardabweichung der relativen Unsicherheit.

### Auswirkungen auf die Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem I

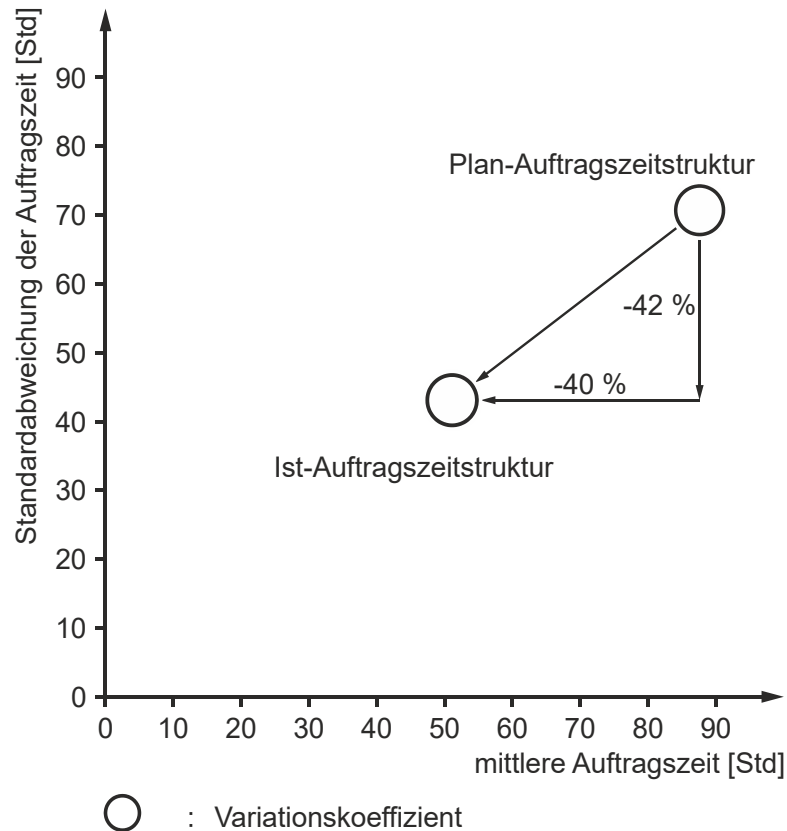
Da Unsicherheiten in großem Umfang identifiziert werden konnten, gilt es die Auswirkung auf die Auftragszeitstruktur zu prüfen. Sowohl die mittlere Auftragszeit als auch die Streuung der Auftragszeit sind in der Realität mit 51 bzw. 43 Stunden deutlich geringer ausgeprägt als dies ursprünglich mit 88 bzw. 71 Stunden geplant war. Abbildung 53 veranschaulicht den Unterschied zwischen der geplanten Auftragszeitstruktur (a) und der tatsächlichen Auftragszeitstruktur (b) als Histogramme. Die Veränderung der Auftragszeitstruktur manifestiert sich in dem Histogramm in Gestalt einer deutlichen Konzentration der Aufträge im Bereich von Auftragszeiten kleiner 100 Stunden und einem Wertebereich von 0 bis 272 Stunden gegenüber einem Wertebereich von 0 bis 468 Stunden im Plan-Szenario.



14119

Abbildung 53: Histogramme der Plan-Auftragszeiten (a) und der Ist-Auftragszeiten (b) an Arbeitssystem I

Um den Einfluss der Unsicherheit auf die Auftragszeitstruktur zu visualisieren, werden die Plan- und Ist-Werte der Auftragszeitstruktur als Kreise in ein Streudiagramm eingetragen (Abbildung 54). Der Variationskoeffizient wird durch den Kreisdurchmesser dargestellt. Die mittlere Auftragszeit und die Standardabweichung der Auftragszeit werden um rund 40 bzw. 42 % deutlich überschätzt, während der Variationskoeffizient nahezu identisch ist.



14120

Abbildung 54: Änderung der Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem I durch Unsicherheit

Die Auftragszeitstruktur bildet die Grundlage für die Plan-Parameter der Termin- und Kapazitätsplanung. Ursprünglich getroffene Annahmen hinsichtlich der Auftragszeitstruktur sind hinfällig. In Anbetracht dieser neuen Ausgangslage muss der Anwender die Termin- und Kapazitätsplanung überarbeiten, um eine optimale logistische Zielerreichung zu gewährleisten.

Die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten an diesem Arbeitssystem stellt sich zusammenfassend wie folgt dar:

- Die Auftragszeiten werden systematisch überschätzt ( $U_{r,m} < 0$ ).
- Die systematische Unsicherheit nimmt mit der Plan-Auftragszeit zu, während die systematische relative Unsicherheit nahezu konstant ist.
- Die zufällige relative Unsicherheit nimmt mit zunehmender Plan-Auftragszeit ab.
- Es existieren drei Klassen von unsicheren Auftragszeiten an diesem Arbeitssystem, die sich in der Höhe der zufälligen Unsicherheit unterscheiden.
- Die Auftragszeitstruktur wird signifikant durch die unsicheren Auftragszeiten beeinflusst. Aufgrund der unsicheren Auftragszeiten sinken sowohl die mittlere Auftragszeit um  $-40\%$  als auch die Streuung der Auftragszeit um  $-42\%$  spürbar. Der Variationskoeffizient bleibt nahezu unverändert.

### Berechnen einer realitätsnahen Auftragszeitstruktur für Arbeitssystem I

In Abschnitt 4.3.3 wurde gezeigt, wie der Anwender mit Hilfe von Plan-Daten und einer ersten Abschätzung der Unsicherheit eine realitätsnahe Auftragszeitstruktur ermitteln kann.

Hierbei wird anhand von Vergleichskriterien bzw. Erfahrungswerten eine Ausprägung der Unsicherheit für verschiedene Klassen [Plan-Auftragszeit oder Schiff] von Aufträgen gewählt. Dann wird die Auftragszeitstruktur je Klasse berechnet (vgl. Formel 23 und 24 in Abschnitt 4.3.3). Im Anschluss wird die gemeinsame Auftragszeitstruktur über alle Klassen ermittelt (siehe Formeln 25 und 26 aus Abschnitt 4.3.3). Das Vorgehen soll jetzt für die Aufträge von Arbeitssystem I genutzt werden. Damit soll verdeutlicht werden, wie Produktionskennlinien auch in der Unikatproduktion in der frühen Phase der Produktionsplanung eingesetzt werden können.

Die Arbeitsplanung des *Arbeitssystems I Rahmenbau* ist zwar von einer systematischen und zufälligen relativen Unsicherheit betroffen, jedoch wird angenommen, die Ausprägung der relativen Unsicherheit sei bekannt. Während die systematische relative Unsicherheit für alle Aufträge mit 40 % angesetzt wird, ist die zufällige relative Unsicherheit für die drei Klassen der Plan-Auftragszeiten mit den Standardabweichungen [ $K_{75} = 30\%$ ;  $K_{150} = 20\%$ ;  $K_{>150} = 10\%$ ] unterschiedlich ausgeprägt. Mit diesem Wissen und den bekannten geplanten Auftragszeitverteilungen je Klasse der Plan-Auftragszeiten werden die realitätsnahen Auftragszeitverteilungen je Klasse ermittelt. Diese Werte und die tatsächlichen Parameter der Auftragszeitverteilungen sind in Tabelle 14 einander gegenübergestellt. Bereits hier zeichnet sich eine signifikante Verbesserung der Planungsqualität ab.

Tabelle 14: Tatsächliche und berechnete Auftragszeitstruktur je Klasse an Arbeitssystem I

Klasse	Klasse der Plan-Auftragszeiten	$ZAU_{m,Ist}$ [Std]	$ZAU_{m,VB}$ [Std]	$ZAU_{s,Ist}$ [Std]	$ZAU_{s,VB}$ [Std]	Anteil [%]
1	< 75 Std	25	26	15	18	53
2	75-150 Std	64	64	25	23	34
3	>150 Std	126	128	55	61	13

Aus den Auftragszeitverteilungen der Klassen lässt sich anhand der Formeln 25 und 26 die Auftragszeitstruktur des Arbeitssystems berechnen. Sie hat eine mittlere Auftragszeit von 51 Std und eine Standardabweichung von 43 Std. Diese berechnete Auftragszeitstruktur ist nahezu identisch mit der Ist-Auftragszeitstruktur ( $ZAU_{m,Ist} = 53$  Std bzw.  $ZAU_{s,Ist} = 46$  Std). Die guten Näherungswerte der Auftragszeitstruktur beruhen auf der Prämisse, dass die systematische und die zufällige relative Unsicherheit und die Klassen der unsicheren Aufträge bekannt sind. In der Praxis ist diese Prämisse häufig nicht erfüllt, zumal die Auftragszeiten dann bereits in der Vorgabezeitermittlung angepasst werden sollten, wenn die systematische Unsicherheit zu diesem Zeitpunkt bekannt wäre. Darum empfiehlt es sich für die Praxis, eine Regelschleife zu implementieren. Die Unsicherheit der Aufträge an einem Arbeitssystem ist kontinuierlich zu messen, um die Kenngrößen der Unsicherheit rollierend anzupassen bzw. die systematische Unsicherheit zu beseitigen. Aus Sicht der Kapazitätsplanung wird der Kapazitätsbedarf bereits ausreichend gut bestimmt. Aufgrund der guten Näherungswerte für die Auftragszeitstruktur empfiehlt sich der Einsatz dieses Verfahrens (siehe Tabelle 15). Es wurde somit gezeigt, dass durch eine differenzierte Betrachtung der Unsicherheit je nach Auftragszeitklasse eine erhebliche Verbesserung der Planungsqualität erzielt werden kann. Dem Anwender steht mit diesem Verfahren ein geeignetes Werkzeug zur Verfügung, um unsicheren Auftragszeiten zu begegnen. Im Anschluss können die Produktionskennlinien für die berechnete Auftragszeitstruktur ermittelt werden und eine logistische Positionierung festgelegt werden.

Tabelle 15: Geplante, reale und berechnete Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem I

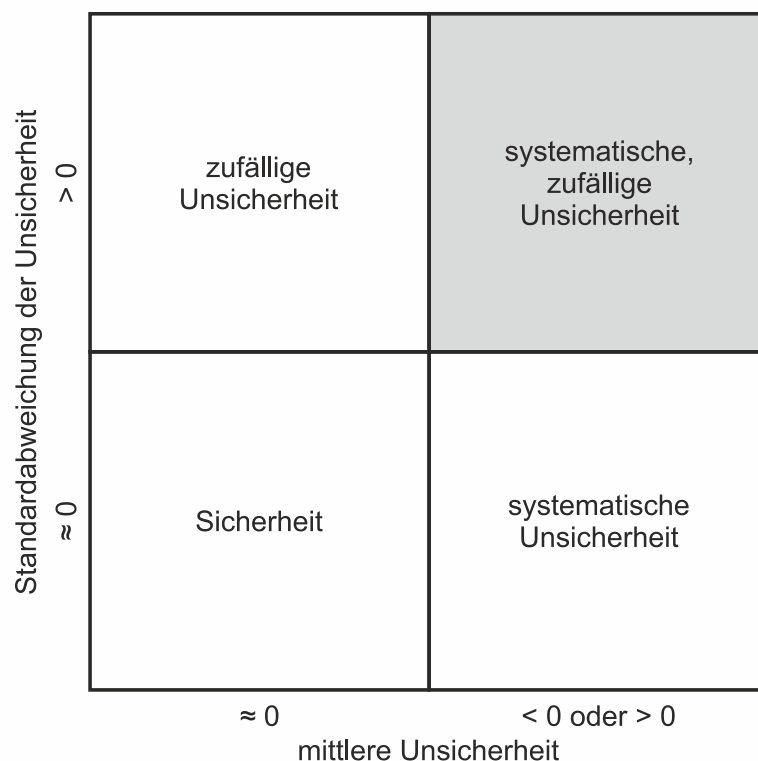
Szenario	ZAU <sub>m</sub> [Std]	ZAU <sub>s</sub> [Std]	ZAU <sub>v</sub> [-]
Plan	88	71	0,81
Ist	51	43	0,84
Berechnet	53	46	0,86

### 6.3.2 Bewerten unsicherer Auftragszeiten

Ziel ist es, notwendige Handlungsfelder in der Arbeitsplanung sowie der Termin- und Kapazitätsplanung aufzuzeigen. Die Bewertung der unsicheren Auftragszeiten erfolgt für die Arbeitsplanung auch aus Sicht der Termin- und Kapazitätsplanung. Dabei wird die Fähigkeit des Arbeitssystems berücksichtigt, unsicheren Auftragszeiten zu begegnen. Der Fokus liegt auf der Arbeitssystemseite. Zentrale Elemente bilden dabei die in Kapitel 5.4. beschriebenen Werkzeuge, die Produktionskennlinien und das Konzept der Kapazitätsflexibilität aufgreifen.

#### Bewertung der Arbeitsplanung für Arbeitssystem I

Um die Ausprägung der Unsicherheit zunächst allgemein zu beurteilen (vgl. Abschnitt 5.4.1), wird der zutreffende Quadrant in der Matrix der Unsicherheit markiert. Aufgrund der ausgeprägten systematischen negativen und zufälligen Unsicherheit der Aufträge ist das Arbeitssystem derzeit im oberen rechten Quadranten einzuordnen (siehe Abbildung 55).



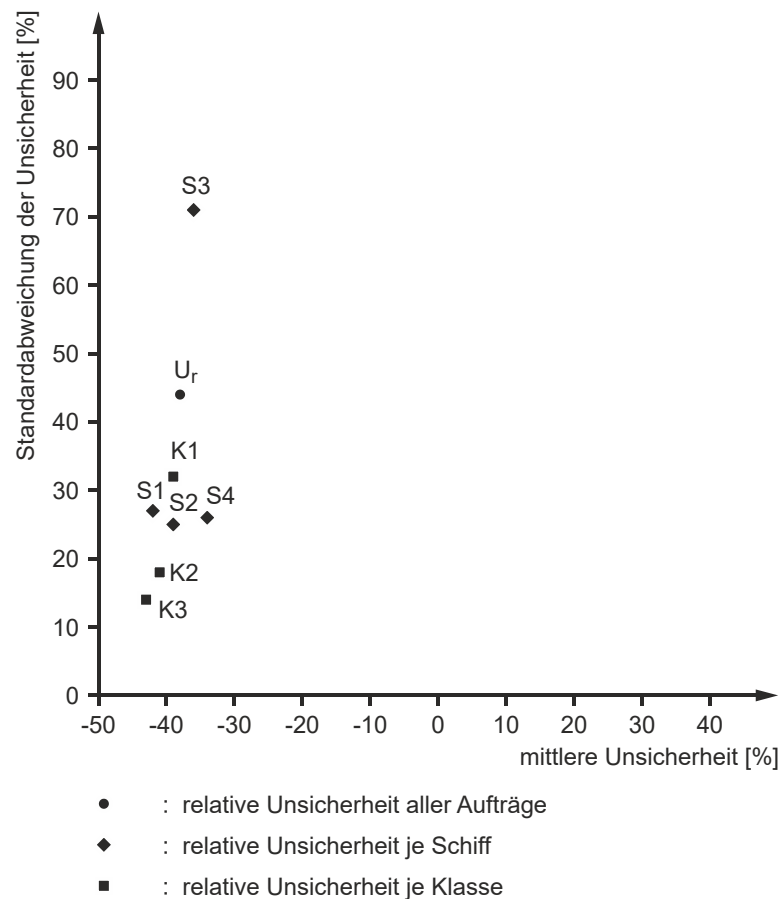
14121

Abbildung 55: Szenario der Unsicherheit an Arbeitssystem I

Die Arbeitsplanung liefert keine verlässlichen Plan-Auftragszeiten. Es besteht akuter Handlungsbedarf, die Arbeitsplanung anzupassen, um die systematische Unsicherheit zu beseitigen.

Für eine detaillierte Analyse der Qualität der Arbeitsplanung werden die Kenngrößen der relativen Unsicherheit des Arbeitssystems ( $U_r$ ), der Aufträge je Schiff (S1 bis S4) und der Klassen der Plan-Auftragszeit (K1-K3) in ein Koordinatensystem eingetragen (siehe Abbildung 56). Die mittlere relative Unsicherheit bewegt sich für alle dargestellten Kennwerte in einem vergleichbaren Umfang. Eine Überschätzung von im Mittel 38 % wird als so groß bewertet, dass eine Anpassung der Termin- bzw. Kapazitätsplanung geboten ist.

Die zufällige relative Unsicherheit ist bei Aufträgen mit kleinen Plan-Auftragszeiten signifikant stärker ausgeprägt (siehe Punkt K1). Bereits für Aufträge der Klasse K2 ( $ZAU_p \leq 100$  Stunden) nimmt die Standardabweichung der relativen Unsicherheit auf 23 % ab. Analog gilt dies für die zufällige relative Unsicherheit der Aufträge des Schiffs S3.



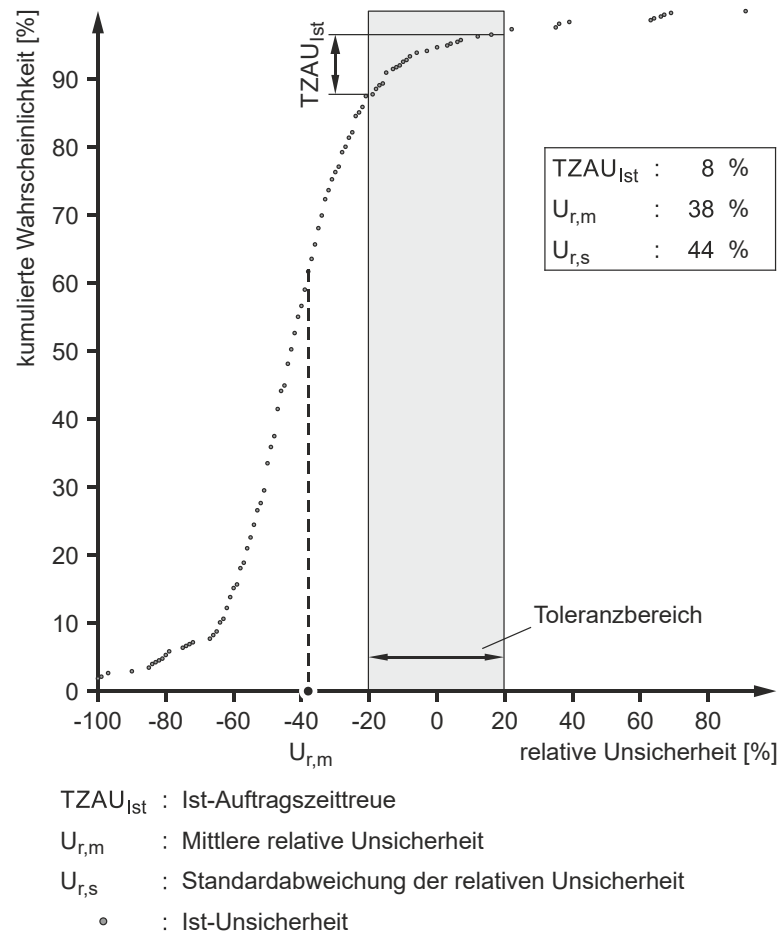
14122

Abbildung 56: Bewertung der Ausprägung der Unsicherheit an Arbeitssystem I

Es besteht somit akuter Handlungsbedarf, beiden Ausprägungen der Unsicherheit zu begegnen.

*Bewertung der Qualität der Arbeitsplanung mittels Auftragszeittreue:* Die Arbeitsplanung erreicht für dieses Arbeitssystem nur eine Auftragszeittreue von 8 % bei einem Toleranzbereich von Plus und Minus 20 % der Auftragszeit (siehe Abbildung 57). Als Grundlage für

eine zuverlässige Termin- und Kapazitätsplanung sind diese Daten nur eingeschränkt geeignet. Ohne Eingriffe der Fertigungssteuerung sind Terminabweichungen vorprogrammiert. Es besteht akuter Handlungsbedarf, die Arbeitsplanung zu verbessern und anzupassen.



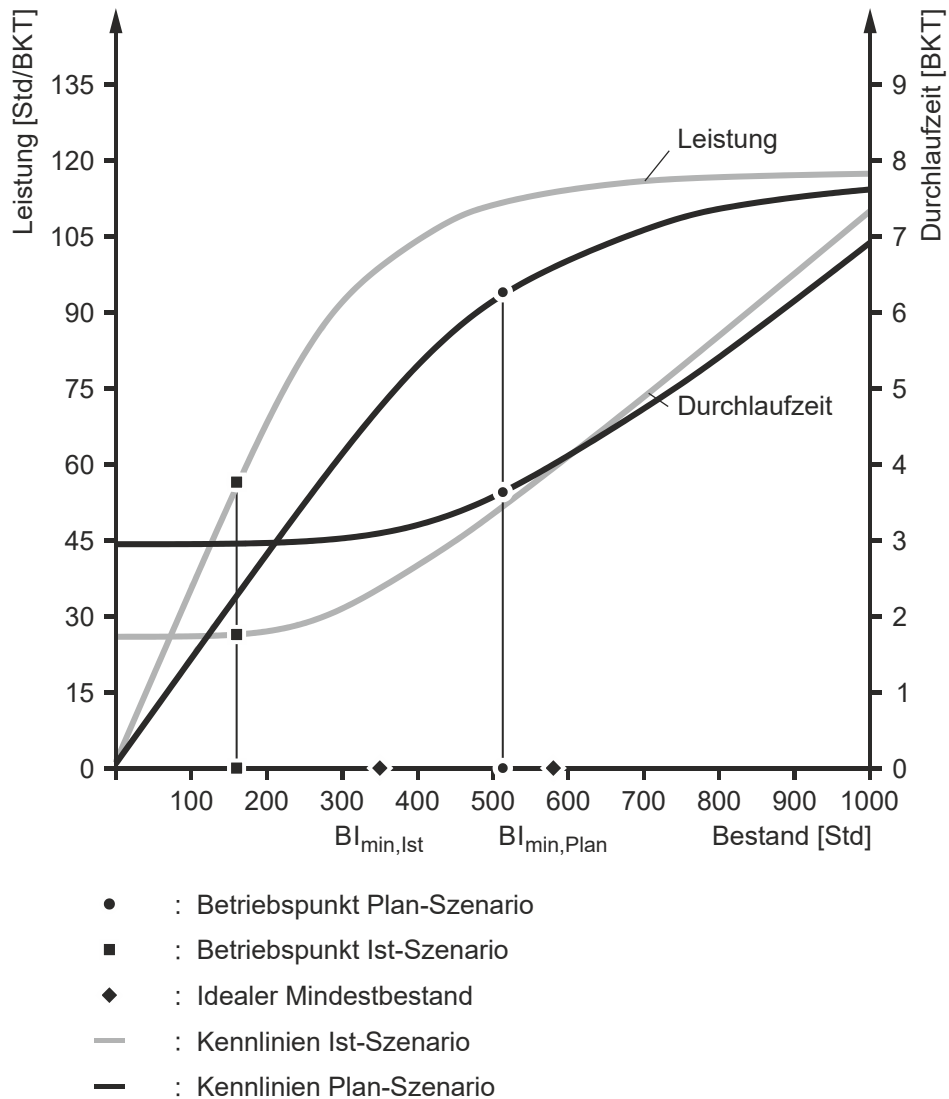
14123

Abbildung 57: Auftragszeittreue an Arbeitssystem I

### Bewertung der Termin- und Kapazitätsplanung mittels der Produktionskennlinien

Indem die Produktionskennlinien für die geplante und die tatsächliche Auftragsstruktur berechnet und visualisiert werden (Abbildung 58), können die Auswirkungen der Unsicherheit auf die logistischen Zielgrößen dargestellt werden. Der Handlungsbedarf für die Termin- und Kapazitätsplanung lässt sich daraus ableiten.

Zunächst wird der ideale Mindestbestand für das Plan- und Ist-Szenario gemäß Formel 7 aus Abschnitt 2.3.2 berechnet. Aufgrund der geringen Auftragszeittreue und insbesondere aufgrund der systematischen Überschätzung beläuft sich der tatsächliche ideale Mindestbestand nur auf 350 Stunden statt der ursprünglich angesetzt 579 Stunden. Dann werden die Kennlinien der Leistung und der Durchlaufzeit mit Hilfe der Näherungsgleichungen nach Nyhuis berechnet (siehe Abschnitt 2.3.2 und Anhang Teil B). Hierbei gilt die Annahme, dass das maximale Kapazitätsangebot (120 Std/BKT) unverändert bleibt. Die Datentabellen sind im Anhang hinterlegt (siehe Anhang Teil C). Die verschiedenen Auftragszeitstrukturen schlagen sich in den Verläufen der Produktionskennlinien nieder.



14124

Abbildung 58: Produktionskennlinien für das Arbeitssystem I

Um die Positionierung der beiden Szenarien miteinander zu vergleichen, wird jeweils der Betriebspunkt bestimmt (siehe Abbildung 58). Da weder Plan- und Rückmeldedaten für die Durchlaufzeiten der Aufträge noch der geplante bzw. tatsächliche mittlere Bestand verfügbar sind, werden die Betriebspunkte anhand der mittleren Leistung ermittelt. Für beide Szenarien sind der Abgang und die Dauer des Untersuchungszeitraums (350 BKT) bekannt. Die geplante mittlere Leistung beträgt rund 94 Std/BKT, tatsächlich wurde eine mittlere Leistung in Höhe von 55 Std/BKT erzielt. Statt einer Auslastung von 78 % wird so nur eine Auslastung 46 % erreicht. Der mittlere Bestand wird durch Umformung der Formel 6 (Abschnitt 2.3.2) berechnet. Der mittlere Bestand für die Planung und das Ist-Szenario belaufen sich auf 516 bzw. 162 Stunden. Die mittlere Durchlaufzeit sinkt von 3,6 auf 1,7 BKT. Im Ist-Szenario ist das Arbeitssystem im Unterlastbereich positioniert. Dies ist wenig sinnvoll. Es ist davon auszugehen, dass das Unternehmen diesen Zustand erkannt und entsprechend gegengesteuert hat, indem andere Aufträge vorgezogen wurden oder die überschüssige Kapazität auf andere Arbeitssysteme verteilt wurde.

Für die Termin- und Kapazitätsplanung lassen sich die folgenden Aussagen ableiten:

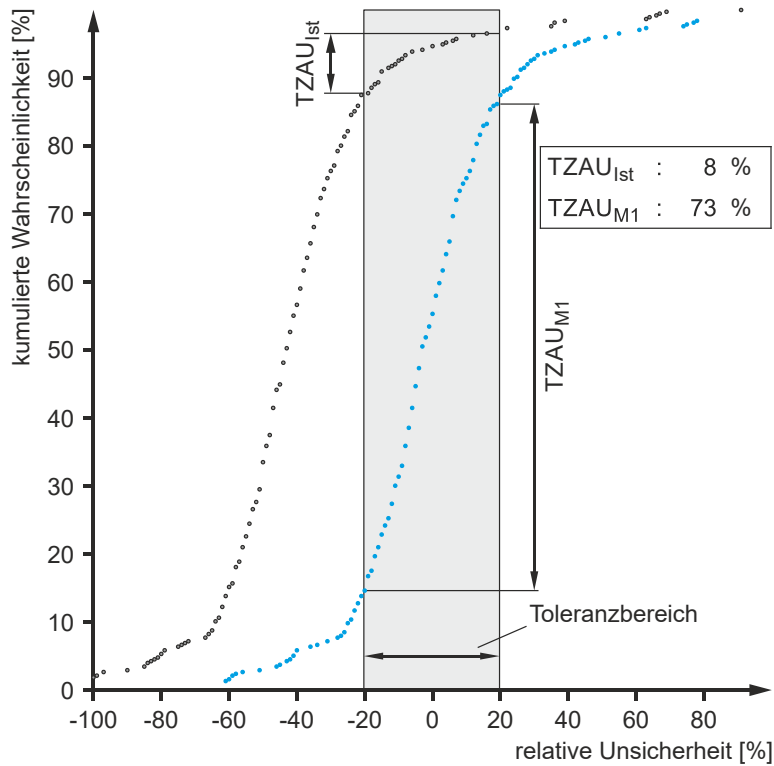
1. Der Kapazitätsbedarf wurde deutlich überschätzt, sodass ein Überangebot an Kapazität besteht und die Auslastung des Arbeitssystems deutlich geringer ist als geplant. Es empfiehlt sich, die Kapazitätsplanung anzupassen, um eine bessere Auslastung zu erzielen.
2. Die mittlere Durchlaufzeit ist deutlich geringer als geplant, sodass diese eine negative Terminabweichung erfährt. Es handelt sich hierbei um implizite Zeitpuffer, die es zu entfernen gilt. Die Terminplanung ist zu überarbeiten.

### **6.3.3 Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten**

Die Bewertung der unsicheren Auftragszeiten an diesem Arbeitssystem hat einen akuten Handlungsbedarf aufgezeigt. Sowohl systematische als auch zufällige Unsicherheiten sind bereits in der Planung durch geeignete Maßnahmen zu adressieren, um die Planungsqualität von zukünftigen Aufträgen zu erhöhen. Ausgehend von der Bewertung werden verschiedene Maßnahmen vorgestellt. Sie untergliedern sich in Maßnahmen gegen die systematische bzw. zufällige Unsicherheit.

#### **Maßnahmen gegen die systematische Unsicherheit**

*Arbeitsplanung anpassen:* Die Plan-Auftragszeiten werden in der Arbeitsplanung um den Korrekturfaktor der jeweiligen Auftragszeitklasse gesenkt, dadurch wird die systematische Unsicherheit nahezu vollständig beseitigt ( $U_m = 0$ ). Die Auftragszeittreue steigt von 8 % auf 73 % (siehe Abbildung 59). Nach der Anpassung der Plan-Parameter beträgt die maximale positive bzw. negative Unsicherheit 102 bzw. -67 Stunden. Die Korrektur der systematischen Unsicherheit führt bei 161 Aufträgen zu einer größeren positiven Abweichung zwischen Plan- und Ist-Auftragszeit.

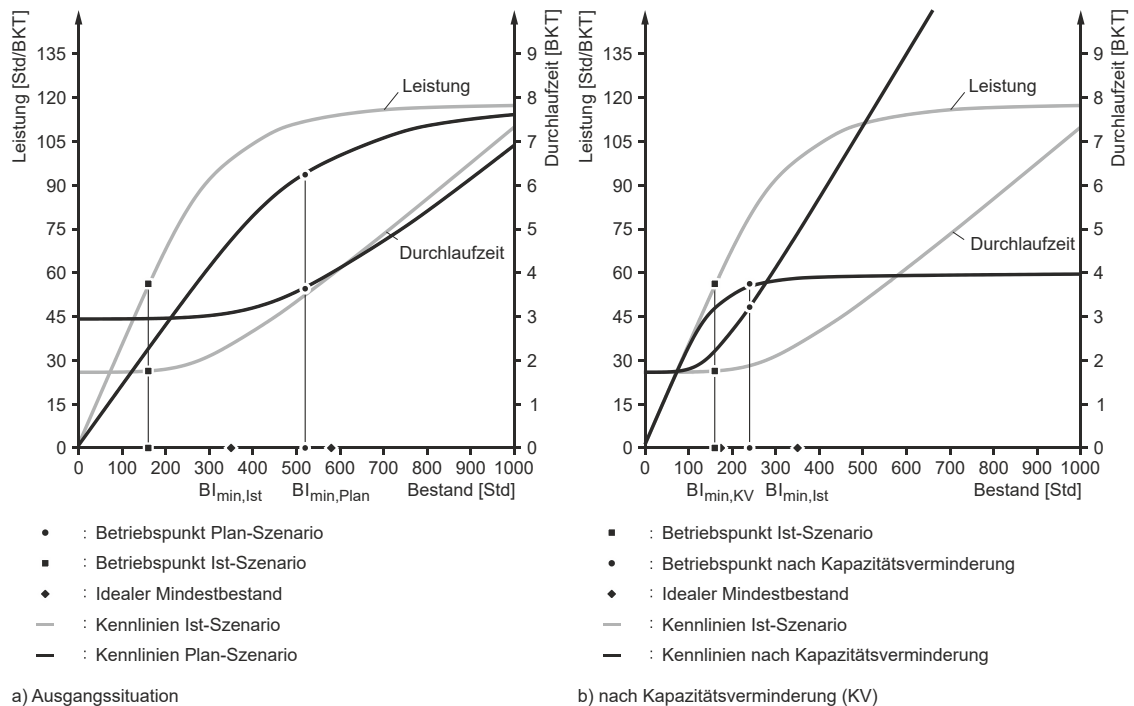


- TZAUIst : Ist-Auftragszeittreue
- TZAUM1 : Auftragszeittreue nach Korrektur der systematischen Unsicherheit
- : Ist-Unsicherheit
- : Unsicherheit nach Korrektur der systematischen Unsicherheit

14125

Abbildung 59: Auftragszeittreue an Arbeitssystem I nach Korrektur der systematischen Unsicherheit

Nachdem die Parameter der Arbeitsplanung angepasst wurden, gilt es nun die Auslastung des Arbeitssystems zu steigern. Hierzu ist das Kapazitätsangebot an den Bedarf anzupassen. Aufgrund der Abhängigkeit zwischen Termin- und Kapazitätsplanung ist die Terminplanung ebenfalls anzupassen. Die Produktionskennlinien für das Szenario „Kapazitätsverminderung“ sind in Abbildung 58 dargestellt.



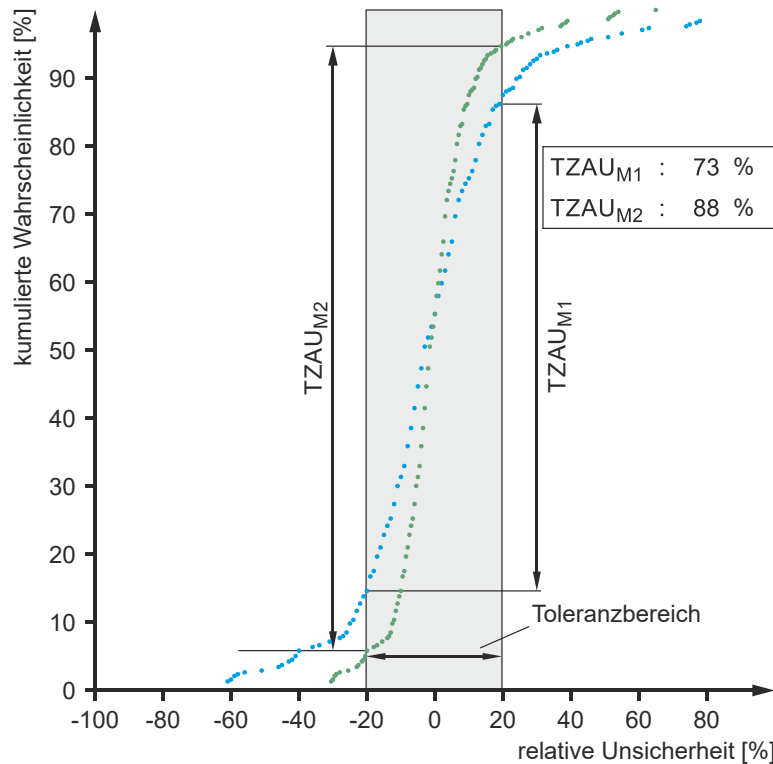
14126

Abbildung 60: Produktionskennlinien für die Szenarien Planung, Ist und nach Kapazitätsverminderung an Arbeitssystem I

**Kapazitätsangebot vermindern:** Das Kapazitätsangebot ist für den tatsächlichen Kapazitätsbedarf überdimensioniert und ist zu reduzieren. In der Kapazitätsplanung ist das Kapazitätsangebot anzupassen, dadurch wird die Auslastung des Arbeitssystems gesteigert. Dies gilt sowohl für das Personal als auch die Betriebsmittel. Die Anzahl der Arbeitsplätze kann um 50 % auf zwei Arbeitsplätze reduziert werden, sodass sich das Kapazitätsangebot auf 60 Std/BKT verringert. Der ideale Mindestbestand sinkt auf 175 Std, da nur noch zwei Aufträge zeitgleich bearbeitet werden können. Die mittlere Durchlaufzeit erhöht sich dadurch auf 3,2 BKT, die mittlere Leistung beträgt 55 Std/BKT, sodass eine Auslastung von 92 % erzielt wird. Diese Variante ist in Abbildung 58b dargestellt.

### Maßnahmen gegen die zufällige Unsicherheit

**Arbeitsplanung verbessern:** Die Auftragszeittreue ist trotz der Korrektur der systematischen Unsicherheit mit 73 % gering. Um die Auftragszeittreue weiter zu steigern, ist die zufällige Unsicherheit zu reduzieren. Wenn es durch geänderte Prozesse in der Vorgabezeitermittlung möglich wäre, die zufällige Unsicherheit um 50 % zu reduzieren, dann könnte die Auftragszeittreue um 15 Prozentpunkte auf 88 % erhöht werden (siehe Abbildung 61). Dies würde die Ursache der zufälligen Unsicherheit beheben, sodass die Fertigungssteuerung infolgedessen seltener eingreifen müsste.



$TZAU_{M1}$  : Auftragszeittreue nach Korrektur der systematischen Unsicherheit

$TZAU_{M2}$  : Auftragszeittreue bei reduzierter zufälliger Unsicherheit

- : Unsicherheit nach Korrektur der systematischen Unsicherheit
- : Unsicherheit bei reduzierter zufälliger Unsicherheit

14127

Abbildung 61: Auftragszeittreue an Arbeitssystem I bei reduzierter zufälliger Unsicherheit

*Fertigungssteuerung anpassen:* Um die zulässige Unsicherheit zu kompensieren, ist auf Maßnahmen der Fertigungssteuerung zurückzugreifen. Durch den gezielten Einsatz einer Rückstandsregelung in Kombination mit einer Conwip-Steuerung können die Auswirkungen der zufälligen Unsicherheit minimiert werden. Um Rückstände rechtzeitig und zuverlässig erkennen zu können, sind bei Aufträgen mit großen Plan-Auftragszeiten zusätzliche Meilensteine zu definieren.

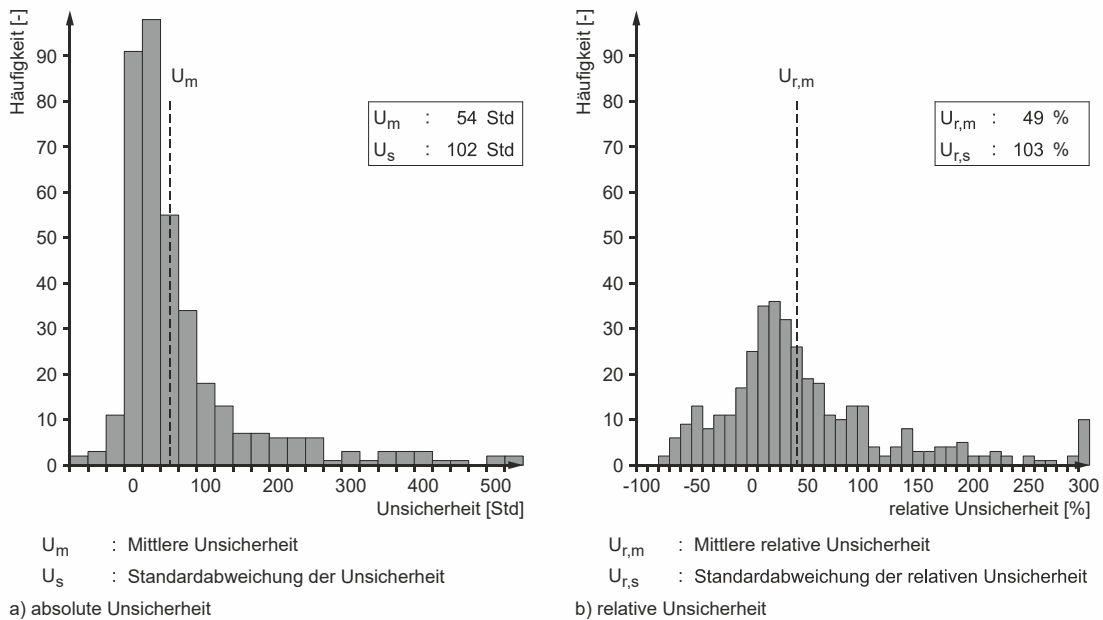
## 6.4 Arbeitssystem II „Rohrmontage“

### 6.4.1 Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten

Auch bei diesem Arbeitssystem gilt es, zunächst die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten zu bestimmen, um dieser bereits frühzeitig in der Planung begegnen zu können. Hierzu werden die Art der Unsicherheit sowie die Kenngrößen der Unsicherheit (Mittelwert und Standardabweichung) ermittelt. Des Weiteren ist zu untersuchen, inwiefern die Höhe der Plan-Auftragszeit und die Zuordnung zu einem bestimmten Schiff die Ausprägung der Unsicherheit beeinflussen.

### Unsichere Auftragszeiten an Arbeitssystem II

Zunächst werden die absolute und die relative Unsicherheit als Histogramm dargestellt (siehe Abbildung 62a und b), um die Verteilung der Unsicherheit zu visualisieren. An diesem Arbeitssystem sind 270 unterschätzte Aufträge, 102 überschätzte Aufträge und 5 Aufträge ohne Unsicherheit aufgetreten.



14128

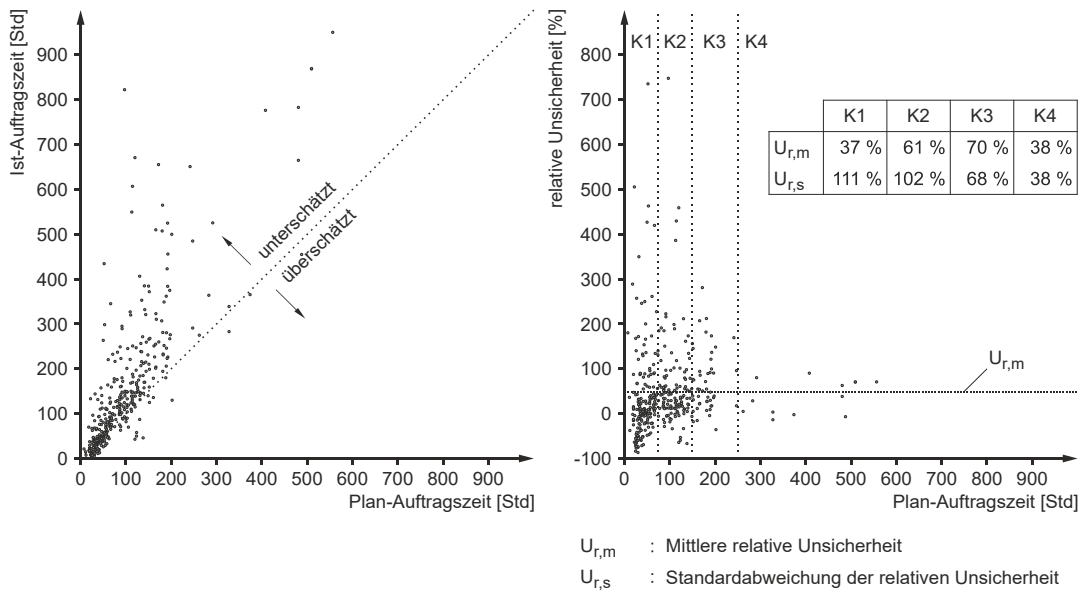
Abbildung 62: Histogramme der Unsicherheit an Arbeitssystem II

Des Weiteren wird die Ausprägung der Unsicherheit anhand von Kennzahlen quantifiziert. Die mittlere Unsicherheit beträgt 54 Stunden bei einer mittleren Plan-Auftragszeit von 95 Stunden. Dies entspricht einer mittleren relativen Unsicherheit in Höhe von 49 %. Die Auftragszeiten werden systematisch unterschätzt. Die kumulierte Unsicherheit des Arbeitssystems beträgt 20.249 Stunden im Untersuchungszeitraum. Bei einer derart stark ausgeprägten systematischen Unterschätzung ist die Qualität der Eingangsdaten für die Termin- und Kapazitätsplanung so gering, dass Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen unausweichlich sind. Eine Analyse der akuten Auswirkungen dieser systematischen Unsicherheit ist notwendig. Darüber hinaus ist in jedem Fall die Arbeitsplanung anzupassen.

Die Streuung der Unsicherheit beträgt circa 102 Stunden, die Streuung der relativen Unsicherheit rund 103 %. Es liegt somit eine ausgeprägte zufällige Unsicherheit vor, die sich über einen großen Wertebereich erstreckt. Das Minimum der Unsicherheit beträgt -92 Stunden, während das Maximum der Unsicherheit bei 726 Stunden liegt. Die zufällige Unsicherheit ist ebenfalls stark ausgeprägt. Darum gilt es zu untersuchen, inwieweit das Arbeitssystem dieser begegnen kann.

Für die spätere Wahl von Maßnahmen zum Umgang mit unsicheren Auftragszeiten sind die zwei weiteren Charakteristika Typ der Unsicherheit und Klassen der Unsicherheit zu bestimmen. Da in diesem Fall keine weiteren Parameter zur Verfügung stehen, werden die Aufträge anhand der Plan-Auftragszeiten einer Klasse zugeordnet. Für die detaillierte Ana-

lyse der Ausprägung der Unsicherheit werden zwei Streudiagramme mit den Ist-Auftragszeiten (Abbildung 63a) bzw. den relativen Unsicherheiten (Abbildung 63b) über der Plan-Auftragszeit erstellt.



a) Streudiagramm Plan- und Ist-Auftragszeiten

b) Streudiagramm Plan-Auftragszeit und relative Unsicherheit

14129

Abbildung 63: Streudiagramm Plan-Ist-Auftragszeiten (a) und Streudiagramm relative Unsicherheit und Plan-Auftragszeit (b) für Arbeitssystem II

In Abbildung 63a ist deutlich zu erkennen, dass Aufträge mit großen Auftragszeiten weiter von der Winkelhalbierenden entfernt sind als Aufträge mit kleinen Auftragszeiten. Die Unsicherheit nimmt für große Auftragszeiten zu. Es ist anzunehmen, dass eine auftragszeitabhängige Unsicherheit vorliegt.

Darüber hinaus gilt es, zu prüfen, ob sich weitere Klassen identifizieren lassen, die eine ähnliche Ausprägung der Unsicherheit aufweisen. Abbildung 63b liefert weitere Erkenntnisse zur Ausprägung der Unsicherheit. Der Großteil der überschätzten Auftragszeiten hat eine Plan-Auftragszeit von kleiner 75 Stunden.

Die Aufträge konzentrieren sich mit zunehmender Plan-Auftragszeit um die mittlere relative Unsicherheit (Linie  $U_{r,m}$ ). Die Streuung der relativen Unsicherheit nimmt für große Plan-Auftragszeiten ab, demnach ist die zufällige Unsicherheit auftragszeitabhängig. Auf Basis dieser Erkenntnis kann die Ausprägung der Unsicherheit bei zukünftigen Aufträgen besser antizipiert werden. Bevor weitere Schlussfolgerungen über die Arbeitsplanung getroffen werden können, sind verschiedene Klassen zu ermitteln. Hierzu wird untersucht, bei welchen Plan-Auftragszeiten die vertikale Ausdehnung der Punkte eine signifikante Änderung erfährt. Daraus ergeben sich die vier Klassen K1, K2, K3 und K4. Für jede Klasse wurden separat der Mittelwert und die Standardabweichung der relativen Unsicherheit ermittelt (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Kenngrößen je Auftragszeitklasse an Arbeitssystem II

Klasse	Klasse der Plan-Auftragszeiten	ZAU <sub>m,Plan</sub> [Std]	ZAU <sub>s,Plan</sub> [Std]	U <sub>r,m</sub> [%]	U <sub>r,s</sub> [%]	Anteil [%]
1	< 75 Std	42	15	37	111	50
2	75-150 Std	110	20	61	102	34
3	150-250 Std	181	23	70	68	12
4	> 250 Std	408	102	38	38	4

Die Streuungen unterscheiden sich deutlich je Klasse. Auch für dieses Arbeitssystem lässt sich eine geringere zufällige Unsicherheit bei großen Plan-Auftragszeiten beobachten. Dies ist auf eine erhöhte Planungsqualität bzw. auf Kompensationseffekte zurückzuführen (vgl. Unterabschnitt 6.3.1).

Es werden 15 Ausreißer identifiziert, die eine relative Unsicherheit größer 250 % aufweisen. Die Detailanalyse zeigt, dass etwa 80 % dieser Aufträge dem Schiff S4 zuzuordnen sind. Es besteht Handlungsbedarf, der Ursache für diese Ausreißer auf den Grund zu gehen.

Weiterhin gilt es zu prüfen, ob die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten in Abhängigkeit zum Schiff stehen. Dies ist besonderes vor dem Hintergrund relevant, dass sich sowohl die Anzahl der Aufträge als auch die Auftragszeitstruktur zwischen den Schwesterschiffen (S1, S2 und S3) und dem vierten Schiff S4 eindeutig unterscheiden. Deshalb werden für jedes Schiff die Kenngrößen der Unsicherheit ermittelt (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Kenngrößen der Unsicherheit je Schiff an Arbeitssystem II

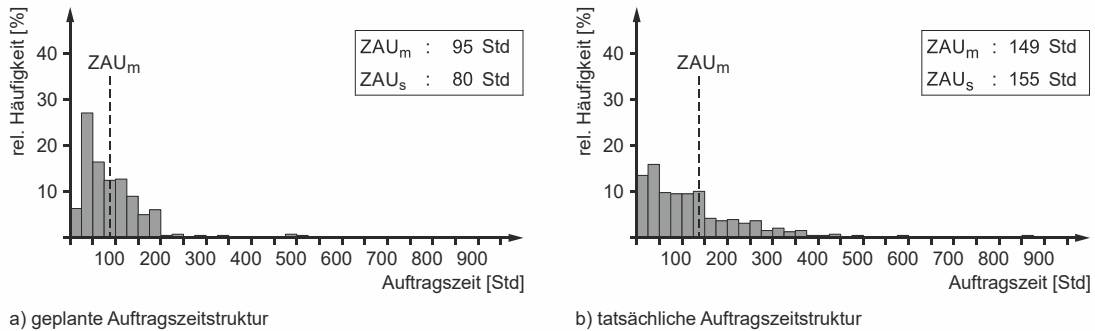
Kenngrößen	Schiff 1	Schiff 2	Schiff 3	Schiff 4
U <sub>m</sub> [Std]	40	48	35	122
U <sub>s</sub> [Std]	86	91	57	164
U <sub>max</sub> [Std]	409	492	359	726
U <sub>min</sub> [Std]	-92	-66	-45	-72
Kum. U [Std]	4208	5096	3778	7190
U <sub>r,m</sub> [%]	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>36</b>	<b>141</b>
U <sub>r,s</sub> [%]	<b>69</b>	<b>75</b>	<b>65</b>	<b>177</b>
U <sub>r,max</sub> [%]	427	430	420	748
U <sub>r,min</sub> [%]	-87	-77	-73	-69

Die Auswertung der Kennzahlen zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Schwesterschiffen und dem einzelnen Schiff. Diese sind in Tabelle 17 fett markiert. Während die systematische und die zufällige Unsicherheit der drei Schwesterschiffe ähnlich ausgeprägt ist [U<sub>r,m</sub> = 30 % bis 36 % bzw. U<sub>r,s</sub> = 65 % bis 75 %], weist das Schiff S4 eine deutlich stärkere Unsicherheit auf [U<sub>r,m</sub> = 141 % bzw. U<sub>r,s</sub> = 177 %].

Die kumulierte Unsicherheit ist für das Schiff S4 am stärksten ausgeprägt. Allerdings wirft die ähnliche Ausprägung der Unsicherheit der drei Schwesterschiffe die Frage auf, warum sich bei den später gefertigten Schwesterschiffen keine deutliche Verbesserung der Auftragszeittreue ergibt.

### Auswirkungen auf die Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem II

Nachdem die Unsicherheit an diesem Arbeitssystem quantifiziert ist, gilt es die Auswirkung auf die Auftragszeitstruktur zu prüfen. Statt der ursprünglich avisierten Auftragszeitstruktur mit einer mittleren Auftragszeit von 95 Stunden und einer Streuung der Auftragszeit in Höhe von 80 Stunden sind die tatsächlichen Werte mit 149 Stunden bzw. 155 Stunden signifikant größer. Der Vergleich der Histogramme der Plan- und Ist-Auftragszeiten veranschaulicht die Änderung (siehe Abbildung 64).

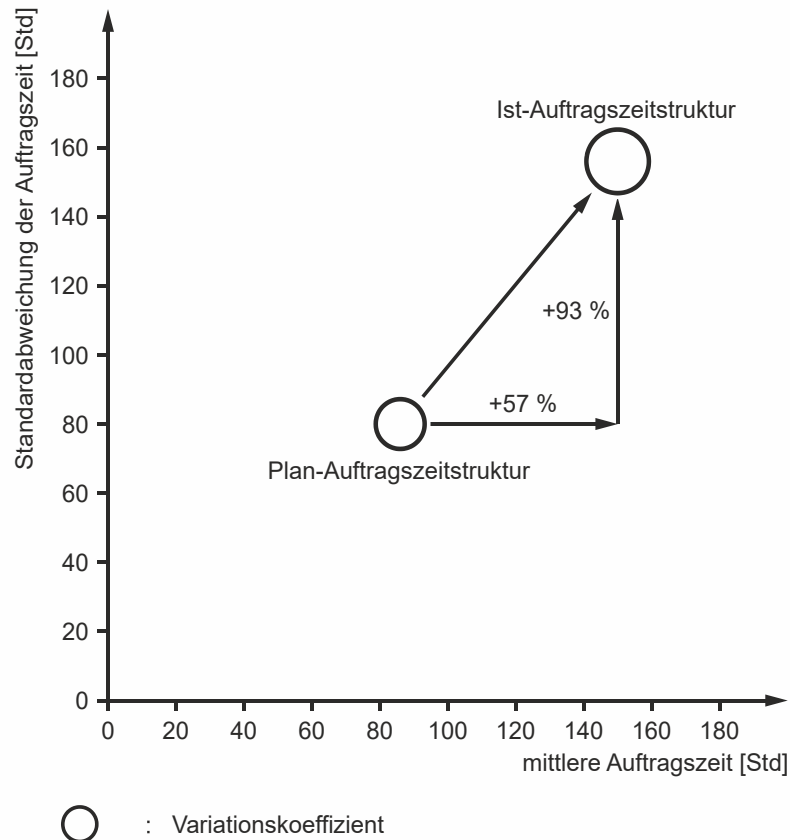


14130

Abbildung 64: Histogramme der Plan-Auftragszeiten (a) und der Ist-Auftragszeiten (b) an Arbeitssystem II

68 % der Ist-Auftragszeiten sind kleiner 150 Stunden, circa 26 % der Ist-Auftragszeiten sind zwischen 150 und 400 Stunden und nur 6 % der Auftragszeiten sind größer 400 Stunden. Die Aufträge sind innerhalb dieser drei Gruppen homogen verteilt. Auftragszeiten größer 200 Stunden treten vermehrt auf. Daraus resultiert die Verschiebung der mittleren Auftragszeit. Außerdem erstreckt sich der Wertebereich mit einer maximalen Auftragszeit von 950,5 Stunden über einen deutlich größeren Bereich.

Um die Veränderung der Auftragszeitstruktur aufgrund der Unsicherheit zu veranschaulichen, werden die Parameter der geplanten und der tatsächlichen Auftragszeitstruktur als Kreise in ein Streudiagramm eingetragen (Abbildung 65). Der Kreisdurchmesser repräsentiert den Variationskoeffizienten. Während die mittlere Auftragszeit um rund 57 % unterschätzt wurde, fällt die Standardabweichung der Auftragszeit mit 149 Stunden rund 93 % größer als geplant aus. Der Variationskoeffizient ist infolgedessen mit 1,04 rund ein Drittel größer als ursprünglich gedacht.



14131

Abbildung 65: Änderung der Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem II durch Unsicherheit

Die Plan-Parameter der Termin- und Kapazitätsplanung, die sich aus der Plan-Auftragszeitstruktur ableiten, basieren auf falschen Annahmen. Es gilt zu prüfen, ob die logistische Zielerreichung unter dieser geänderten Ausgangslage sichergestellt ist.

Zusammenfassend ergeben sich aus der Analyse folgende Erkenntnisse:

- Die Auftragszeiten werden systematisch unterschätzt ( $U_{r,m} > 0$ ).
- Die systematische Unsicherheit nimmt mit der Plan-Auftragszeit zu, während die systematische relative Unsicherheit nahezu konstant ist.
- Die zufällige relative Unsicherheit nimmt mit zunehmender Plan-Auftragszeit ab.
- Es existieren vier Klassen von unsicheren Auftragszeiten an diesem Arbeitssystem, die sich in der Höhe der zufälligen Unsicherheit unterscheiden.
- Der Schiffstyp hat einen signifikanten Einfluss auf die Ausprägung der systematischen und zufälligen Unsicherheit.
- Die unsicheren Auftragszeiten verändern die Auftragszeitstruktur signifikant. Die mittlere Auftragszeit steigt um 57 % und die Streuung der Auftragszeit steigt um 93 % gegenüber der initialen Planung. Der Variationskoeffizient erhöht sich dadurch um ca. ein Drittel.

### Berechnen einer realitätsnahen Auftragszeitstruktur für Arbeitssystem II

Auch für dieses Arbeitssystem kann eine Auftragszeitstruktur proaktiv unter Einbeziehung einer bekannten Unsicherheit berechnet werden. Anhand des Arbeitssystems II kann ein

weiterer Aspekt dieser Modellierung verdeutlicht werden und der Einfluss unsicherer Auftragszeiten aufgrund der Neuartigkeit eines Schiffs auf die Auftragszeitstruktur verdeutlicht werden.

Die Auftragszeiten an *Arbeitssystem II Rohrmontage* sind mit einer ausgeprägten systematischen und zufälligen auftragszeitabhängigen Unsicherheit behaftet. An diesem Arbeitssystem konnte ein ausgeprägter Unterschied hinsichtlich der Ausprägung der Unsicherheit der Schwesterschiffe und des Prototyps nachgewiesen werden. Deshalb wird die Annahme getroffen, dass die Neuartigkeit eines Schiffs die Unsicherheit der Auftragszeiten an diesem Arbeitssystem maßgeblich beeinflusst.

Für die Schwesterschiffe S1, S2 und S3 wird eine identische Ausprägung der Unsicherheit mit einer mittleren relativen Unsicherheit von 30 % und einer Standardabweichung der Unsicherheit von 70 % angenommen. Das Schiff S4 ist ein neuartiger Schiffstyp, daher wird die Annahme getroffen, dass die Unsicherheit besonders stark ausgeprägt ist. Sowohl die mittlere Unsicherheit als auch die Standardabweichung werden mit jeweils 150 % großzügig dimensioniert. Gemäß den Formeln 23 und 24 wird für jedes Schiff die neue Auftragszeitverteilung berechnet (siehe Tabelle 18). Des Weiteren sind hier die tatsächlichen Parameter der Auftragszeitverteilungen der Schiffe dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass zwar geringe Abweichungen hinsichtlich der Parameter bestehen, im Großen und Ganzen aber eine recht gute Übereinstimmung der Parameter erzielt werden konnte.

Tabelle 18: Tatsächliche und berechnete Auftragszeitstruktur je Klasse an Arbeitssystem II

Klasse der Auftragszeiten	ZAU <sub>m,Ist</sub> [Std]	ZAU <sub>m,VB</sub> [Std]	ZAU <sub>s,Ist</sub> [Std]	ZAU <sub>s,VB</sub> [Std]	Anteil [%]
Schiff 1	133	121	147	135	28
Schiff 2	144	125	155	135	28
Schiff 3	129	123	119	134	28
Schiff 4	223	253	204	289	16

Im nächsten Schritt werden die verschiedenen Auftragszeitverteilungen in eine gemeinsame Auftragszeitstruktur überführt. Dazu werden die mittlere Auftragszeit und die Standardabweichung der Auftragszeit gemäß der Formeln 25 und 26 berechnet.

Die berechnete Auftragszeitstruktur des Arbeitssystems II Rohrmontage hat eine mittlere Auftragszeit von 143 Stunden und eine Standardabweichung von 175 Stunden. Diese Werte fallen rund 4 % kleiner bzw. circa 13 % größer als die Ist-Parameter aus. Der Variationskoeffizient mit 1,2 wird deutlich überschätzt. Die systematische Unsicherheit sinkt deutlich gegenüber der ursprünglichen Planung. Aufgrund der guten Näherungswerte empfiehlt sich der Einsatz dieses Verfahrens (siehe Tabelle 19).

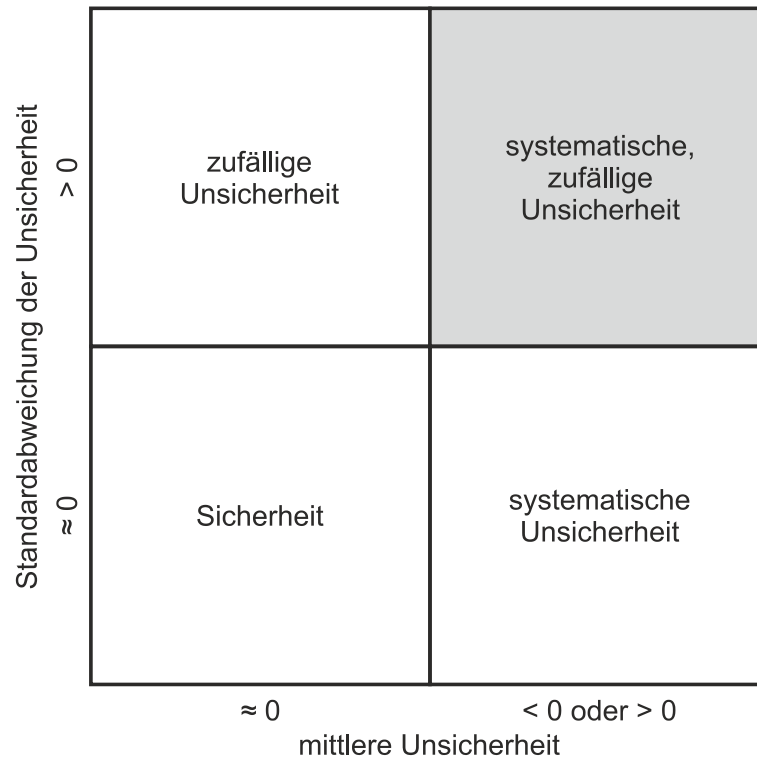
Tabelle 19: Geplante, reale und berechnete Auftragszeitstruktur an Arbeitssystem II

Szenario	ZAU <sub>m</sub> [Std]	ZAU <sub>s</sub> [Std]	ZAU <sub>v</sub> [-]
Plan	95	80	0,8
Ist	149	155	1,0
Berechnet	143	175	1,2

### 6.4.2 Bewerten unsicherer Auftragszeiten

Um den Handlungsbedarf in den verschiedenen Planungsaufgaben aufzuzeigen, werden sowohl die quantifizierte Ausprägung der Unsicherheit als auch die Fähigkeit des Arbeitssystems II Rohrmontage, unsicheren Auftragszeiten zu begegnen, bewertet.

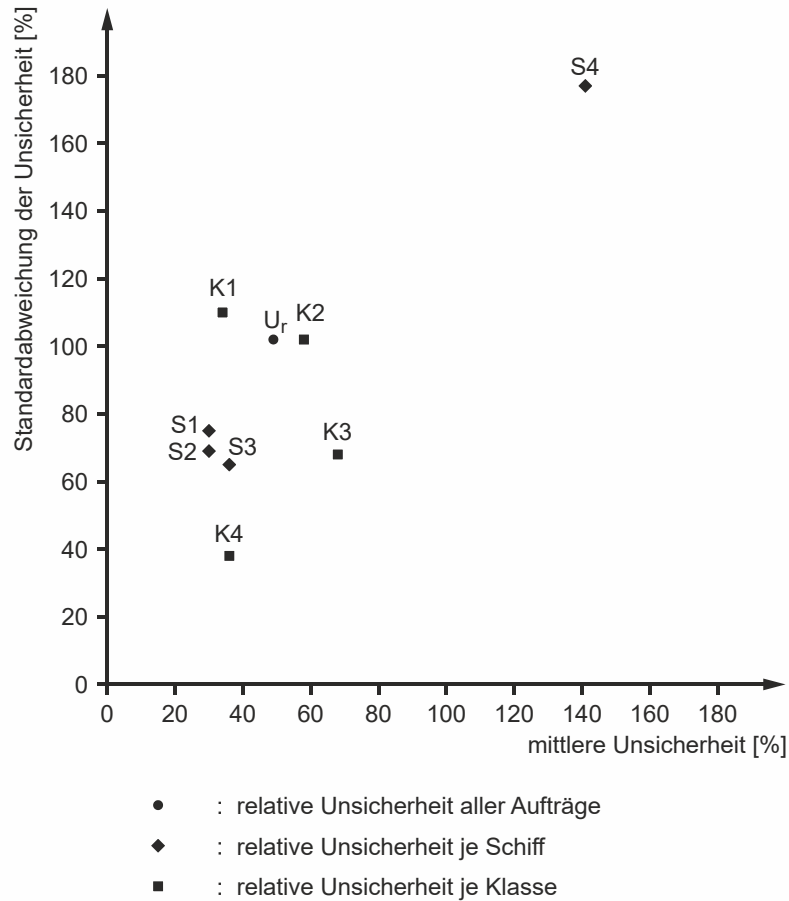
Eine erste allgemeine Bewertung wird anhand der Dimensionen der Unsicherheit vorgenommen. An diesem Arbeitssystem besteht eine ausgeprägte positive systematische und zufällige Unsicherheit, daher ist der obere rechte Quadrant in der Matrix der Unsicherheit dunkel eingefärbt (siehe Abbildung 66).



14132

Abbildung 66: Szenario der Unsicherheit an Arbeitssystem II

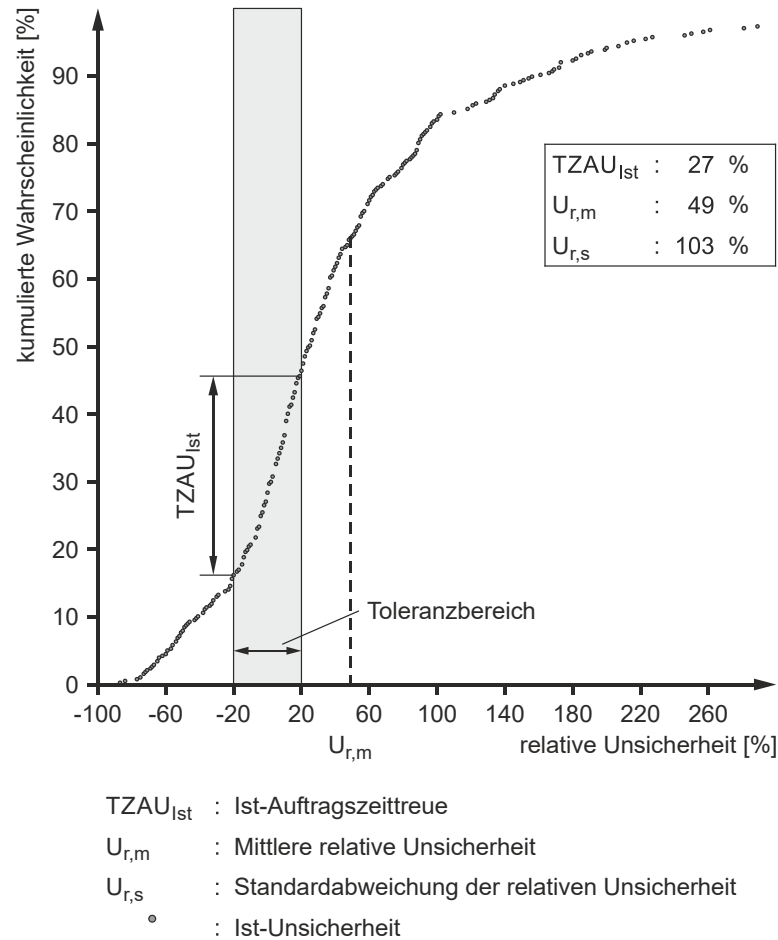
Die Arbeitsplanung von Arbeitssystemen, deren Unsicherheit sich in diesem Quadranten befindet, ist einer detaillierten Analyse und Bewertung zu unterziehen. Dazu werden die Kenngrößen der relativen Unsicherheit des Arbeitssystems ( $U_r$ ), der Aufträge je Schiff (S1 bis S4) und der Klassen der Plan-Auftragszeit (K1-K4) in ein Koordinatensystem eingezeichnet (siehe Abbildung 67). Das Arbeitssystem verfügt über eine ausgeprägte systematische und zufällige relative Unsicherheit. Die Arbeitsplanung liefert keine verlässlichen Plan-Auftragszeiten. Es besteht akuter Handlungsbedarf, die Arbeitsplanung anzupassen. Dabei zeigt sich, dass die relative Unsicherheit bei den Aufträgen von Schiff S4 wesentlich stärker als bei den Schwesterschiffen (S1, S2, S3) ausgeprägt ist. Dies wirft die Frage auf, weshalb ausgerechnet bei diesem Schiff die relative Unsicherheit wesentlich stärker ausgeprägt ist.



14133

Abbildung 67: Bewertung der Ausprägung der Unsicherheit an Arbeitssystem II

*Bewertung der Qualität der Arbeitsplanung mittels Auftragszeittreue:* Die Auftragszeittreue beträgt lediglich 27 % bei einem Toleranzbereich von Plus und Minus 20 % der Auftragszeit (siehe Abbildung 68), sodass eine zuverlässige Termin- und Kapazitätsplanung nicht gewährleistet ist. Die Arbeitsplanung ist dringend zu verbessern.



14134

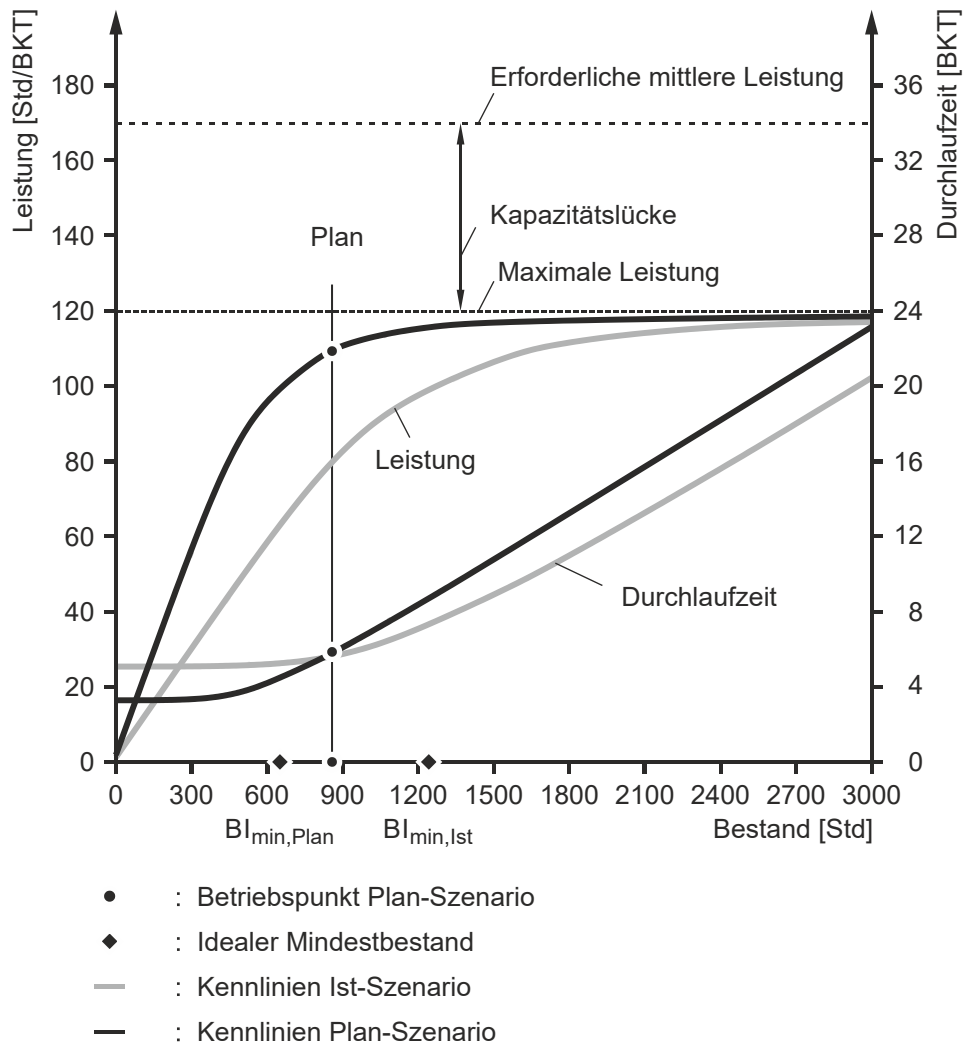
Abbildung 68: Auftragszeittreue an Arbeitssystem II

### Bewertung der Termin- und Kapazitätsplanung mittels der Produktionskennlinien

Um den Handlungsbedarf für die Termin- und Kapazitätsplanung zu ermitteln, sind die Auswirkungen der Unsicherheit auf die logistischen Zielgrößen zu bestimmen. Das maximale Kapazitätsangebot und damit die maximale Leistung werden dafür als konstant angenommen. Dafür werden jeweils die Produktionskennlinien auf Basis der geplanten und tatsächlichen Auftragszeitstruktur gebildet und einander grafisch gegenübergestellt (Abbildung 69).

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Kennlinien der geplanten und der tatsächlichen Auftragszeitstruktur zu erkennen. Infolge der Unsicherheit ändert sich die Auftragszeitstruktur, sodass der ideale Mindestbestand von 651 Stunden auf 1242 Stunden steigt. Der Übergangsbereich wird erst bei höheren Beständen erreicht.

Die erforderliche mittlere Leistung ist mit circa 170 Stunden rund 56 % größer als die avisierte mittlere Leistung. Sie übersteigt die maximale Leistung des Arbeitssystems in Höhe von 120 Stunden pro BKT. Diese Kapazitätslücke ist in Abbildung 69 dargestellt. Die Aufträge können bei dem vorhandenen Kapazitätsangebot nicht innerhalb des Untersuchungszeitraumes fertiggestellt werden.



14135

Abbildung 69: Produktionskennlinien für das Arbeitssystem II

Aufgrund der Kapazitätslücke nimmt das Arbeitssystem einen instationären Zustand ein. Die Kennlinientheorie kann dann nicht zum Einsatz kommen. Die dauerhafte Unterdeckung würde zu einem kontinuierlichen Bestandsaufbau führen. Das Arbeitssystem wird aufgrund des erhöhten Kapazitätsbedarfs länger belegt als ursprünglich geplant. Die Aufträge haben eine längere Durchlaufzeit als ursprünglich geplant und erfahren eine Terminabweichung. Zum einen blockieren sie das Arbeitssystem und zum anderen werden nachgelagerte Arbeitssysteme verspätet versorgt.

Was leitet sich daraus für die Termin- und Kapazitätsplanung ab?

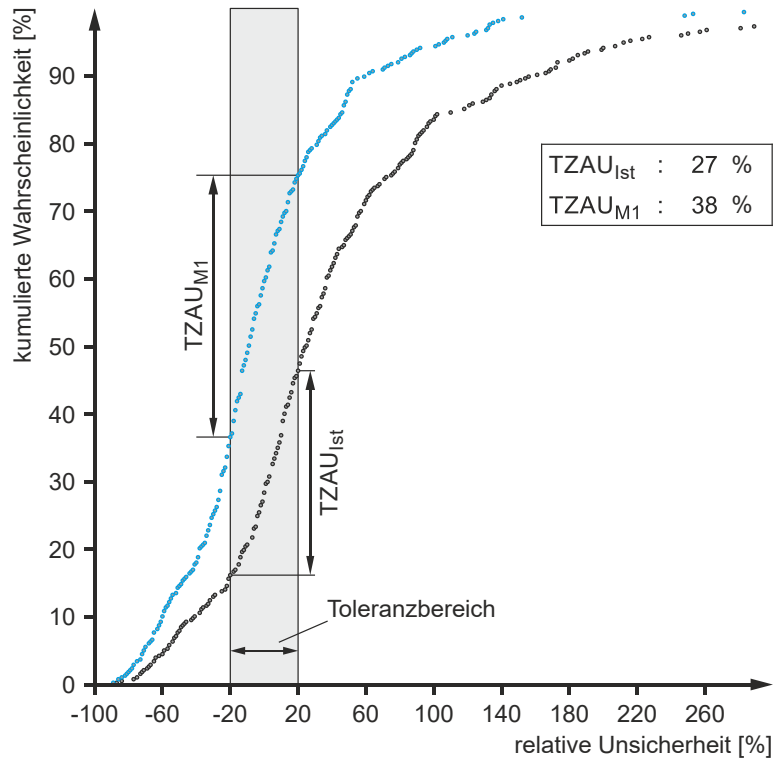
1. Die Terminplanung nutzt falsche mittlere Durchlaufzeiten. Um eine termingerechte Fertigstellung der Aufträge zu gewährleisten, ist die Terminplanung zu überarbeiten.
2. Um die Kapazitätslücke zu schließen, ist die Kapazitätsplanung anzupassen.

### 6.4.3 Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten

Die Bewertung der unsicheren Auftragszeiten zeigt einen Handlungsbedarf für die Planung dieses Arbeitssystems auf. Die geringe Qualität der Arbeitsplanung verursacht eine ausgeprägte systematische, zufällige Unsicherheit, weshalb die angestrebten logistischen Zielgrößen nicht erreicht werden. In diesem Abschnitt werden Maßnahmen aufgezeigt, um trotz der Unsicherheit die Qualität der Planung zu erhöhen und die logistische Zielerreichung dennoch sicherzustellen.

#### **Maßnahmen gegen die systematische Unsicherheit**

*Arbeitsplanung anpassen:* Um der systematischen Unsicherheit zu begegnen, sind die Plan-Auftragszeiten aus der Arbeitsplanung zu justieren. Ausgehend von den Ergebnissen aus der Quantifizierung der Unsicherheit ergibt sich der Bedarf, die Plan-Auftragszeiten zu erhöhen. Darüber hinaus wurde erkannt, dass der Schiffstyp maßgeblich die Ausprägung der systematischen Unsicherheit bestimmt. Aus diesem Grund wurde für die beiden Schiffstypen ein Korrekturfaktor bestimmt und auf die Plan-Auftragszeiten angewendet. Die systematische Unsicherheit konnte so nahezu vollständig beseitigt werden ( $U_m = 0$ ). Die Auftragszeitstreue verbessert sich von 27 % auf 38 % (siehe Abbildung 70). Nach der Anpassung der Plan-Parameter beträgt die maximale positive bzw. negative Unsicherheit 589 bzw. -536 Stunden. Die Korrektur der systematischen Unsicherheit führt bei 227 Aufträgen zu einer Überschätzung zwischen Plan- und Ist-Auftragszeit.



$TZAU_{Ist}$  : Ist-Auftragszeittreue

$TZAU_{M1}$  : Auftragszeittreue nach Korrektur der systematischen Unsicherheit

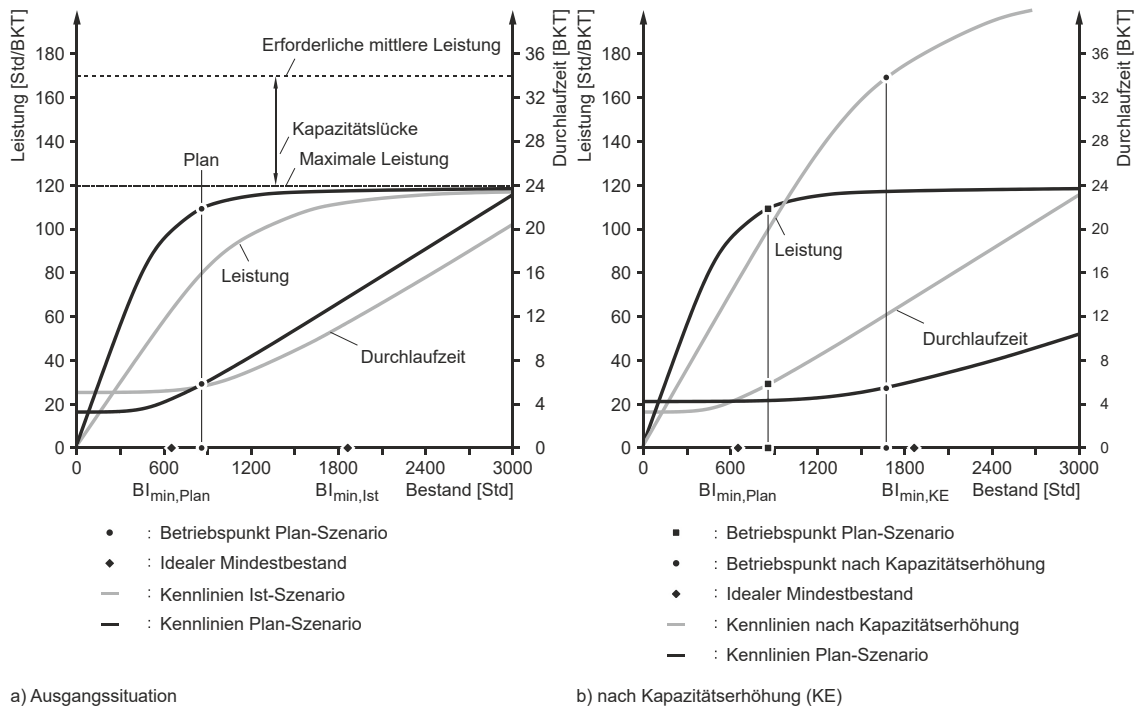
• : Ist-Unsicherheit

• : Unsicherheit nach Korrektur der systematischen Unsicherheit

14136

Abbildung 70: Auftragszeittreue an Arbeitssystem II nach Korrektur der systematischen Unsicherheit

Des Weiteren gilt es, die Termin- und Kapazitätsplanung anzupassen, um den unsicheren Auftragszeiten Rechnung zu tragen. Der erhöhte Kapazitätsbedarf infolge der systematischen Unsicherheit ist der wesentliche Treiber für die erforderliche Anpassung der Planparameter. Es empfiehlt sich, das Kapazitätsangebot zu erhöhen. Diese Maßnahme ist in Abbildung 71 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.



a) Ausgangssituation

b) nach Kapazitätserhöhung (KE)

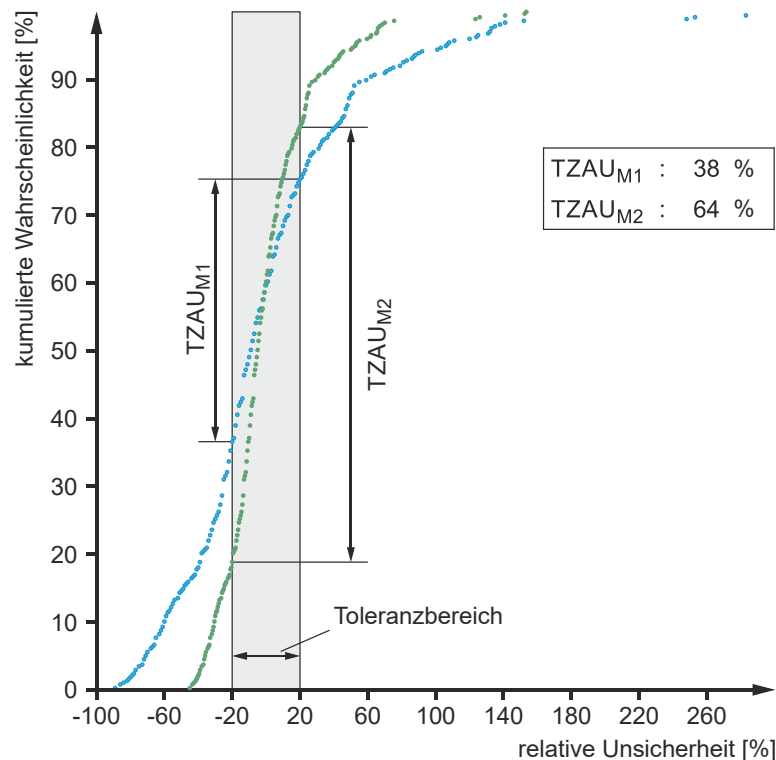
14137

Abbildung 71: Produktionskennlinien für die Szenarien Planung, Ist und nach Kapazitätserhöhung an Arbeitssystem II

*Kapazitätsangebot erhöhen:* Um die Aufträge trotz der anderen Auftragszeitstruktur und des daraus resultierenden erhöhten Kapazitätsbedarfs innerhalb des geplanten Zeitraums fertigzustellen, ist das Kapazitätsangebot deutlich zu erhöhen. Der berechnete Betriebspunkt des Arbeitssystems soll eine mittlere Leistung von 170 Std/BKT und eine mittlere Durchlaufzeit von kleiner gleich 5,6 BKT erzielen. Dann kann die ursprüngliche Terminplanung der nachgelagerten Arbeitssysteme weiterhin genutzt werden und die Schiffe werden termingerecht fertiggestellt. Um diese logistische Positionierung zu ermöglichen, ist die maximale Kapazität um 80 % auf 216 Std/BKT zu erhöhen. Da das Arbeitssystem I mehr Mitarbeiter und Arbeitsplätze hat als benötigt (vgl. Abschnitt 6.3.3), werden diese dem Arbeitssystem II zugewiesen. Weitere Arbeitskräfte können über Dienstleister oder durch mehrfachqualifizierte Arbeitnehmer bereitgestellt werden. Darüber hinaus ist die Arbeitszeit je Schicht um 20 % auszuweiten. Infolge der zwei zusätzlichen Montagearbeitsplätze erhöht sich der ideale Mindestbestand auf 1864 Std. Bei dieser Konfiguration erreicht das Arbeitssystem II eine Auslastung von 79 %. Diese neuen Kennlinien sind in Abbildung 71b dargestellt. Alternativ kann das Unternehmen die Plan-Durchlaufzeit verlängern, um eine höhere Auslastung zu erzielen. Hierfür müssten die Durchlaufzeiten der nachfolgenden Arbeitssysteme verringert werden.

### Maßnahme gegen die zufällige Unsicherheit

*Arbeitsplanung verbessern:* Langfristig gilt es, die zufällige Unsicherheit zu reduzieren und so die Auftragszeittreue zu erhöhen. Die Ergebnisse aus dem Schritt „Quantifizieren der unsicheren Auftragszeiten“ liefern Hinweise, welche Aufträge besonders ausgeprägte zufällige Unsicherheiten aufweisen. Diese Aufträge sollten innerhalb der Arbeitsplanung eine besondere Aufmerksamkeit erhalten und sind mit größter Sorgfalt zu planen. Um den Effekt beispielhaft zu verdeutlichen, wird nun angenommen, dass die zufällige Unsicherheit sämtlicher Aufträge um 50 % reduziert wird. Die Auftragszeittreue des Arbeitssystems steigt auf 64 % (siehe Abbildung 72).



- $TZAUM_1$  : Auftragszeittreue nach Korrektur der systematischen Unsicherheit  
 $TZAUM_2$  : Auftragszeittreue bei reduzierter zufälliger Unsicherheit  
 • : Unsicherheit nach Korrektur der systematischen Unsicherheit  
 • : Unsicherheit bei reduzierter zufälliger Unsicherheit

14138

Abbildung 72: Auftragszeittreue an Arbeitssystem II bei reduzierter zufälliger Unsicherheit

*Fertigungssteuerung anpassen:* Um kurzfristig die Auswirkungen der zufälligen Unsicherheit zu reduzieren, empfiehlt es sich, auf Maßnahmen der Fertigungssteuerung zurückzugreifen. Hierzu sind eine Rückstandsregelung und eine Conwip-Steuerung zu kombinieren und zu dimensionieren. Auch an diesem Arbeitssystem ist der tatsächliche Kapazitätsbedarf zu erfassen, um Rückstände rechtzeitig und zuverlässig erkennen zu können. Hierzu sind für Aufträge mit großen Plan-Auftragszeiten zusätzliche Meilensteine zu definieren.

### 6.5 Evaluation der entwickelten Modellierung

Zum Abschluss gilt es, die entwickelte Modellierung anhand der Anforderungen aus Unterkapitel 4.1 zu evaluieren. Die Ergebnisse des Praxisbeispiels und des fiktiven Beispiels dienen als Grundlage für die Evaluation. Die Ergebnisse der Evaluation sind in Tabelle 20 dokumentiert.

#### **Transparenz**

Das entwickelte Wirkmodell erklärt die Zusammenhänge zwischen der Unsicherheit und den logistischen Zielgrößen und bildet die Grundlage für die angewandte Methodik. Zum einen ist es möglich, die Auswirkungen unsicherer Auftragszeiten auf einen Auftrag zu modellieren. Zum anderen lässt sich die Unsicherheit in den Produktionskennlinien abbilden, indem die Unsicherheit bei der Ermittlung der Auftragszeitstruktur berücksichtigt wird. Die Ergebnisse der zwei Anwendungsbeispiele bestätigen die Erkenntnisse des Wirkmodells. Die Analyse ermöglichte es, auf Basis von Rückmeldedaten unsichere Auftragszeiten an beiden Arbeitssystemen des Praxisbeispiels zu identifizieren und zu quantifizieren. Es wurde jeweils eine zufällige, systematische auftragszeitabhängige Unsicherheit identifiziert. Darüber hinaus wurden Muster hinsichtlich der Ausprägung der Unsicherheit erkannt. Es wurde nachgewiesen, dass sowohl die Neuartigkeit des übergeordneten Produktes als auch die Höhe der Planauftragszeiten die Ausprägung der systematischen und zufälligen Unsicherheit an einem Arbeitssystem beeinflussen können. Im Anschluss war es möglich, weitere Aufträge einer Klasse von Unsicherheit anhand der Kriterien Neuartigkeit bzw. Plan-Auftragszeit zuzuordnen. Die Analyse schuf in den beiden Anwendungsbeispielen Transparenz in dreierlei Hinsicht:

- Die Ausprägung der Unsicherheit an den Arbeitssystemen ist quantifiziert.
- Die Auswirkungen der Unsicherheit auf die logistischen Zielgrößen sind bewertet.
- Potenzielle Gegenmaßnahmen und deren Auswirkungen sind aufgezeigt.

Mit Hilfe der entwickelten Methodik konnte im Praxisbeispiel für beide Arbeitssysteme und im fiktiven Beispiel die erforderliche Transparenz über unsichere Auftragszeiten geschaffen werden, um Verbesserungspotenziale in der Planung aufzeigen. Das entwickelte Vorgehen erfüllt diese Anforderung.

#### **Zielorientierung**

Die Kennzahlen zur Bewertung der unsicheren Auftragszeiten erlauben es, sowohl die Planungsqualität der Arbeitsplanung als auch die der Termin- und Kapazitätsplanung zu bewerten. Während die Bewertung der Arbeitsplanung unmittelbar anhand der Ausprägung der Unsicherheit erfolgt, werden logistische Kenngrößen für die Beurteilung der Termin- und Kapazitätsplanung genutzt. Der entwickelte Ansatz verknüpft die Unsicherheit mit der geplanten Auftragszeitstruktur, um auf Basis von Produktionskennlinien auch bei Unsicherheit zuverlässige Plan-Parameter ermitteln zu können. Die Eignung konnte verifiziert werden. Im fiktiven Beispiel konnten die Auswirkungen der unsicheren Auftragszeiten auf einen Auftrag bewertet und der Handlungsbedarf aufgezeigt werden. In beiden Anwendungsbeispielen wurde die Planungsqualität der Produktionsplanung anhand der erhobenen Kennzahlen ermittelt. Hierdurch war es möglich, Verbesserungspotenziale in der Planung aufzuzeigen und zugleich die Effekte von potenziellen Maßnahmen zu veranschaulichen.

Das zusammengestellte Maßnahmenportfolio umfasst sowohl ursachenorientierte als auch wirkungsorientierte Maßnahmen. Die Maßnahmen adressieren unterschiedliche Planungsaufgaben und unterschiedliche Arten der Unsicherheit. Der Zeithorizont der Maßnahmen variiert ebenfalls. Die Art der Unsicherheit und die Randbedingungen der Produktionsplanung limitieren die Auswahl der Maßnahmen. Dagegen ist die Ausprägung der Unsicherheit der zentrale Treiber für den erforderlichen Umfang der Maßnahmen. Während eine systematische Unsicherheit bereits in der Arbeitsplanung bzw. in der Kapazitätsplanung berücksichtigt werden kann, sind Maßnahmen für die zufällige Unsicherheit wesentlich komplexer. Hier sind die Maßnahmen *rückstandsgeregelte Kapazitätssteuerung* und *bestandsregelnde Auftragsfreigabe* hervorzuheben, da diese eine kurzfristige Reaktionsfähigkeit bieten. Ursachenorientierte Maßnahmen beseitigen die Informationsdefizite bei der Ermittlung der Plan-Auftragszeiten, während die wirkungsorientierten Maßnahmen darauf abzielen, die Auswirkung der unsicheren Auftragszeiten in den Plan-Parametern abzubilden, um auf diese Weise mögliche Terminabweichungen so gering wie möglich zu halten. Das entwickelte Maßnahmenportfolio hat sich in der Evaluation bewährt. Für die verschiedenen Ausprägungen und Bestandteile der unsicheren Auftragszeiten wurden jeweils individuelle Maßnahmen identifiziert und ausgewählt. Die entwickelte Methodik erfüllt auch diese Anforderung.

**Praxistauglichkeit**

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht es, aufwandsarm und mit einfachen Werkzeugen zuverlässige Planungsparameter zu ermitteln. Das Verfahren führt den Anwender durch die einzelnen Phasen der Analyse. Die entwickelten Hilfsmittel, wie z. B. Kennzahlen und Visualisierungen, unterstützen den Anwender bei der Analyse und befähigen ihn, eine zielgerichtete Analyse durchzuführen. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Nutzerfreundlichkeit aus. Es kann unabhängig von der Auftragszeitstruktur, der Ausprägung der Unsicherheit und der maximalen Leistung für jedes beliebige Arbeitssystem genutzt werden. Die Anforderung hinsichtlich einer hohen Praxistauglichkeit ist somit erfüllt.

Tabelle 20: Evaluation der Anforderungen

Anforderung	Evaluation der Anforderung
Transparenz	erfüllt
Zielorientierung	erfüllt
Praxistauglichkeit	erfüllt



## 7 Schlussbetrachtung

### 7.1 Zusammenfassung

Unsichere Auftragszeiten sind fester Bestandteil der Unikatproduktion. Die Unsicherheit beschreibt die Abweichung zwischen Ist- und Plan-Auftragszeit. Informationsdefizite zum Zeitpunkt der Arbeitsplanung sind die Hauptursache der unsicheren Auftragszeiten. Die Konstruktionsdaten und die Arbeitspläne sind nicht vollständig und die Komplexität der Produkte verhindert einfache Betrachtungen, sodass eine klassische Arbeitsplanung nur auf Basis von Schätz- und Erfahrungswerten durchgeführt werden kann. Aufgrund der unsicheren Auftragszeiten kommt es während der Produktion zu Störungen und Turbulenzen. Änderungen der Durchlaufzeit, Lieferterminabweichungen, Auslastungsverluste und Kostensteigerungen sind die Folge. Die geringe logistische Zielerreichung gefährdet die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen. Die Unternehmen begegnen den Unsicherheiten mit Zeitpuffern und dem umfangreichen Einsatz von Kapazitätsflexibilität.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, unsichere Auftragszeiten in die Planung zu integrieren, um die logistische Zielerreichung zu gewährleisten und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Dafür ist Transparenz über die Wirkzusammenhänge und die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten auf die logistische Zielerreichung herzustellen. Dieses Wissen ist notwendig, um den unsicheren Auftragszeiten bzw. deren Auswirkungen mit geeigneten Maßnahmen zielgerichtet zu begegnen.

Zunächst werden wichtige Begriffe, Definitionen und vorhandene Modellierungsansätze vorgestellt. Im Anschluss werden Defizite im Stand der Technik identifiziert. Wesentliche Defizite sind ein Mangel an Transparenz über die Auswirkungen von unsicheren Auftragszeiten sowie die fehlende Integration von unsicheren Auftragszeiten in die Planung (vgl. Kapitel 3). Aus den Defiziten wurden Anforderungen an die Modellierung unsicherer Auftragszeiten und das Vorgehen zur Handhabung von unsicheren Auftragszeiten abgeleitet. Relevante Anforderungen an die Modellierung sind Transparenz, Zielorientierung und Praxistauglichkeit (Unterkapitel 4.1). Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen wurde eine Modellierung entwickelt, die es gestattet, unsichere Auftragszeiten abzubilden und in die Berechnung der logistischen Zielgrößen zu integrieren. Hierzu werden Merkmale unsicherer Auftragszeiten erfasst. Die unsicheren Auftragszeiten werden als unabhängige Zufallsvariablen interpretiert und mittels Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen modelliert. Weiterhin sind nun die verschiedenen Ursachen von unsicheren Auftragszeiten bekannt. Hauptursache sind Informationsdefizite zum Zeitpunkt der Termin- und Kapazitätsplanung. Weitere Ursachen sind Kundenänderungswünsche und Qualitätsmängel. Weiterhin ist zwischen auftragszeitabhängigen und auftragszeitunabhängigen Unsicherheiten zu differenzieren. Auf Grundlage der Merkmale wurden vier Szenarien für die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten bestimmt. Diese ergeben sich aus der Kombination der unterschiedlichen Ausprägungen der Merkmale der Unsicherheit (systematisch und zufällig).

Zudem wurden die Auswirkungen der unsicheren Auftragszeiten auf die logistischen Zielgrößen qualitativ beschrieben, um den Handlungsbedarf zu ermitteln. Aufbauend auf der Beschreibung der einzelnen Auftragszeit wurden die bestehenden Formeln für die einzelnen logistischen Zielgrößen so modifiziert, dass diese die Unsicherheit abbilden. Dabei wird

zwischen der Auftrags- und Arbeitssystemansicht differenziert. Für die Berechnung der auftragspezifischen Kenngrößen wird die Faltung von Zufallsvariablen genutzt, sodass die logistischen Kenngrößen der Aufträge ebenfalls durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion beschrieben sind. Um die Auswirkungen auf das Arbeitssystem zu erfassen und zu bewerten, wird auf Produktionskennlinien zurückgegriffen. Die unsicheren Auftragszeiten beeinflussen unmittelbar die Auftragszeitstruktur. Um die Auftragszeitstruktur eines Arbeitssystems zu bestimmen, können ein vereinfachtes Berechnungsverfahren auf der Grundlage von Auftragszeitklassen oder eine Monte-Carlo-Simulation genutzt werden.

Zweiter zentraler Bestandteil der Arbeit ist ein Verfahren zur Analyse von unsicheren Auftragszeiten in der Planung. Ziel dieser Analyse ist es, unsichere Auftragszeiten explizit in der Planung zu berücksichtigen. Die entwickelte Analyse ist in die vier Phasen Identifizieren, Quantifizieren, Bewerten und Konfigurieren unterteilt. Das Vorgehen unterstützt den Anwender, unsicheren Auftragszeiten zu begegnen. Das Verfahren eignet sich sowohl für die Analyse eines einzelnen Auftrags als auch für die Analyse der Planung eines Unternehmens. In der ersten Phase werden die Ursachen der Informationsdefizite bestimmt. Mögliche Auslöser sind ungenügende Eingangsdaten oder eine fehlerhafte Datenverarbeitung. Anhand verschiedener Fragen wird der Anwender durch den Planungsprozess geführt. In der zweiten Phase „*Quantifizieren unsicherer Auftragszeiten*“ gilt es, die Ausprägung der unsicheren Auftragszeiten zu bestimmen. Zwei unterschiedliche Ansätze wurden hierfür entwickelt: Erfahrungswerte oder Rückmeldedaten. Ebenfalls Bestandteil dieser Phase ist es, die Auftragszeitstruktur eines Arbeitssystems zu berechnen. In der dritten Phase „*Bewerten unsicherer Auftragszeiten*“ werden die zuvor ermittelten Unsicherheiten bei der Berechnung der logistischen Kenngrößen des Auftrags bzw. des Arbeitssystems berücksichtigt. Dann werden die tatsächlich erreichbaren logistischen Zielgrößen mit den Planwerten, die Gegenstand des Vertrags mit dem Kunden sind, abgeglichen. Der einzelne Auftrag ist anhand der Terminabweichung im Abgang, der Durchlaufzeit und der unsicherheitsbedingten Kosten zu bewerten, während für die Arbeitssysteme die Kenngrößen mittlere Durchlaufzeit, Termintreue und Auslastung zu evaluieren sind. Am Ende dieser Phase sind kritische Aufträge und Arbeitssysteme bekannt. Der Anwender weiß, an welcher Stelle Eingriffe in die Planung erforderlich sind bzw. an welchen Arbeitssystemen innerhalb der Produktion später ein zusätzlicher Steuerungsaufwand entsteht. Die vierte und letzte Phase „*Konfigurieren der Planung bei unsicheren Auftragszeiten*“ umfasst eine Sammlung an Maßnahmen, wie Unternehmen unsicheren Auftragszeiten in der Planung begegnen können. Die Maßnahmen gliedern sich in drei Kategorien. Während einige Maßnahmen die Unsicherheit reduzieren oder auf Dritte übertragen, erlauben es andere, die Auswirkungen der unsicheren Auftragszeiten zu kompensieren. Um die entwickelte Analyse mittels Realdaten zu evaluieren, wurden zwei Anwendungsbeispiele aus der schiffbaulichen Unikatfertigung genutzt. Im Vordergrund steht die Analyse des Arbeitssystems. Die Modellierung eines einzelnen Auftrags und dessen Bewertung wurde anhand eines fiktiven Beispiels durchgeführt. Für beide Anwendungsbeispiele wurde sowohl der Typ als auch die Klasse der unsicheren Auftragszeiten bestimmt. Es wurden Verbesserungspotenziale aufgezeigt und Maßnahmen abgeleitet. Abschließend lässt sich beurteilen, dass die entwickelte Modellierung von unsicheren Auftragszeiten die Anforderungen erfüllt. Sie ermöglicht es, die Planungsqualität der Produktionsplanung trotz unsicherer Auftragszeiten zu gewährleisten und trotz widriger Umstände die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten.

### 7.2 Ausblick

Im Zuge der Arbeit zeigten sich weitere mögliche Forschungsthemen, um das Verständnis unsicherer Auftragszeiten und ihrer Auswirkungen weiter voranzutreiben.

*Verknüpfung mehrerer Arbeitssysteme:* Die Modellierung beschränkt sich bisher auf ein einzelnes Arbeitssystem. Es ist zu untersuchen, welche Auswirkungen unsichere Auftragszeiten haben, wenn mehrere Arbeitssysteme davon betroffen sind. Es ist zu differenzieren, ob der Materialfluss der Arbeitssysteme in Reihe oder parallel geschaltet ist. Insbesondere Verkettungsverluste und weitere Wechselwirkungen gilt es zu beschreiben. Es ist zu untersuchen, inwiefern bestehende Modellierungsansätze genutzt werden können. Ebenfalls von besonderem Interesse ist, welche Arbeitssysteme und Aufträge zu priorisieren sind.

*Verknüpfung mit unsicherer Leistung:* Unsichere Auftragszeiten können mit dem vorgestellten Modellierungsansatz unter den gegebenen Voraussetzungen ausreichend gut abgebildet werden. Zweite wesentliche Einflussgröße auf die Durchführungszeit eines Auftrags ist die maximale Leistung. Bei personalintensiven Tätigkeiten, insbesondere Montagetätigkeiten, variiert die maximale Leistung in Abhängigkeit von der individuellen Fähigkeit und unterliegt ebenfalls einer gewissen Unsicherheit. Es gilt zu untersuchen,

- welche Anpassungen erforderlich sind, um neben unsicheren Auftragszeiten eine unsichere maximale Leistung eines Arbeitssystems zu beschreiben,
- welche Auswirkungen die Überlagerung von unsicheren Auftragszeiten und einer unsicheren Leistung auf die logistischen Zielgrößen hat,
- welche Maßnahmen zur Verfügung stehen.

*Methoden zur Beseitigung von Unsicherheiten:* Die entwickelten Maßnahmen zur Beseitigung der unsicheren Auftragszeiten sind weiter zu untersuchen. In dieser Arbeit stehen die Termin- und Kapazitätsplanung im Fokus. Maßnahmen, um die Qualität der Arbeitsplanung zu steigern, wurden dagegen nur am Rande beleuchtet. Aus diesem Grund sollte separat untersucht werden, ob und wie es überhaupt möglich ist, die vorhandenen Informationsdefizite in der frühen Planung zu beseitigen und den Aufwand hierfür zu quantifizieren.

Wenn diese weiteren Herausforderungen ebenfalls gelöst werden könnten, würde die unsicherheitsbedingte Turbulenz in der Auftragsabwicklung der Unikatproduktion deutlich sinken. Bisher ungenutzte Optimierungspotenziale könnten ausgeschöpft werden. Die Verbesserung der logistischen Zielerreichung könnte einen signifikanten Beitrag zu Steigerung und Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen leisten.



**Literaturverzeichnis**

- Baue07 Bauer, H.: Baubetrieb. Springer. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2007.
- Bech84 Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung:(Rückentitel: Belastungsorientierte Auftragsfreigabe). VDI-Verlag, 1984.
- Benj14 Benjamin, J. R.; Cornell, C. A.: Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. Dover Publications, Newburyport, 2014.
- Böge14 Böge, A.; Böge, W.: Handbuch Maschinenbau. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- Davi08 Davids, N.: Workflow-Management in Produktentwicklungsprojekten der Investitionsgüterindustrie. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2008.
- Domb88 Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. Dissertation, Universität Hannover, Hannover, 1988.
- Eber13 Ebert, C.: Risikomanagement kompakt. Risiken und Unsicherheiten bewerten und beherrschen. Springer Vieweg. 2. Auflage, Berlin Heidelberg, 2013.
- Ecks10 Eckstein, H.; Eichert, J.; Waidmann, J.: Prozessmodell zur Integration von Konstruktion und Montageplanung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 3 (2010) 105, S. 200–205.
- Ecks14 Eckstein, P. P.: Repetitorium Statistik. Deskriptive Statistik - Stochastik - Induktive Statistik. Springer Gabler. 8. Auflage, Wiesbaden, 2014.
- Fell92 Feller, A. H.: Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1992.
- Fisc07 Fischer, P.; Maronde, M.; Schwiers, J. A.: Das Auftragsrisiko im Griff. Ein Leitfaden zur Risikoanalyse für Bauunternehmer. Vieweg, Wiesbaden, 2007.
- Flei97 Fleischmann, H. D.: Bauorganisation: Ablaufplanung, Baustelleneinrichtung, Arbeitsstudium, Bauausführung. Werner-Verlag. 3. Auflage, Düsseldorf, 1997.
- Gahr06 Gahr, A. H.: Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte. Eine flexible entwicklungsbegleitende Kalkulation. Dissertation, Technische Universität München, München, 2006.
- Gebh09 Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Gabler. 1. Auflage, Wiesbaden, 2009.
- Gieb00 Giebels, M. M. T.: ETOPLAN: a concept for concurrent manufacturing planning and control. Building holarchies for manufacture-to-order environments. Dissertation, Universität Twente, Enschede, 2000.
- Grab14 Grabenstetter, D. H.; Usher, J. M.: Developing due dates in an engineer-to-order engineering environment. In: International Journal of Production Research, 21 (2014) 52, S. 6349–6361.

- Gron01 Gronau, N.: Industrielle Standardsoftware. Auswahl und Einführung. De Gruyter, Berlin, Boston, 2001.
- Gruß10 Gruß, R.: Schlanke Unikatfertigung. Zweistufiges Taktphasenmodell zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Unikatfertigung auf Basis der Lean Production. Gabler. 1. Auflage, 2010.
- Haux17 Haux, M. A.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Unsichere Auftragszeiten in der Unikatfertigung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 3 (2017) 112, S. 129–132.
- Hick00 Hicks, C.; Braiden, P. M.: Computer-aided production management issues in the engineer-to-order production of complex capital goods explored using a simulation approach. In: International Journal of Production Research, 18 (2000) 38, S. 4783–4810.
- Hick07 Hicks, C.; Song, D. P.; Earl, C. F.: Dynamic scheduling for complex engineer-to-order products. In: International Journal of Production Research, 15 (2007) 45, S. 3477–3503.
- Hirs92a Hirsch, B.E. (Hrsg.): CIM in der Unikatfertigung und -montage. Leitfaden zum Erfolg. Springer, Berlin, 1992.
- Hirs92b Hirsch, B.; Thoben, K.-D. (Hrsg.): "One-of-a-kind" production. New approaches. Distributors for the U.S. and Canada Elsevier Science; North-Holland, New York, N.Y., U.S.A, Amsterdam, New York, 1992.
- Hoff13 Hoffmann, P.; Schiele, H.; Krabbendam, K.: Uncertainty, supply risk management and their impact on performance. In: Journal of Purchasing and Supply Management, 3 (2013) 19, S. 199–211.
- Hofs07 Hofstadler, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- Jako13 Jakoby, W.: Projektmanagement für Ingenieure. Ein praxisnahes Lehrbuch für den systematischen Projekterfolg. Springer Vieweg. 2. Auflage, Wiesbaden, 2013.
- Jens96 Jensen, T.: Planungsstabilität in der Material-Logistik. Physica-Verlag, Heidelberg, 1996.
- Kers10 Kersten, W.; Singer, C.: Beherrschung von Supply Chain-Risiken durch Flexibilität. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme, Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Gito Verlag, Berlin, 2010, S. 189–210.
- Keup99 Keuper, F.: Fuzzy-PPS-Systeme. Einsatzmöglichkeiten und Erfolgspotentiale der Theorie unscharfer Mengen. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 1999.
- Knet04 Knetsch, T.: Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2004.

- Koh02 Koh, S. C. L.; Saad, S. M.: Development of a business model for diagnosing uncertainty in ERP environments. In: *International Journal of Production Research*, 13 (2002) 40, S. 3015–3039.
- Koh03 Koh, S.C.L.; Saad, S. M.: MRP-controlled manufacturing environment disturbed by uncertainty. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1-2 (2003) 19, S. 157–171.
- Koh06 Koh, S. C. L.; Gunasekaran, A.; Saad, S. M.: Tackling uncertainty in ERP-controlled manufacturing environment. A knowledge management approach. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 7-8 (2006) 31, S. 833–840.
- Kopp17 Koppold, N.: Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2017.
- Kreb11 Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. Dissertation, Technische Universität München, München, 2011.
- Kuck13 Kuckartz, U.; Rädiker, S.; Ebert, T.; Schehl, J.: *Statistik. Eine verständliche Einführung*. Springer VS. 2. Auflage, Wiesbaden, 2013.
- Kuhl94 Kuhlmann Thorsten: *Konzeption und Entwicklung eines Systems zur Koordination der Produktion komplexer Unikate*, Universität Bremen, Bremen, 1994.
- Kust11 Kuster, J.: *Handbuch Projektmanagement*. Springer. Auflage 3., Dordrecht, 2011.
- Lau95 Lau, H.-S.; Somarajan, C.: A proposal on improved procedures for estimating task-time distributions in PERT. In: *European Journal of Operational Research*, 1 (1995) 85, S. 39–52.
- Li08 Li, Z.; Ierapetritou, M.: Process scheduling under uncertainty. Review and challenges. In: *Computers & Chemical Engineering*, 4-5 (2008) 32, S. 715–727.
- Lödd16 Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- Lucz04 Luczak H: *Rationalisierung und Reorganisation*. (Skript zur Vorlesung), 2004.
- Matt15 Matt, D. T.; Rauch, E.; Dallasega, P.; Vidoni, R.; Russo Spena, P.: Synchronisierung von ETO-Fertigung und Baustellenmontage. Montageorientierte Fertigung und Just-in-Time-Baustellenversorgung in Engineer-to-Order-Industrieunternehmen. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 1-2 (2015) 110, S. 9–13.
- Mile74 Miles, R. E.; Snow, C. C.; Pfeffer, J.: Organization-Environment: Concepts and Issues. In: *Industrial Relations*, 3 (1974) 13, S. 244–264.
- Mula06 Mula, J.; Poler, R.; García-Sabater, J. P.; Lario, F. C.: Models for production planning under uncertainty. A review. In: *International Journal of Production Economics*, 1 (2006) 103, S. 271–285.

- Muni14 Munier, N.: Risk Management for Engineering Projects. Procedures, Methods and Tools. Springer, Cham, 2014.
- Nett14 Netthorn, C.; Siemon, F.; Schoeneberg, K.-P.: Komplexität im Wissensmanagement. In: Schoeneberg, K.-P. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern. Gabler, Wiesbaden, 2014, S. 225–247.
- Nyhu12 Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Springer Vieweg. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2012.
- Nyhu91 Nyhuis, P.: Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- Olbr70 Olbrich, W.: Arbeitsplanerstellung unter Einsatz elektronischer Datenverarbeitungsanlagen. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1970.
- Pill06 Piller, F. T.: Mass customization. Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. Deutscher Universitäts-Verlag. 4. Auflage, Wiesbaden, 2006.
- Riis92 Riis, J. O.; Mortensen, H. S.; Johansen, J.: A New Concept for Managing One-of-a-Kind Production. In: Hirsch, B.; Thoben, K.-D. (Hrsg.): "One-of-a-kind" production. New approaches. Distributors for the U.S. and Canada Elsevier Science; North-Holland, New York, N.Y., U.S.A, Amsterdam, New York, 1992, S. 195–208.
- Rimp10 Rimpau, C.: Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte. Dissertation, Technische Universität München, München, 2010.
- Rome18 Romeike, F.: Risikomanagement. Springer Gabler, Wiesbaden, 2018.
- Scha14 Schallow, J.; Erohin, O.; Ernst, J.; Roubanov, J.; Deuse, J.; Eigne, M.: Prospektive Ermittlung von Montagearbeitsinhalten. Gesamtsystematik zur konsistenten Nutzung von Montageplanungsinformationen in der Digitalen Fabrik. In: ZWF, 11 (2014) 109, S. 843–847.
- Schm08 Schmidt, C.: Konfiguration überbetrieblicher Koordinationsprozesse in der Auftragsabwicklung des Maschinen- und Anlagenbaus. Shaker, Aachen, 2008.
- Schm12 Schmidt, C., Cuber, S: Configuration logic of standard business processes for inter-company order management. In: Gokcek, M. (Hrsg.): Mechanical Engineering. IntechOpen, 2012, S. 647–670.
- Schn91 Schneeweiß, C. (Hrsg.): Planung: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Springer, Berlin, Heidelberg, 1991.
- Scho06 Schollenberger, H.: Analyse und Verbesserung der Arbeitsabläufe in Betrieben der Reparaturlackierung. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2006.
- Scho14 Schoeneberg, K.-P. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern. Gabler, Wiesbaden, 2014.

- Schu12 Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- Schu14 Schuh, G.: Handbuch Produktion und Management. Springer Vieweg. 2. Auflage, Berlin [u.a.], 2014.
- Sieb10 Siebertz, K.; van Bebbler, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Springer, Heidelberg, 2010.
- Spec09 Specht, D. (Hrsg.): Weiterentwicklung der Produktion. Tagungsband der Herbsttagung 2008 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB. Gabler, Wiesbaden, 2009.
- Stei07 Steinmetz, M.: Risikosituation und -handhabung in der Produktion: Ein Konzept zur Verbesserung der Risikosituation. TCW-Transfer-Centrum. 1. Auflage, München, 2007.
- Stei17 Steinhauer, D.; Sikorra, J. N.; Haux, M. A.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Processing incomplete data for simulation-based production planning in shipbuilding. In: Journal of Simulation, 1 (2017) 11, S. 30–37.
- Tiet17 Tietze, F.: Analyse und Verbesserung der Arbeitsproduktivität in der Unikatproduktion. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2017.
- Toli11 Tolio, T.; Urgo, M.; Váncza, J.: Robust production control against propagation of disruptions. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1 (2011) 60, S. 489–492.
- Tu06 Tu, Y. L.; Xie, S. Q.; Kam, J. J.: Rapid one-of-a-kind production. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 5-6 (2006) 29, S. 499–510.
- Tu11 Tu, Y.; Dean, P.: One-of-a-Kind Production. Springer, London, 2011.
- Vajn14 Vajna, S. (Hrsg.): Integrated Design Engineering. Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- VDI97 VDI: Simulation von Logistik-, Materialfluß und Produktionssystemen. Experimentplanung und -auswertung, 1997.
- Wagn06 Wagner, U.: Variantenmanagement durch prozessübergreifende Anwendung von Konfiguratoren. In: Zäh, M.; Alders, K. (Hrsg.): Produktionsmanagement. Herausforderung Variantenmanagement. Utz, München, 2006.
- Wand14 Wandt, R.: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Hamburg, Hamburg, 2014.
- Waze09 Wazed, M.; Ahmed, S.; Nukman, Y.: Uncertainty factors in real manufacturing environment. In: Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2 (2009) 3, S. 342–351.
- Waze10 Wazed, M.; Ahmed, S.; Nukman, Y.: A review of manufacturing resources planning models under different uncertainties: state-of-the-art and future directions. In: South African Journal of Industrial Engineering, 1 (2010) 21, S. 17–33.

- Weig08 Weig, S.: Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten. Utz Verlag, München, 2008.
- Wenz13 Wenzel, S.; Laroque, C.: Methodik für ein simulationsgestütztes logistikintegriertes Projektmanagement im Anlagenbau. A simulation-based approach for logistic-integrated projectmanagement for plant engineering. In: HNI-Verlagschriftenreihe 2013 Simulation in Produktion und Logistik (2013).
- Wern02 Werners, B.; Thorn, J.: Supply Chain Planning bei Nachfrageunsicherheit. In: PPS Management, 2 (2002) 7, S. 51–54.
- Wese14 Wesebaum, S.; Klewer, M.; Ullmann, G.: Einflussfaktoren auf Belastungsstreuungen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 10 (2014) 109, S. 726–730.
- Wien02 Wiendahl, H.-P.; Worbs, J.; Peters, K.: Turbulente Zeiten - Nichtlineare Dynamik in der Produktionslogistik. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 12 (2002), S. 633–637.
- Wien03 Wiendahl, H.-P.: Wie aus der Logistik eine Wissenschaft wurde. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Die wandlungsfähige Fabrik. Integrierte Sicht von Fabrikstruktur, Logistik und Produktionssystemen. Tagungsband zur IFA-Fachtagung 2003, 2003.
- Wien09 Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. Hanser, München, 2009.
- Yu01 Yu, K.-W.: Terminkennlinie : eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Dissertation, Universität Hannover, Hannover, 2001.
- Zimm01 Zimmermann, H.-J.: Fuzzy set theory - and its applications. Kluwer Academic Publishers. 4. Auflage, Boston, Mass., 2001.

## Anhang

Der Anhang besteht aus drei Teilen. Teil A enthält den Versuchsplan und die Ergebnisse aus dem beispielhaften Vergleich der Verfahren zum Quantifizieren der Auftragszeitstruktur (siehe Abschnitt 5.3.2). Teil B enthält weitere Formeln, die bei der Berechnung der Produktionskennlinien eingesetzt wurden. Teil C enthält die Berechnungen der Produktionskennlinien des zweiten Anwendungsbeispiels.

### Teil A

Tabelle 21: Versuchsplan für die Berechnung bzw. Simulation der Auftragszeitstruktur

Merkmals	Ausprägung
Software	MS Excel 365
Anzahl Simulationsläufe	10000
Anzahl Aufträge je Simulationslauf	150
Anzahl Klassen	1
Verteilungstyp der relativen Unsicherheit	Gleichverteilung
Verteilungstyp der Plan-Auftragszeiten	Gleichverteilung
$ZAU_{m,ist}$ [Std]	40
$ZAU_{s,ist}$ [Std]	11,8
$U_{r,m}$ [%]	30
$U_{r,s}$ [%]	37

Tabelle 22: Beispielhaft berechnete bzw. simulierte Auftragszeitstruktur

Verfahren	$ZAU_m$ [Std]	$ZAU_s$ [Std]	$ZAU_v$ [-]
Monte-Carlo-Simulation	51,7	22,3	0,84
Vereinfachte Berechnung	52,0	21,9	0,86

**Teil B**

Um die Produktionskennlinien zu berechnen, wird auf weitere Formeln zurückgegriffen (vgl. [Nyhu12]).

Für die mittlere Reichweite gilt:

$$R_m = \frac{B_m}{L_m} \quad (34)$$

$B_m$	<i>mittlerer Bestand [Std]</i>
$L_m$	<i>mittlere Leistung [Std/BKT]</i>
$R_m$	<i>mittlere Reichweite [BKT]</i>

Für die mittlere Durchlaufzeit gilt:

$$ZDL_m = R_m - ZDF_m \cdot ZDF_v^2 \quad (35)$$

$R_m$	<i>mittlere Reichweite [BKT]</i>
$ZDF_m$	<i>mittlere Durchführungszeit [BKT]</i>
$ZDF_v$	<i>Variationskoeffizient der Durchführungszeit [-]</i>
$ZDL_m$	<i>mittlere Durchlaufzeit [BKT]</i>

Außerdem gilt für die mittlere Durchlaufzeit:

$$ZDL_m = ZDF_m + ZUE_m \quad (36)$$

$ZDF_m$	<i>mittlere Durchführungszeit [BKT]</i>
$ZDL_m$	<i>mittlere Durchlaufzeit [BKT]</i>
$ZUE_m$	<i>mittlere Übergangszeit [BKT]</i>

Die Auslastung berechnet sich gemäß:

$$A_m = \frac{L_m}{L_{max}} \quad (37)$$

$A_m$	<i>mittlere Auslastung [%]</i>
$L_m$	<i>mittlere Leistung [Std/BKT]</i>
$L_{max}$	<i>maximale Leistung [Std/BKT]</i>

Der ideale Mindestbestand eines übergeordneten Systems berechnet sich gemäß:

$$BI_{min} = \sum_j^{AAP} BI_{min,j} \quad (38)$$

$BI_{min}$	<i>idealer Mindestbestand [Std]</i>
$BI_{min,j}$	<i>idealer Mindestbestand am Arbeitssystem j [Std]</i>
$AAP$	<i>Anzahl Arbeitsplätze [-]</i>

Für die maximal mögliche Leistung eines übergeordneten Systems gilt:

$$L_{max} = \sum_j^{AAP} L_{max,j} \quad (39)$$

$L_{max}$             *maximal mögliche Leistung [Std/BKT]*

$L_{max,j}$         *maximal mögliche Leistung am Arbeitssystem j [Std/BKT]*

$AAP$             *Anzahl Arbeitsplätze [-]*

## Teil C

Tabelle 23: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem I – Plan-Szenario

<b>B<sub>m</sub></b> <b>[Std]</b>	<b>L<sub>m</sub></b> <b>[Std/BKT]</b>	<b>ZDL<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>R<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>A<sub>m</sub></b> <b>[%]</b>	<b>ZDF<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>ZUE<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>
57,9	12,0	2,9	4,8	10	2,9	0,0
115,8	24,0	2,9	4,8	20	2,9	0,0
174,0	36,0	2,9	4,8	30	2,9	0,0
232,8	48,0	2,9	4,8	40	2,9	0,0
293,2	60,0	3,0	4,9	50	2,9	0,1
357,5	72,0	3,1	5,0	60	2,9	0,1
431,7	84,0	3,2	5,1	70	2,9	0,3
532,9	96,0	3,6	5,6	80	2,9	0,7
733,5	108,0	4,9	6,8	90	2,9	2,0
810,8	110,4	5,4	7,3	92	2,9	2,5
921,0	112,8	6,3	8,2	94	2,9	3,3
1096,4	115,2	7,6	9,5	96	2,9	4,7
1444,8	117,6	10,4	12,3	98	2,9	7,5
6368,6	120,0	51,2	53,1	100	2,9	48,2

Tabelle 24: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem I – Ist-Szenario

<b>B<sub>m</sub></b> <b>[Std]</b>	<b>L<sub>m</sub></b> <b>[Std/BKT]</b>	<b>ZDL<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>R<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>A<sub>m</sub></b> <b>[%]</b>	<b>ZDF<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>ZUE<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>
35,0	12,0	1,7	2,9	10	1,7	0,0
70,0	24,0	1,7	2,9	20	1,7	0,0
105,2	36,0	1,7	2,9	30	1,7	0,0
140,7	48,0	1,7	2,9	40	1,7	0,0
177,2	60,0	1,7	3,0	50	1,7	0,0
216,1	72,0	1,8	3,0	60	1,7	0,1
260,9	84,0	1,9	3,1	70	1,7	0,2
322,1	96,0	2,1	3,4	80	1,7	0,4
443,4	108,0	2,9	4,1	90	1,7	1,2
490,1	110,4	3,2	4,4	92	1,7	1,5
556,7	112,8	3,7	4,9	94	1,7	2,0
662,7	115,2	4,5	5,8	96	1,7	2,8
873,4	117,6	6,2	7,4	98	1,7	4,5
3849,6	120,0	30,9	32,1	100	1,7	29,2

Tabelle 25: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem I – nach Kapazitätsverminderung

<b>B<sub>m</sub></b> <b>[Std]</b>	<b>L<sub>m</sub></b> <b>[Std/BKT]</b>	<b>ZDL<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>R<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>A<sub>m</sub></b> <b>[%]</b>	<b>ZDF<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>ZUE<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>
17,5	6,0	1,7	2,9	10	1,7	0,0
35,0	12,0	1,7	2,9	20	1,7	0,0
52,6	18,0	1,7	2,9	30	1,7	0,0
70,4	24,0	1,7	2,9	40	1,7	0,0
88,6	30,0	1,7	3,0	50	1,7	0,0
108,1	36,0	1,8	3,0	60	1,7	0,1
130,5	42,0	1,9	3,1	70	1,7	0,2
161,1	48,0	2,1	3,4	80	1,7	0,4
221,7	54,0	2,9	4,1	90	1,7	1,2
245,0	55,2	3,2	4,4	92	1,7	1,5
278,4	56,4	3,7	4,9	94	1,7	2,0
331,4	57,6	4,5	5,8	96	1,7	2,8
436,7	58,8	6,2	7,4	98	1,7	4,5
1924,8	60,0	30,9	32,1	100	1,7	29,2

Tabelle 26: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem II – Plan-Szenario

<b>B<sub>m</sub></b> <b>[Std]</b>	<b>L<sub>m</sub></b> <b>[Std/BKT]</b>	<b>ZDL<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>R<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>A<sub>m</sub></b> <b>[%]</b>	<b>ZDF<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>ZUE<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>
65,1	12,0	3,2	5,4	10	3,2	0,0
130,3	24,0	3,2	5,4	20	3,2	0,0
195,6	36,0	3,2	5,4	30	3,2	0,0
261,7	48,0	3,2	5,5	40	3,2	0,0
329,7	60,0	3,2	5,5	50	3,2	0,1
402,0	72,0	3,3	5,6	60	3,2	0,2
485,4	84,0	3,5	5,8	70	3,2	0,4
599,2	96,0	4,0	6,2	80	3,2	0,8
824,8	108,0	5,4	7,6	90	3,2	2,2
911,7	110,4	6,0	8,3	92	3,2	2,8
1035,6	112,8	6,9	9,2	94	3,2	3,8
1232,8	115,2	8,5	10,7	96	3,2	5,3
1624,6	117,6	11,6	13,8	98	3,2	8,4
7161,1	120,0	57,4	59,7	100	3,2	54,3

Tabelle 27: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem II – Ist-Szenario

<b>B<sub>m</sub></b> <b>[Std]</b>	<b>L<sub>m</sub></b> <b>[Std/BKT]</b>	<b>ZDL<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>R<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>A<sub>m</sub></b> <b>[%]</b>	<b>ZDF<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>ZUE<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>
124,3	12,0	5,0	10,4	10	5,0	0,0
248,6	24,0	5,0	10,4	20	5,0	0,0
373,5	36,0	5,0	10,4	30	5,0	0,0
499,6	48,0	5,0	10,4	40	5,0	0,1
629,3	60,0	5,1	10,5	50	5,0	0,1
767,4	72,0	5,3	10,7	60	5,0	0,3
926,6	84,0	5,6	11,0	70	5,0	0,7
1143,7	96,0	6,5	11,9	80	5,0	1,6
1574,3	108,0	9,2	14,6	90	5,0	4,2
1740,2	110,4	10,4	15,8	92	5,0	5,4
1976,8	112,8	12,1	17,5	94	5,0	7,2
2353,2	115,2	15,0	20,4	96	5,0	10,1
3101,1	117,6	21,0	26,4	98	5,0	16,0
13669,0	120,0	108,5	113,9	100	5,0	103,6

Tabelle 28: Berechnung der Produktionskennlinien für Arbeitssystem II – nach Kapazitäts-  
erhöhung

<b>B<sub>m</sub></b> <b>[Std]</b>	<b>L<sub>m</sub></b> <b>[Std/BKT]</b>	<b>ZDL<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>R<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>A<sub>m</sub></b> <b>[%]</b>	<b>ZDF<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>	<b>ZUE<sub>m</sub></b> <b>[BKT]</b>
186,4	21,6	4,1	8,6	10	4,1	0,0
373,0	43,2	4,1	8,6	20	4,1	0,0
560,2	64,8	4,2	8,6	30	4,1	0,0
749,4	86,4	4,2	8,7	40	4,1	0,0
943,9	108,0	4,3	8,7	50	4,1	0,1
1151,1	129,6	4,4	8,9	60	4,1	0,3
1389,8	151,2	4,7	9,2	70	4,1	0,6
1715,6	172,8	5,4	9,9	80	4,1	1,3
2361,4	194,4	7,7	12,1	90	4,1	3,5
2610,3	198,7	8,6	13,1	92	4,1	4,5
2965,1	203,0	10,1	14,6	94	4,1	6,0
3529,9	207,4	12,5	17,0	96	4,1	8,4
4651,6	211,7	17,5	22,0	98	4,1	13,3
20503,6	216,0	90,4	94,9	100	4,1	86,3

## 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 Strategieumsetzung – 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 Standzeitorientierung 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.

**Band 45**

Sikorra, Jan Niklas: Frühzeitige Aufwands- und Termineinschätzung der schiffbaulichen Unikatproduktion, 2021.

**Band 46**

Haux, Moritz A.: Modellierung von Unsicherheiten in der Planung der Unikatproduktion, 2021.