

Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Nico Koppold

aus

Schrobenhausen

2017

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

2. Gutachter: Prof. Dr. Thorsten Blecker

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Mai 2017

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

Denickestr. 17

21073 Hamburg

Band 34:

Nico Koppold

Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern

1. Auflage

München 2017

ISSN 1613-8244

Copyright Nico Koppold 2017

Herstellung:

Elbepartner Breitschuh & Kock GmbH

Friesenweg 5b

22763 Hamburg

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Produktionsplaner in der MTU Berlin-Brandenburg. Ohne die vielen Unterstützer hätte ich diese Arbeit nicht erstellen können. Ihnen allen danke ich sehr für ihr Vertrauen und ihre Zuversicht.

Insbesondere möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding für das Vertrauen und die Unterstützung danken. Herr Lödding nahm sich viel Zeit für interessante Diskussionen und neue Anregungen zu meiner Arbeit und motivierte mich über den langen Zeitraum der Erstellung durch kritische Nachfragen und konkrete Verbesserungsvorschläge. Ebenso danke ich Prof. Dr. Thorsten Blecker für die Übernahme des Korreferats.

Christoph Santjohanser und Eva Meijnen ermöglichten mir die beruflichen Freiräume und legten den Grundstein für meine Arbeit. Ich danke ihnen für die Unterstützung und Beharrlichkeit, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Meinen Arbeitskollegen möchte ich für die vielen Anregungen, die Hilfsbereitschaft und die Arbeitsatmosphäre danken, die mich insbesondere in schweren Phasen der Arbeit immer wieder motiviert hat.

Ich widme diese Arbeit meiner Tochter Olivia und meinem Sohn Bela. Sie prägten in Ihren ersten Lebensjahren die Entstehung der Arbeit durch ihre Lebensfreude und unsere schlaflosen Nächte. Ebenfalls danke ich meinen Eltern Ilse und Hans für alles, was sie für mich getan haben. Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Kathrin. Durch ihre Unterstützung, Zuversicht und Ermunterung konnte ich letztendlich meine Arbeit abschließen.

München, 16. Juni 2017

Nico Koppold

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG.....	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung.....	4
1.3	Aufbau und Vorgehensweise	6
2	GRUNDLAGEN DER INSTANDHALTUNGSPRODUKTION UND DER PPS..	9
2.1	Begriffsdefinition.....	9
2.1.1	<i>Unsicherheit</i>	9
2.1.2	<i>Instandhaltung</i>	10
2.1.3	<i>Investitionsgüter</i>	11
2.2	Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern.....	11
2.3	Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung	15
2.4	Abgrenzung des Untersuchungsgebietes	19
3	UN SICHERHEIT IN DER INSTANDHALTUNGSPRODUKTION	21
3.1	Ursachen der Unsicherheit.....	22
3.2	Informationsverfügbarkeit und Entwicklung der Unsicherheit	25
3.2.1	<i>Informationsverfügbarkeit</i>	25
3.2.2	<i>Entwicklung der Unsicherheit im Verlauf der Instandhaltungsproduktion</i>	31
3.3	Umgang mit Unsicherheit und ihren Folgen.....	32
3.3.1	<i>Reduzierung der Unsicherheit durch Informationsbeschaffung</i>	33
3.3.2	<i>Beherrschung der Folgen der Unsicherheit durch Flexibilität</i>	35
3.3.3	<i>Absicherung gegen Unsicherheit</i>	36
3.4	Verläufe der Unsicherheit	38
3.4.1	<i>Grundsätzliche Zusammenhänge der Unsicherheit</i>	39
3.4.2	<i>Effizienz in der Informationsbeschaffung und in der Reduzierung der Unsicherheit</i>	41

3.4.3	<i>Verwendung der Verläufe</i>	42
4	ANPASSUNG DER PPS AN DIE INSTANDHALTUNGSPRODUKTION	45
4.1	Anforderungen an die Aufgaben der PPS	45
4.2	Handlungsfelder für die Aufgaben der PPS	50
5	BESTIMMUNG DER UNSICHERHEIT DER AUFTRAGSZEIT	53
5.1	Klassifizierung der Planungsgrößen	53
5.2	Auswahl der Detailtiefe und Einflussfaktoren	56
5.3	Ermittlung der Verteilung der Auftragszeit	69
5.3.1	<i>Anforderung an die Verteilung und Einschränkung des Untersuchungsbereichs</i>	71
5.3.2	<i>Schätzung der Parameter und Bewertung des Anpassungsergebnisses</i>	73
5.3.3	<i>Erzeugung einer passenden Verteilung durch Transformation</i>	79
5.4	Kombination von Verteilungen durch Faltung	88
5.5	Chancen und Herausforderungen zur Messung der Unsicherheit	93
6	KAPAZITÄTSPLANUNG UND -STEUERUNG UNTER UNSICHERHEIT	95
6.1	Kapazitätsplanung unter Unsicherheit	95
6.1.1	<i>Belastungsplanung unter Unsicherheit</i>	95
6.1.2	<i>Kapazitätsabgleich mit der Kapazitätsflexibilitätsmatrix</i>	98
6.1.3	<i>Umgang mit Flexibilitätsdefiziten</i>	102
6.2	Kapazitätssteuerung unter Unsicherheit	104
6.2.1	<i>Implementierung einer Rückstandsregelung für die Instandhaltungsproduktion</i>	105
6.2.2	<i>Kurzzyklische Bestimmung des Mitarbeiterereinsatzes durch die Kapazitätsflexibilitätsmatrix</i>	106
7	ÜBERTRAGUNG AUF AUSPRÄGUNGEN DER INSTANDHALTUNGSPRODUKTION	109
7.1	Rahmenbedingungen der Fallstudien	109

7.2	Effektberechnung und Klassifizierung	112
7.2.1	<i>Effektberechnung</i>	112
7.2.2	<i>Interpretation der Ergebnisse und Klassifizierung</i>	114
7.3	Kapazitätsplanung.....	117
7.3.1	<i>Belastungsplanung</i>	117
7.3.2	<i>Kapazitätsabgleich</i>	119
7.3.3	<i>Umgang mit Flexibilitätsdefiziten</i>	122
7.4	Kapazitätssteuerung und Einsatz der Mehrfachqualifikation	128
8	SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK	131
9	ANHANG	135
9.1	R- Programmcode zur Anpassung der speziellen Verteilungen an die Stichproben	135
9.2	R- Programmcode zur Versuchsdurchführung der DoE.....	139
9.3	R- Programmcode zur Bestimmung der Klassen.....	141
10	LITERATUR	142

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Zeichen	Beschreibung
AS	Arbeitssystem
BKT	Betriebskalendertag
BO	Bohren
DR	Drehen
Fauf	Fertigungsauftrag
Fis	Fischerverteilung
FPG	Flugzeugtriebwerke privater und gewerblicher Kunden
FR	Fräsen
FRL	Flugzeugtriebwerke regionaler Luftfahrunternehmen
Gam	Gammaverteilung
GH	Gehäuseschleifen
IGT	Industriegasturbine
IHE	Instandhaltungsereignis
KBFM	Matrix der Mitarbeiterdisposition
KBM	Kapazitätsbelastungsmatrix
KFM	Kapazitätsflexibilitätsmatrix
KG	Kapazitätsgruppe
KW	Kalenderwoche
lNorm	Logarithmische Normalverteilung
LA	Labor
Log	Logistische Verteilung
MR	Manuelle Reparatur
MS	Montageschleifen
Norm	Normalverteilung
OT	Oberflächentechnik
PD	Produktdetail
RB	Rahmenbedingung
SB	Schlussbefund
SC	Schleifen
sNorm	schiefe Normalverteilung
SS	Schaufelschleifen

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Std.	Stunden
Stk.	Stück
UVF	Unsicherheitsverteilungsfunktion
VarK	Variationskoeffizient
Wei	Weibullverteilung

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	-	Faktor zur Bestrafung der Arbeitszeitveränderung
σ	[h]	Standardabweichung
A	-	Normierungskoeffizient
AZF	-	Arbeitszeitfaktor der Kapazitätsgruppe
b	[h]	Standardabweichung
B	[h]	Belastung
E	-	Effekt
f	-	Verteilung f
F	-	Faltung
g	-	Verteilung g
h	-	Verteilung h
i	-	Zeile der Matrix
j	-	Spalte der Matrix
k	[Stk]	Anzahl der Kapazitätsgruppen
K_l	-	Korrekturfaktor des Lageparameters
K_σ	-	Korrekturfaktor des Steuerparameters
K_s	-	Korrekturfaktor des Schiefeparameters
KFM	-	Kapazitätsflexibilitätsmatrix
Koeff _s	-	Schiefekoeffizient
m	[h]	Mittelwert
ME	-	Matrix der Mitarbeiterdisposition
n	[Stk]	Stichprobenumfang
RB	-	Randbedingung
s	-	Schiefe
$t_{X\%;N}$	-	Wert der t-Verteilung mit Signifikanzniveau X% und Anzahl

		Stichproben N
v	[%]	Ergebnis des Variationskoeffizienten für einen Versuch
VA	-	Variablen
VI _X	-	Vertrauensintervall bei Signifikanzniveau X%
\bar{x}	[h]	Mittelwert
x	-	Einzelwert der Stichprobe
ZF	-	Zielfunktion

Verzeichnis der verwendeten Indizes

Zeichen Beschreibung

i	Zählvariable, Zeile der Matrix
j	Zählvariable, Spalte der Matrix
K	Kunde
L	Leistungsumfang
neg	negative Faktorausprägung
P	Produkt
pos	positive Faktorausprägung
U	Ursache
V	Vertrag

1 Einführung

Kunden stellen hohe Anforderungen an die Instandhaltung ihrer hochwertigen Investitionsgüter und messen die Dienstleister an Termintreue, Durchlaufzeit und Kosten. Technischer Fortschritt und der steigende Kostendruck der Unternehmen fordern von den Dienstleistern der Instandhaltungsproduktion neue Strategien, um die Verfügbarkeit sicherzustellen und wirtschaftliche Rahmenbedingungen einzuhalten. Jede Instandhaltung beinhaltet eine individuelle Problemstellung mit nicht beeinflussbaren und unbekanntem Faktoren. Insbesondere der Zustand der Instandhaltungsobjekte definiert maßgeblich den Arbeitsaufwand, die Durchlaufzeit und die Kosten eines Instandhaltungsereignisses. Der Dienstleister befindet sich somit in einer unsicheren Ausgangslage für die Planung und Durchführung des Auftrages, ist jedoch trotzdem in der Pflicht, die vom Kunden geforderten Durchlaufzeiten und Kosten einzuhalten.

Ein Ansatz, diesen Anforderungen zu begegnen, ist die Verbesserung der Prognose der Arbeitsinhalte, um eine möglichst stabile Kapazitätsplanung durchzuführen [Eick14]. Da Unsicherheit nie vollständig reduziert werden kann [Aytu05], definiert diese Arbeit einen weiteren Ansatz und beschreibt die Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion als Teil der Planungsgrößen der Kapazitätsplanung und -steuerung. Transparenz über die Unsicherheiten ermöglicht Unternehmen einen aktiven Umgang mit Unsicherheit und ihren Folgen, indem sie unsichere Situationen auflösen, mindern oder absichern. Diese Arbeit stellt am Beispiel der Auftragszeiten eine Vorgehensweise zur Messung der Unsicherheit für Planungsgrößen der Kapazitätsplanung und -steuerung vor und erläutert Methoden zum Umgang mit vorhandenen Unsicherheiten. Die Methoden dieser Arbeit erweitern etablierte Methoden der Planung und Steuerung und legen einen Schwerpunkt auf die Umsetzung im Unternehmen.

Die folgenden Kapitel beschreiben zunächst die Grundlagen der Instandhaltungsproduktion und der Produktionsplanung und -steuerung. Empirische Daten von Dienstleistern der Instandhaltungsproduktion unterstützen die Ausführungen dieser Arbeit und zeigen die Komplexität der Problemstellung, den hohen Anspruch an die Lösung und die Vielseitigkeit der vorgestellten Methoden. Die Möglichkeit, die Unsicherheit der Auftragszeiten zu bestimmen, liefert die Grundlage zur Anpassung der Methoden der Planung und Steuerung. Zuletzt validieren empirische Daten der Instandhaltungsproduktion die Erkenntnisse und Vorgehensweisen dieser Arbeit.

1.1 Problemstellung

Die Problemstellung dieser Arbeit stützt sich auf die Rahmenbedingungen der Instandhaltungsproduktion und ihren Einfluss auf die Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Dieser Abschnitt beschreibt diese Rahmenbedingungen und die daraus resultierende Problemstellung für die Aufgaben der PPS.

Die Informationen zum Zustand des Investitionsgutes sind ungenügend oder fehlen

Der Zustand eines Investitionsgutes hängt nicht nur vom Alter, sondern insbesondere von der Nutzung durch den Kunden ab [Rupp01]. Die Kunden der Instandhaltungsproduktion nutzen Investitionsgüter im industriellen, gewerblichen oder privaten Rahmen. Das Verständnis komplexer technischer Zusammenhänge unterscheidet sich: Je umfangreicher die eigenen Maßnahmen der Instandhaltung am Investitionsgut sind, desto höher ist das Verständnis über die Rahmenbedingungen der Instandhaltung und über die benötigten Informationen für die Instandhaltungsdienstleister. Daher sind Informationen der Kunden zum Umfang einer Instandhaltungsdienstleistung an ihren Investitionsgütern meist nicht ausreichend, ungenau oder falsch. Zusätzlich können auch Entscheidungen der Kunden während der Dienstleistung zu Veränderungen des Leistungsumfanges, Verzögerungen des Leistungsstarts oder Stornierungen führen [Exle98]. Der Befund eines unerwarteten Schadens am Investitionsgut kann z. B. zu Rücksprachen mit dem Kunden führen und die Instandhaltung verzögern oder die Stornierung des Auftrages nach sich ziehen. Informationen zum Zustand des Investitionsgutes und zum Leistungsumfang der Dienstleistung sind somit unsicher. Eickemeyer [Eick12] schlägt die Nutzung Bayes'scher Netze zur Prognose der Auftragszeiten eines Instandhaltungsereignisses vor. Die PPS kann damit Planungsgrößen erzeugen, verliert aber die Informationen zu möglichen Abweichungen und damit zur Unsicherheit der Planungsergebnisse.

Erst die Demontage und der Befund offenbaren den tatsächlichen Leistungsumfang

Instandhaltungsmaßnahmen haben unterschiedliche Ursachen. Treten Fehler in der Leistung oder der Funktion eines Investitionsgutes auf, müssen die Ursachen zunächst ermittelt und die erforderlichen Leistungsumfänge daran angepasst werden. Für die Instandhaltung komplexer Investitionsgüter werden Arbeitsanweisungen daher während der Zerlegung, Reinigung und Inspektion aufgrund neuer Befunde erzeugt [Luh03]. Entdeckte Schäden führen zu weiteren Demontagen und Inspektionen. Erst der Befund der einzelnen Bauteile definiert den genauen

Umfang der Dienstleistung [Luh03, Spee93]. Selbst nach dem Befund beeinflussen Entscheidungen über Verschrottung und Neuteilbeschaffung oder Verhandlungen mit Kunden und externen Dienstleistern sowie Vorgaben von Herstellern oder Behörden den erforderlichen Leistungsumfang [Herd13]. Die Termin- und Kapazitätsplanung muss angepasst werden, um den Arbeitsumfang von Instandhaltungsereignissen trotz dieser Unsicherheit zu definieren und es zu ermöglichen, eine Veränderung des geplanten Arbeitsumfangs während des Produktionsprozesses zu berücksichtigen.

Der Leistungsstart ist meist plötzlich, ungenau oder schwankend

Neben dem Liefertermin beeinflussen die Kunden der Instandhaltungsproduktion auch den Termin für den Leistungsstart durch die Bereitstellung des Instandhaltungsobjektes. Insbesondere Instandsetzungsmaßnahmen, also Maßnahmen aufgrund einer Störung am Investitionsgut, treten plötzlich oder zumindest mit nur geringem zeitlichen Vorlauf auf. Instandhaltungsmaßnahmen können vom Kunden grundsätzlich zwar besser geplant und kommuniziert werden. Auch sie werden jedoch verschoben, wenn die Rahmenbedingungen des Kunden es erfordern [Luh03]. Die Produktionsplanung und -steuerung muss daher kontinuierlich neue Rahmenbedingungen berücksichtigen, Termine anpassen und Kapazitäten flexibel bereitstellen.

Kunden fordern kurze Durchlaufzeiten und eine hohe Liefertreue

Investitionsgüter haben einen besonderen Kundenkreis mit unterschiedlicher Nutzung der Investitionsgüter [Bark06]; sie fordern individuelle Instandhaltungsangebote von Dienstleistern [Kinn04]. Die Dienstleister unterhalten demnach ein breites Kundenspektrum mit unterschiedlichen Anforderungen an Durchlaufzeit und Leistungsumfang [Exle98, Pata04]. Fehlende Liefertreue erzeugt meist Kosten bei dem Kunden, der dem Dienstleister bei Nichterfüllung Pönalen in Rechnung stellt [Helf11]. Aus langen Durchlaufzeiten folgt u. U. die verlängerte Bereitstellung von Ersatzgütern durch den Dienstleister für die Dauer der Dienstleistung. Die Durchlaufzeit ist ein Wettbewerbsfaktor, der über Gewinn oder Verlust eines Dienstleistungsauftrages entscheidet und meist unabhängig vom Schadensfall des Instandhaltungsobjektes ist [Burk10]. Kunden planen die vereinbarte Durchlaufzeit als Ausfall und bestehen auf der Vertragserfüllung, unabhängig vom Schadensfall (vgl. Festpreisverträge in der Triebwerksinstandhaltung [Gral97]).

Die Technologie der Produkte ist komplex

Im Lebenszyklus eines Produktes entstehen unterschiedliche Herausforderungen [Herd13]: Junge Produkte weisen häufig undefinierte Schadensbilder auf und beschränken sich meist auf wenige kleine Leistungsumfänge (z. B. Wiederherstellung der Leistung oder Beseitigung der Ursache eines Ölverlustes). Unbekannte Schäden führen zu Rücksprachen mit Herstellern und Behörden und verzögern den Auftragsdurchlauf durch neu zu entwickelnde Reparaturprozesse [Exle98]. Ältere Produkte ermöglichen es dem Dienstleister, Überholungsumfänge mit klar definierten Leistungen durchzuführen. Die Leistungsumfänge sind insgesamt werthaltiger, da aufgrund der längeren Betriebsdauer mehr Teile repariert oder ersetzt werden müssen. Die häufig sehr unterschiedlichen Leistungsumfänge der Produkte erhöhen die Komplexität, erzeugen Belastungsspitzen in unterschiedlichen Bereichen und erschweren die Planung des Wiederaufbaus [Luh03]. Die Beherrschung dieser Komplexität erfordert eine hohe Flexibilität und eine breite Qualifizierung der Mitarbeiter. In der Luftfahrt müssen Mitarbeiter besonders umfangreich qualifiziert werden, um die gegebenen Regularien und Sicherheitsanforderungen zu verinnerlichen [Pata04].

Originalhersteller, externe Dienstleister und staatliche Behörden beeinflussen die Prozesse

Die Originalhersteller der Investitionsgüter definieren Vorgaben zum Umgang mit und zur Instandhaltung ihrer Produkte. Sie regeln auch den Austausch von Bauteilen durch Neuteile oder den Verbau von Teilen anderer Hersteller [Exle98]. Neue Prozesse oder Verfahren müssen somit zunächst abgestimmt und genehmigt werden. Spezielle Verfahren führen u. U. dazu, dass der Dienstleister von weiteren externen Zulieferern abhängig ist [Pfef03], da er nicht die Zulassung oder das Wissen besitzt, das Verfahren selbst wirtschaftlich durchzuführen. Zudem können auch staatliche Behörden Vorgaben zu Prozessen und Qualitätsmanagement aufstellen und deren Einhaltung überwachen (vgl. [Exle98] oder [Kinn04]).

1.2 Zielsetzung

Die Problemstellung dieser Arbeit zeigt eine Vielzahl von Handlungsfeldern auf. Folgende drei Aufgabenpakete beschreiben die Zielsetzung dieser Arbeit.

1. Bestimmung und Beeinflussung der Unsicherheit der Planauftragszeiten in der Instandhaltungsproduktion

Diese Arbeit stellt eine Möglichkeit vor, die Unsicherheit der Auftragszeiten durch die Beschaffung und Nutzung von Informationen zu bestimmen und zu beeinflussen. Die Verfügbarkeit und die Verarbeitung von Informationen zu Instandhaltungsereignissen definieren die Planauftragszeit und die Unsicherheit der Planung. Um Unsicherheit zu beherrschen, beschreiben die Methoden dieser Arbeit den Umgang mit Informationen und die Ermittlung ihrer Effekte auf die Auftragszeiten. Das erste Ziel dieser Arbeit ist es, die Informationen mit dem größten Einfluss auf die Auftragszeiten zu identifizieren und diese Informationen zur Klassifizierung der Planungsgrößen zu nutzen. Die Effektberechnung und die Klassifizierung ermöglichen es, Planauftragszeiten zu definieren und eine Methode zur Messung der Unsicherheit der Auftragszeiten zu entwickeln.

2. Erweiterung der Kapazitätsplanung, -abstimmung und -steuerung um die Unsicherheit der Auftragszeiten

Die Klassifizierung der Planungsgröße, die Definition der Planauftragszeit und die Quantifizierung der Unsicherheit der Auftragszeiten ermöglicht es der PPS, Unsicherheit in der Kapazitätsplanung und -steuerung zu berücksichtigen. Ausgehend von den Aufgaben der PPS beschreibt diese Arbeit das Anforderungsprofil, das sich aufgrund der Unsicherheit in den Auftragszeiten ergibt und erläutert eine Methode zur Kapazitätsplanung und -steuerung bei unsicheren Auftragszeiten. Durch die Quantifizierung der Unsicherheit der Auftragszeiten spiegeln auch die Ergebnisse der Planung und Steuerung diese Unsicherheit wider. Diese Arbeit beschreibt Maßnahmen zur Beherrschung der Unsicherheit und stellt eine Methode vor, um die Kapazitätsflexibilität an die vorhandene Unsicherheit anzupassen.

3. Validierung der Methoden durch Übertragung auf unterschiedliche Instandhaltungsdienstleister

Drei Dienstleister der Instandhaltungsproduktion liefern unterschiedliche Rahmenbedingungen zur Validierung der Methoden. Anhand abgeschlossener Instandhaltungsereignisse bestimmt die Arbeit die Unsicherheit der Planungsparameter je Fallstudie, führt die Kapazitätsplanung und -steuerung durch und validiert die Ergebnisse anhand der realen Situation.

1.3 Aufbau und Vorgehensweise

Acht Kapitel gliedern diese Arbeit. Abbildung 1 verdeutlicht den Aufbau der Arbeit und die Zusammenhänge der Kapitel:

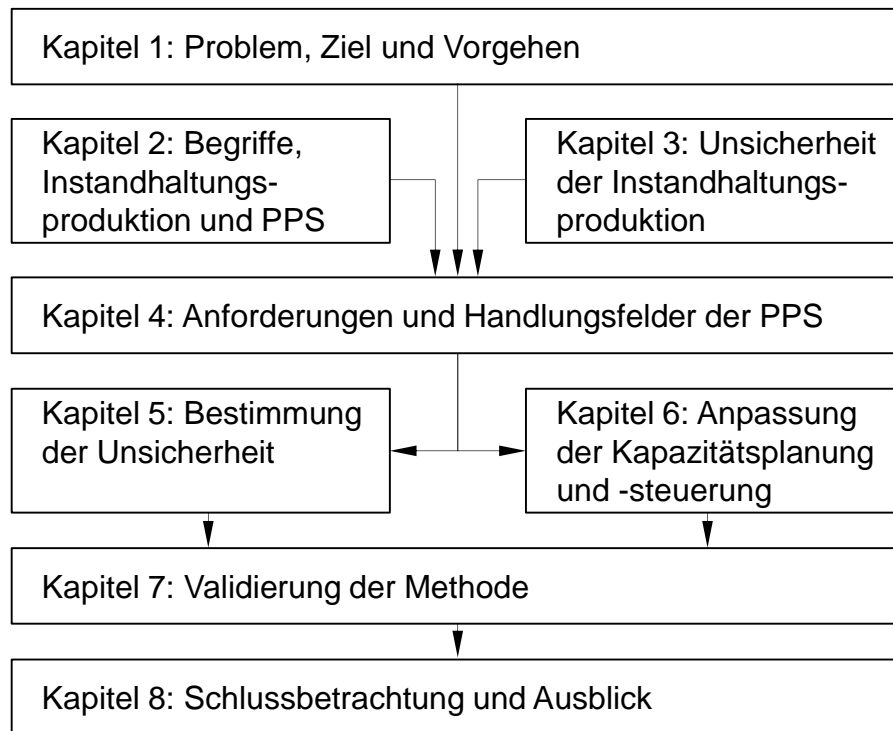


Abbildung 1 Aufbau der Arbeit und Zusammenhänge der Kapitel.

Das folgende Kapitel 2 führt die Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit ein. Es beschreibt die verwendeten Begriffe, die Eigenschaften der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern sowie die Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Zuletzt nimmt das Kapitel die Abgrenzung des Themengebietes für die Arbeit vor.

Kapitel 3 beschreibt die Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion. Eine Kategorisierung ermöglicht es, die Ursachen der Unsicherheit zu unterscheiden und erläutert Beispiele und Ausprägungen dieser Ursachen. Anhand empirischer Daten aus der Triebwerksinstandhaltung zeigt das Kapitel auf Basis der Verfügbarkeit von Informationen, wie Unsicherheit entsteht. Es gibt unterschiedliche Maßnahmen, um die Unsicherheit zu reduzieren, zu beherrschen oder abzuschließen und sie damit aktiv zu beeinflussen. Das Kapitel schließt mit der Entwicklung der qualitativen Verläufe zu den Erkenntnissen und den Wechselwirkungen der Unsicherheit.

Kapitel 4 führt die Anforderungen aus Kapitel 2 und 3 zusammen und formuliert die Handlungsfelder für die Produktionsplanung und -steuerung. Kapitel 5 und 6 arbeiten diese Handlungsfelder aus.

Der Messung von Unsicherheit widmet sich Kapitel 5. Die Klassifizierung bietet die Möglichkeit, Planauftragszeiten zu definieren und Unsicherheit als Planungsgröße für die Produktionsplanung und -steuerung nutzbar zu machen. Die statistische Versuchsplanung ermöglicht die Quantifizierung der Einflussgrößen auf die Unsicherheit der Auftragszeiten. Das Kapitel erstellt eine Funktion zur Abbildung der Verteilung der Auftragszeiten, die durch analytisch ermittelbare Parameter modifiziert werden kann. Letztendlich wird eine einfache Methode vorgestellt, die Verteilungen miteinander kombiniert.

Kapitel 6 erweitert die Kapazitätsplanung und -steuerung, um die Unsicherheit der Auftragszeiten zu berücksichtigen. Die Kapazitätsplanung unter Unsicherheit erstellt die Belastungsrechnung mit den Verteilungen der Auftragszeiten, führt den Kapazitätsabgleich mit der Kapazitätsflexibilitätsmatrix durch und verwaltet das entstehende Flexibilitätsdefizit. Die Kapazitätssteuerung nutzt die Möglichkeiten zum Umgang mit Unsicherheit, um die geplanten Durchlaufzeiten trotz auftretender Abweichungen in den Auftragszeiten zu erreichen.

Kapitel 7 überträgt die in Kapitel 5 und 6 vorgestellten Lösungen auf drei ausgewählte Beispiele der Instandhaltungsproduktion: einen Instandhaltungsdienstleister für Industriegasturbinen großer Schubklassen, einen Instandhaltungsdienstleister für Flugzeugtriebwerke regionaler Luftfahrtunternehmen und einen Instandhaltungsdienstleister für Kleintriebwerke gewerblicher und privater Kunden. Anhand der Fallbeispiele wird die vorgestellte Methodik veranschaulicht, erprobt und mit der realen Situation validiert.

Kapitel 8 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen, führt eine kritische Würdigung der Ergebnisse durch und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsansätze.

2 Grundlagen der Instandhaltungsproduktion und der PPS

Dieses Kapitel widmet sich dem Verständnis der benötigten Grundlagen. Abschnitt 2.1 erläutert Begriffe, die in dieser Arbeit Verwendung finden. Abschnitt 2.2 gibt einen Überblick über die Instandhaltungsproduktion und stellt die Besonderheiten dieser Industrie im Vergleich zu einer Neuteilproduktion heraus. Abschnitt 2.3 erläutert die Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung und beschreibt die Ziele und die Vorgehensweise der Kapazitätsplanung und -steuerung. Abschließend grenzt Abschnitt 2.4 das Untersuchungsgebiet der folgenden Kapitel ab.

2.1 Begriffsdefinition

Diese Arbeit nutzt Begriffe, die nicht immer eine eindeutige Verwendung in wissenschaftlichen Arbeiten aufweisen. Viele Autoren verwenden die Begriffe Unsicherheit, Komplexität, Instandhaltungsproduktion oder Investitionsgüter unterschiedlich oder nutzen andere Wörter für ähnliche Sachverhalte. Dieser Abschnitt beschreibt die für diese Arbeit gültigen Definitionen aller notwendigen Begriffe.

2.1.1 Unsicherheit

Viele wissenschaftliche Gebiete verwenden den Begriff Unsicherheit und definieren ihn unterschiedlich. Informationstheorie [Garn62], Entscheidungslehre [Luhm00], Organisationstheorie [Dunc72] und Diskussionen im Rahmen der Produktion [Aytu05] sowie der Instandhaltungsproduktion [Exle98] begründen die Definition der Unsicherheit in diesem Abschnitt. Die Begriffe, die dabei immer wieder und unterschiedlich Verwendung finden, sind Sicherheit, Risiko und Unsicherheit [Knig21]. Auch im Umfeld der Produktion wurde Unsicherheit unter dem Begriff der Turbulenz als Einflussfaktor identifiziert [Wien12, Wien02]. Die Abweichung der Istwerte von ihren Sollwerten ist dabei eine Kennzahl für die Unsicherheit.

In der Instandhaltung beschreibt Strunz die Unsicherheit über den Zeitpunkt, das Ausmaß und die Dauer der Instandhaltung [Stru12] und weist auf weitere Ursachen für Unsicherheit hin. In der Instandhaltungsproduktion bestehen komplexe Ursachen für Unsicherheit, so dass die Planung von Instandhaltungsereignissen aufgrund von Rücksprachen mit Kunden, Ungewissheit über den Zustand der Produkte oder wechselnden Vorgaben von Herstellern und Behörden eine besonders große Herausforderung ist [Cors06, Exle98].

Unsicherheit und Komplexität werden aufgrund ihrer Wechselwirkungen häufig gemeinsam betrachtet [Elli11, Luhm00, Wien02]. Komplexität verstärkt die Effekte einer von Unsicherheit geprägten Situation noch weiter und erschwert die Beschaffung und Verarbeitung von Informationen [Hofm13, Mile74, Nett14].

Auf Basis der oben aufgeführten Erkenntnisse und der Zielsetzung gilt für diese Arbeit folgende Definition der Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion:

Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion 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.

Nach der reinen Entscheidungslehre sollte anstelle von Unsicherheit hier besser der Begriff Risiko verwendet werden [Bamb02]. Unsicherheit findet allerdings in diversen Veröffentlichung im Rahmen der Produktion bereits Verwendung (vgl. [Lawr97], [Eick11]) und der Begriff Risiko ist in manchen Bereichen eher negativ behaftet (vgl. Risikomanagement, z. B. [Weng13]). Der Begriff Unsicherheit im Rahmen dieser Arbeit setzt den Schwerpunkt auf die mögliche Abweichung von einem geplanten Zustand. Die Bewertung der Abweichung ist grundsätzlich weder als Risiko noch als Chance vordefiniert. Kapitel 3 beschreibt die Wechselwirkungen der Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion detaillierter und ordnet sie in die Zielstellung der Arbeit ein.

2.1.2 Instandhaltung

Die DIN 31051 [DIN312] definiert die Aufgaben der Instandhaltung mit Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung. Die DIN EN 13306 [DIN10] erweitert die Definition der Instandsetzung um die Tätigkeiten und die Instandhaltungsstrategien. Instandhaltungsstrategien sind umfassende Konzepte zur Realisierung bestimmter Ziele durch Planung, Steuerung und Umsetzung von Instandhaltungsmaßnahmen [Stru12]. Sie können in reaktive und präventive Strategien eingeteilt werden [Sche10]. Die Auswahl einer geeigneten Strategie kann für die verschiedenen Instandhaltungsobjekte eines Betriebes unterschiedlich sein und hängt z. B. von

den Unternehmenszielen, der Informationslage, dem Ausfallverhalten des Instandhaltungsobjekts, den Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen, den Kosten des Ausfalls oder den Kosten der Absicherung ab [Stru12].

2.1.3 Investitionsgüter

Investitionsgüter werden in diversen Veröffentlichungen unterschiedlich definiert. Die wesentlichen Merkmale von Investitionsgütern haben je nach Veröffentlichung unterschiedliche Ausprägung [Hofm12]:

- Nutzerkreis: *Organisationen*
- Beschaffenheit: *materiell oder immateriell*
- Werthaltigkeit: *keine Einschränkung oder hoher Wert*
- Verbrauchsart: *Gebrauch oder Gebrauch und Verbrauch*
- Lebensdauer: *keine Einschränkung oder langlebig*
- Zweck: *Produktionsmittel oder kein Produktionsmittel*
- Kundenkreis: *keine Einschränkung oder nicht für Letztkonsumenten*

Für diese Arbeit gilt die folgende Definition:

Investitionsgüter sind Maschinen oder Anlagen, die aufgrund der technischen Ausstattung, der langen Nutzungsdauer und des hohen Werts Instandhaltungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung und Verbesserung des Nutzwertes fordern.

2.2 Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern

Nach der Definition der einzelnen Begriffe stellt dieser Abschnitt die Eigenschaften der Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern vor. Diese Eigenschaften bilden die Grundlage der folgenden Kapitel, da sie die Rahmenbedingungen definieren, in denen Unsicherheit entsteht.

Der Auftragsdurchlauf in der Instandhaltungsproduktion unterteilt sich in voneinander abgrenzbare Phasen: Eingangstestlauf, Diagnose, Demontage, Befund, Teileinstandsetzung (unterteilt in Reparatur, Neuteilbeschaffung und Verschrottung), Montage und Ausgangstestlauf (vgl. [Eick12, Kell14]):

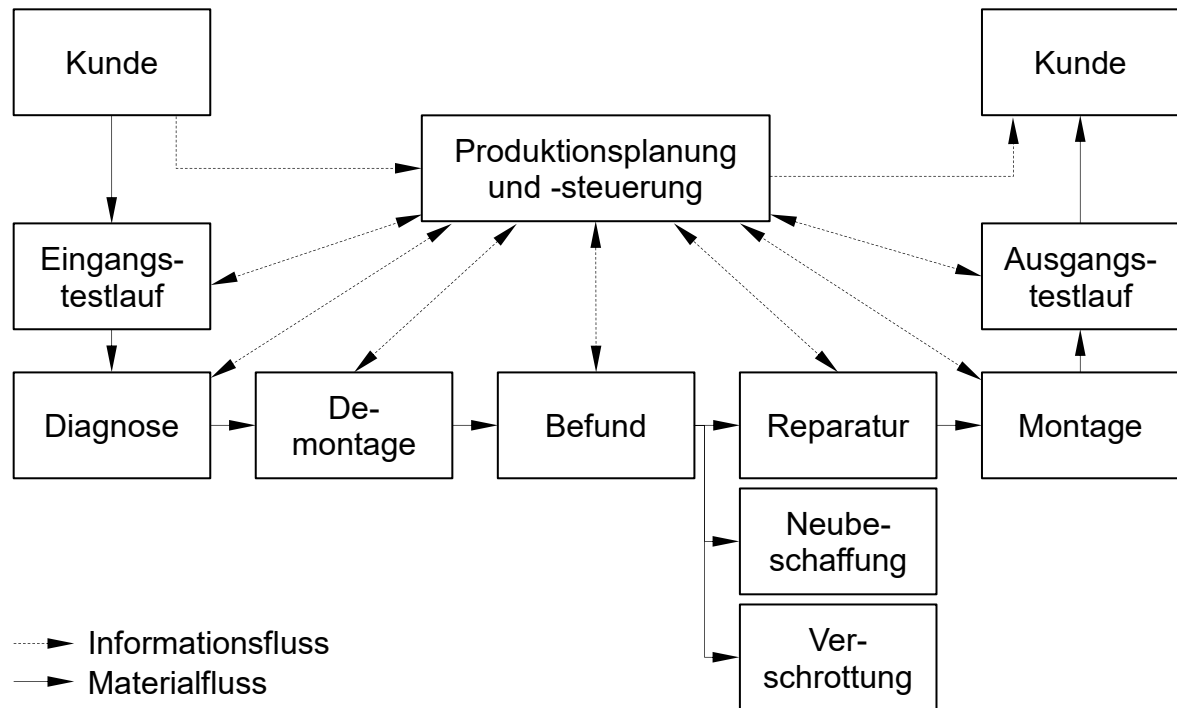


Abbildung 2 Schematische Abbildung der Instandhaltungsproduktion.

Abbildung 2 bildet die einzelnen Prozessschritte der Instandhaltungsproduktion ab. Der Kunde stellt dem Dienstleister zu Beginn das Instandhaltungsobjekt zur Verfügung. Falls notwendig oder auf Wunsch findet ein Eingangstestlauf statt. Die Auswertungen der Ergebnisse des Testlaufs und erste Untersuchungen am Instandhaltungsobjekt finden im Rahmen der Diagnose statt, wobei auch ein erster, vorläufiger Leistungsumfang definiert werden kann. Die Demontage zerlegt das Instandhaltungsobjekt je nach definiertem Leistungsumfang in Baugruppen sowie alle oder ausgewählte Baugruppen in Einzelteile. Der Befund untersucht die Einzelteile und definiert den genauen Leistungsumfang für die Bauteile:

- Keine Beschädigung und weiter nutzbar: Die Bauteile werden evtl. gereinigt und gehen in das Lager zur späteren Montage.
- Beschädigt, aber reparabel: Der Befund wählt das Reparaturverfahren und übergibt die Bauteile der Bauteil-instandsetzung oder einem externen Dienstleister zur Reparatur. Bei komplexen und zeitintensiven Reparaturen veranlasst die Produktionsplanung und -steuerung eine Neubeschaffung der Bauteile, um den Liefertermin für den Kunden abzusichern.
- Beschädigt und nicht reparabel: Der Befund entsorgt die Bauteile und veranlasst die Neubeschaffung.

Nachdem alle Bauteile wieder verfügbar sind, montiert der Dienstleister das Instandhaltungsobjekt. Der Ausgangstest stellt die Funktionsfähigkeit sicher und ist der letzte Schritt vor Auslieferung an den Kunden. Informationen aus den jeweiligen Prozessen fließen in der Produktionsplanung und -steuerung zusammen und werden dort verarbeitet. Die Produktionsplanung und -steuerung stellt sicher, dass relevante Informationen des Kunden in der Instandhaltung mit berücksichtigt werden und Entscheidungsbedarf an den Kunden kommuniziert wird.

Die Prozesssicht des Aachener Prozessmodells führt Merkmale und Merkmalsausprägungen einer Produktion aus und ermöglicht die Einordnung der Instandhaltungsproduktion [Schu12]:

Auftragsauslösungsart und Erzeugnisspektrum:

„Die Grenzfälle einer rein kundenauftragsbezogenen Produktion (Bevorratungsebene = Kaufteile bzw. Rohmaterial) und einer rein erwartungsbezogenen Produktion (Bevorratungsebene = Enderzeugnis) liegen in der betrieblichen Praxis nur äußerst selten vor“ [Schu12]. Die Instandhaltungsproduktion von Investitionsgütern kommt dem Extrem einer reinen kundenauftragsbezogenen Produktion sehr nahe, da die Schäden am Investitionsgut und die Erwartungshaltung der Kunden immer einzigartig sind [Kell14]. Kunden der Instandhaltungsproduktion erwarten einen Nutzen durch die Transformation eines bereitgestellten Gutes [Cors06], wie z. B. Wiederherstellung des Abnutzungsvorrates im Sinne einer Instandsetzung, Erfüllung von Regularien, Verbesserung der Eigenschaften des Gutes oder der Absicherung der Funktionstüchtigkeit. Somit sind alle Instandhaltungsereignisse Einzelfälle, die sich aus dem Zustand des Investitionsgutes, der Erwartungshaltung des Kunden und der technischen und wirtschaftlichen Einschätzung des Dienstleisters ergeben.

Bedarfsermittlung, Auslösung des Sekundärbedarfs und Deckung der Bedarfe:

Vor der Demontage und Befundung der Einzelteile können die Nettobedarfe der Instandhaltung meist nicht sicher bestimmt werden. Der Zustand des Investitionsgutes, die Entscheidungen der Kunden und die ermittelten Leistungsumfänge definieren erst im Laufe der Instandhaltung den Nettobedarf. Die Instandsetzung von Triebwerksschaufeln verdeutlicht dies: Aus dem instandzusetzenden Triebwerk werden z. B. 62 Triebwerksschaufeln (Bruttosekundärbedarf) ausgebaut. Davon sind nach Befundung der Bauteile 15 Schaufeln nicht mehr verwendbar, 35 Schau-

felte können repariert werden und 12 Schaufeln weisen keine Beschädigung auf. Da kein Lagerbestand verfügbar ist, setzt sich der Nettosekundärbedarf aus einem Bedarf zur Neubeschaffung von 15 Schaufeln und einem Bedarf zur Reparatur von 35 Schaufeln zusammen.

Die Reparatur von Bauteilen ist abhängig vom Schadensfall. Erst bei Befund können die genauen Reparaturmaßnahmen definiert werden. Gehäusebauteile von Triebwerken weisen z. B. sehr unterschiedliche Schadensfälle auf, die meist durch weiterführende Untersuchungen wie Magnetpulverprüfverfahren oder Farbeindringprüfverfahren ermittelt werden. Die daraus entstehenden Reparaturmaßnahmen erzeugen unterschiedliche Auftragszeiten. Somit können zu Beginn einer Instandhaltung und vor Befundung der einzelnen Bauteile weder die Nettosekundärbedarfe, noch die Arbeitsaufwände der Reparaturaufträge genau bestimmt werden.

Beschaffungsart und Bevorratung:

Erst der Auftragsdurchlauf eröffnet die tatsächlichen Bedarfe und die benötigte Beschaffungsart. Der fehlende Vorlauf der Verfügbarkeit von Informationen erschwert die Bevorratung von Bauteilen für die Instandhaltung. Zudem sind die Bauteile komplexer Investitionsgüter meist sehr teuer und können u. U. aufgrund unterschiedlicher Modifikationen und Produktversionen nicht für alle Produkte genutzt werden. Manche Bauteile müssen aufgrund der langen Wiederbeschaffungszeit oder der aufwendigen Reparaturverfahren bevorratet werden, um die geforderte Durchlaufzeit der Instandhaltung nicht zu gefährden. Dieses Spannungsfeld aus zustandsbedingter Unsicherheit der Bauteile (siehe Abschnitt 3.1) und den hohen Anforderungen an Durchlaufzeit und Liefertreue erschwert die Entscheidung über die Bevorratung von Bauteilen und Komponenten.

Ablaufart in der Teilefertigung und der Montage:

Jede Phase weist Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit dem Instandhaltungsobjekt auf, die die Ablaufart beeinflussen. Die Baustellenfertigung eignet sich für die Diagnose und die Demontage von großen, komplexen oder sogar immobilien Gütern. Kleinere, mobile Güter können sich allerdings auch für eine Fließdemontage oder Fließmontage eignen. Die Werkstattfertigung eignet sich vor allem in der Teileinstandsetzung, da unterschiedliche Technologien für die individuellen Schadensfälle der Bauteile eingesetzt werden und häufig Materialrückflüsse auftreten [Remé14, Stei07]. Die Fließfertigung eignet sich für standardisierte Instandsetzungsmaßnahmen, wie z. B. die Wiederherstellung der Umrissform von Triebwerksschaufeln.

Kundenänderungseinflüsse während der Fertigung:

Kunden entscheiden über alle Änderungen des Leistungsumfangs an ihren Instandhaltungsobjekten. Notwendige Änderungen aufgrund neuer Befunde im Auftragsdurchlauf erfordern die Rücksprache mit Kunden und neue Entscheidungen. Diese Entscheidungen können noch im Auftragsdurchlauf zu einer Stornierung des Instandhaltungsauftrages führen.

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung der Rahmenbedingungen der Instandhaltungsproduktion: Das Umfeld der Instandhaltungsproduktion ist von hoher Individualität und Dynamik geprägt. Instandhaltungsereignisse sind Einzelfälle mit individueller Problemstellung und starken Kundeneinflüssen. Erst der Auftragsdurchlauf selbst ermöglicht es dem Dienstleister, alle notwendigen Informationen zu Leistungsumfang und Schadenfall zu ermitteln.

2.3 Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung

Dieser Abschnitt führt die Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung auf und erläutert kurz deren Ziel und Vorgehensweise. Viele Autoren beschreiben diese Aufgaben bereits umfangreich in Fachbüchern, deshalb beschränkt sich der Abschnitt auf die Erläuterung der Themen, die für diese Arbeit relevant sind. Eine genaue Auflistung und Beschreibung der Aufgaben der PPS liefern z. B. Schuh [Schu12] oder Lödding [Lödd08]. Das Aachener Prozessmodell definiert Referenzsichten, die Aufgaben, Prozessarchitektur, Funktionen und Prozesse der PPS beschreiben [Schu12]. Die Aufgabensicht unterteilt grob in Netzwerkaufgaben, Kernaufgaben und Querschnittsaufgaben. Die Kernaufgaben unterscheiden Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung, Eigenfertigungsplanung und -steuerung sowie Fremdbezugsplanung und -steuerung. Dieser Abschnitt beschreibt zur Übersicht kurz die Kernaufgaben der PPS und geht dann detaillierter auf die Aufgaben der Kapazitätsplanung und -steuerung ein.

Produktionsprogrammplanung:

Die Produktionsprogrammplanung umfasst die Absatzplanung, die Primärbedarfsplanung und die Ressourcengrobplanung [Schu12]. Ergebnisse dieser Aufgaben sind ein Produktionsplan mit Primärbedarfen sowie ein Rahmenbeschaffungsplan für den Einkauf. Die Absatzplanung legt ausgehend von Absatzprognosen die Absatzmengen für die Perioden fest. Die Primärbedarfsplanung bestimmt auf Grundlage der Absatzplanung die Primärbedarfe für die Erzeugnisgruppen. Die Ressourcengrobplanung führt eine erste Kapazitätsplanung mit aggregierten Planungsdaten durch.

Produktionsbedarfsplanung:

Die Produktionsbedarfsplanung umfasst die Bruttosekundärbedarfsermittlung, die Nettosekundärbedarfsermittlung, die Beschaffungsartzuordnung, die Durchlaufterminierung, die Kapazitätsbedarfsermittlung und die Kapazitätsabstimmung [Schu12]. Ziele der Produktionsbedarfsplanung sind die Einplanung der Fertigungsaufträge in der Produktion und die Sicherstellung der Machbarkeit des Produktionsprogramms. Deterministische, stochastische oder heuristische Verfahren ermitteln die Sekundärbedarfe und erzeugen die Fertigungs- bzw. Bestellaufträge. Die Durchlaufterminierung stellt die zeitlichen Zusammenhänge der Fertigungsaufträge her, und die Kapazitätsbedarfsermittlung berechnet den entstehenden Kapazitätsbedarf. Die Kapazitätsabstimmung stellt Kapazitätsangebot und -bedarf gegenüber und ermittelt die Handlungsfelder zur Abstimmung der Kapazitäten.

Eigenfertigungsplanung und -steuerung:

Die Eigenfertigungsplanung und -steuerung umfasst die Auftragserzeugung, Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung [Schu12]. Ziele der Eigenfertigungsplanung und -steuerung sind die Feinplanung der Fertigungsaufträge, die Berücksichtigung realer Kapazitäten und Störungen sowie die Umsetzung der Planung. Unterschiedliche Methoden erzeugen Aufträge und geben sie anhand von Terminen, Beständen oder Kapazitäten für die Produktion frei. Die Reihenfolgebildung berücksichtigt die konkrete Situation vor den Maschinen und Anlagen und sortiert die Abarbeitung nach definierten Regeln. Die Kapazitätssteuerung leitet Maßnahmen zur Einhaltung der Plantermine durch Anpassung der Kapazität ein. Lödding [Lödd08] beschreibt die Aufgaben der Eigenfertigungsplanung und -steuerung ausführlich mit unterschiedlichen Verfahren.

Kapazitätsplanung und -steuerung:

Die Aufzählung der Kernaufgaben zeigt, dass die Kapazitätsplanung und -steuerung in unterschiedlichen Kernaufgaben relevant sind. Die Grobressourcenplanung plant Termine und Kapazitäten auf einer groben Detailtiefe, die Termin- und Kapazitätsplanung feiner auf Grundlage von Fertigungsaufträgen. Die Eigenfertigungsplanung und -steuerung beeinflusst ebenfalls durch ihre Methoden den Kapazitätsbedarf und stellt letztendlich das Angebot zur Verfügung. Die folgende Beschreibung legt den Schwerpunkt der Betrachtung auf die Kapazitätsplanung und -steuerung als übergeordneten Prozess.

Die Kapazitätsplanung besteht aus einer Belastungsrechnung und einer Kapazitätsabstimmung [Wien11]. Die Kapazitätsplanung verfolgt das Ziel, auf Basis der Terminplanung den Kapazitätsbedarf und das Kapazitätsangebot aufeinander abzustimmen und eine hohe und gleichmäßige Belastung der Produktion zu gewährleisten. Die Belastungsrechnung bestimmt für jede Periode den Kapazitätsbedarf auf den Kapazitätsgruppen. Die Kapazitätsabstimmung stellt dem benötigten Kapazitätsbedarf das vorhandene Angebot gegenüber und zeigt Belastungsüberhänge sowie Kapazitätsengpässe auf. Abbildung 3 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Belastungsplanung mit Kapazitätsabstimmung für eine Kapazitätsgruppe:

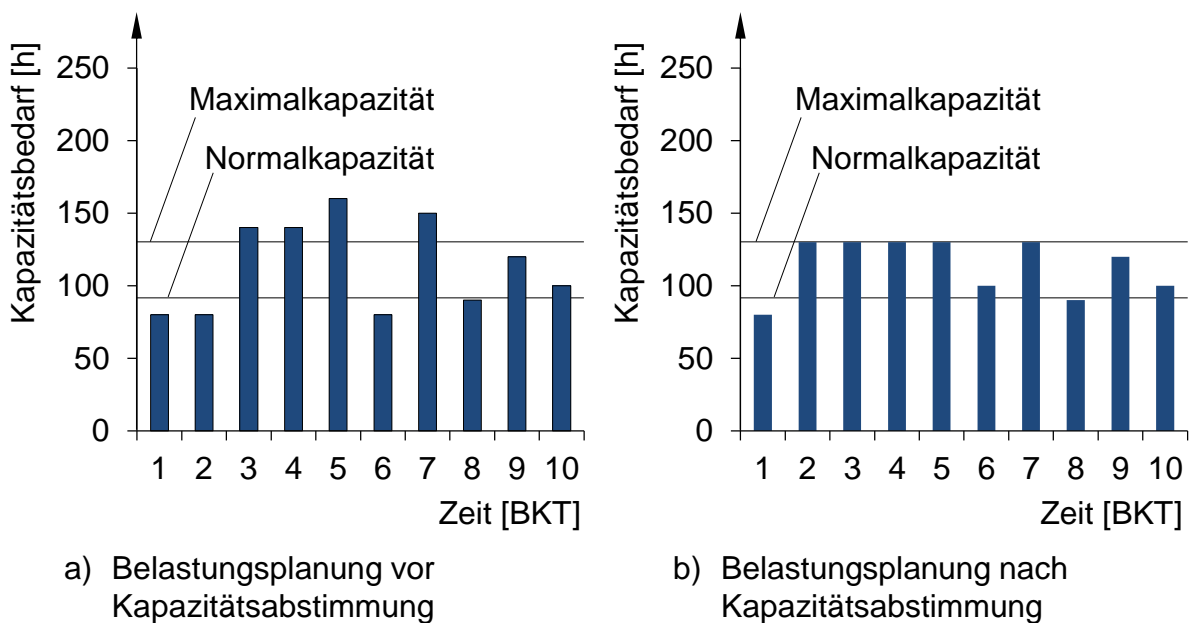


Abbildung 3 Belastungsplanung vor und nach Kapazitätsabstimmung (vgl. [Lödd08]).

Um Belastungsüberhänge und Kapazitätsengpässe zu reduzieren, setzt die Kapazitätsabstimmung die Kapazitätsflexibilität oder die Belastungsflexibilität ein. Maßnahmen zur Nutzung der Kapazitätsflexibilität beeinflussen das Kapazitätsangebot der Betriebsmittel und der Mitarbeiter. Die Kapazität der Mitarbeiter kann durch Veränderung der Arbeitszeiten, Einstellung von Mitarbeitern, Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit und Mehrfachqualifikation beeinflusst werden [Lödd08]. Kapazitätshüllkurven ermöglichen es, Kapazitätsflexibilität über der benötigten Reaktionszeit abzubilden [Wien11]. Das Beispiel in Abbildung 4 zeigt eine Kapazitätshüllkurve. Die Kapazität kann nach zwei BKT um 50 h erhöht werden oder um 50 h reduziert werden. Nach vier BKT kann die Kapazität um weitere 60 h reduziert werden. Nach fünf BKT kann die Kapazität um weitere 25 h erhöht werden. Kapazitätshüllkurven zeigen also, mit welchem Vorlauf und um welchen Betrag Kapazitätsveränderungen vorgenommen werden kön-

nen. Sie zeigen allerdings nicht die Zusammenhänge der Mehrfachqualifikation durch Versetzung von Mitarbeitern in andere Arbeitssysteme. Die Versetzung von Mitarbeitern mit mehrfacher Qualifizierung in andere Arbeitssysteme ermöglicht dort die Kapazitätserweiterung, schränkt aber gleichzeitig die mögliche Kapazitätserweiterung anderer Kapazitätsgruppen ein, da die versetzten Mitarbeiter nicht mehr zur Verfügung stehen. Es fehlt aktuell eine Methode, diese Wechselwirkungen abzubilden.

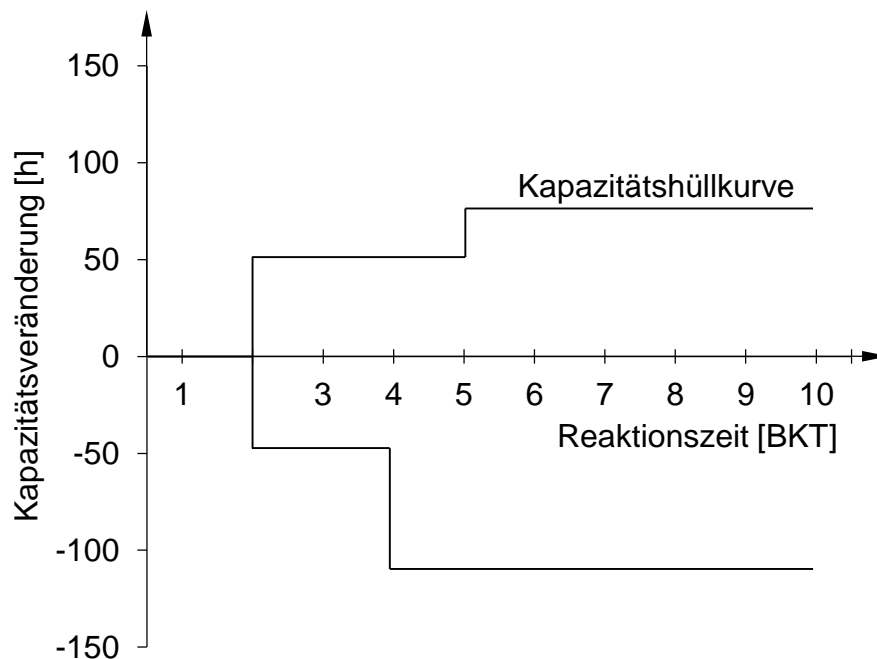


Abbildung 4 Kapazitätshüllkurve zur Beschreibung der Kapazitätsflexibilität [Wien11].

Neben der Kapazitätsflexibilität ermöglicht die Belastungsflexibilität eine Fremdvergabe bestehender Aufträge bzw. die Akquirierung weiterer Aufträge oder die Verteilung der Belastungen auf andere Betriebsmittel oder Zeitperioden [Eick12]. Die Rahmenbedingungen der Instandhaltungsproduktion beschränken die Möglichkeiten der Belastungsflexibilität, da Kunden den Leistungsstart und das Ende der Instandhaltung bestimmen. Dadurch bekommt die Kapazitätsflexibilität eine umso stärkere Bedeutung in der Instandhaltungsproduktion.

Die Kapazitätssteuerung leitet auf der Grundlage der tatsächlichen Belastungen kurzfristig Maßnahmen zur Anpassung der Kapazitäten ein [Lödd08]. Wenn sich die geplanten Auftragszeiten oder Kapazitäten ändern, ist auch der geplante Mitarbeiter- und Betriebsmitteleinsatz anzupassen. Die oben erwähnte Kapazitätsflexibilität bietet die Möglichkeit, Kapazitäten anzupassen und so auf Schwankungen zu reagieren. Die Veränderung der Arbeitszeit in definierten

Grenzen oder die Nutzung der Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter sind kurzfristig einsetzbare Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität. Wesentliche Bestandteile der Kapazitätssteuerung sind die Messung der aktuellen Planerfüllung und eine Rückstandsregelung.

Die Bereitstellung von Kapazitätsflexibilität ist mit hohen Kosten verbunden, da Mitarbeiter qualifiziert oder zusätzliche Betriebsmittel bereitgestellt werden müssen. Aktuell fehlt allerdings eine Methode, die benötigte Kapazitätsflexibilität aus gegebenen Unsicherheiten abzuleiten. Insbesondere die Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter ist eine entscheidende Maßnahme, Flexibilität zu erzeugen. Bislang fehlt eine Möglichkeit, die Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter abzubilden, innerhalb der Planung und Steuerung zu nutzen und systematisch an vorhandene Unsicherheiten anzupassen. Ein hohes Ausmaß an Mehrfachqualifizierung erfordert zudem eine Methode zum effizienten Mitarbeitereinsatz innerhalb der Produktionssteuerung. Diese Arbeit beschreibt in Kapitel 3 den Umgang mit Unsicherheit durch Flexibilität und in Kapitel 6 die Nutzung von Kapazitätsflexibilität innerhalb der Planung und wie die Kapazitätsflexibilität an Unsicherheiten in der Planung anzupassen ist. Zudem wird eine Möglichkeit beschrieben, Mitarbeiter im Rahmen der gegebenen Mehrfachqualifizierung effizient einzusetzen.

2.4 Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

Der Titel der Arbeit schränkt das Untersuchungsgebiet der Instandhaltungsproduktion bereits auf die Investitionsgüter ein. Trotz dieser Einschränkung ist die Vielfalt der möglichen Ausprägungen groß. Der Anspruch dieser Arbeit ist es, möglichst für alle diese Ausprägungen gültige Lösungen zu finden. Um diese Lösungen konkret zu formulieren, nutzt diese Arbeit das Beispiel der Triebwerksinstandhaltung als ein besonders komplexes und bedeutendes Szenario der Instandhaltungsproduktion. Dies soll gewährleisten, dass die gefundenen Lösungen auch für weniger komplexe Ausprägungen anwendbar sind. Bei der Anwendung auf weniger komplexe Rahmenbedingungen müssen nur die Art und Weise und ggf. der Umfang der Umsetzung geprüft werden. Das folgende Kapitel 3 beschreibt die Ursachen, die Entstehung und den Umgang mit Unsicherheit ohne Einschränkung auf die Instandhaltungsproduktion.

Eine weitere Abgrenzung nimmt diese Arbeit in den Aufgaben der PPS vor. Die Instandhaltungsproduktion beeinflusst alle Aufgaben der PPS. Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf die Aufgaben der Kapazitätsplanung und -steuerung, wie sie im Abschnitt 2.3 definiert sind. Das Kapitel 4 konkretisiert die Anforderungen der Produktionsplanung und -steuerung in Bezug auf die Rahmenbedingungen der Instandhaltungsproduktion.

3 Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion

Die Instandhaltungsproduktion ist geprägt von unterschiedlichen Ursachen der Unsicherheit. Abbildung 5 beschreibt die Wechselwirkungen der Unsicherheit als schematisches Modell.

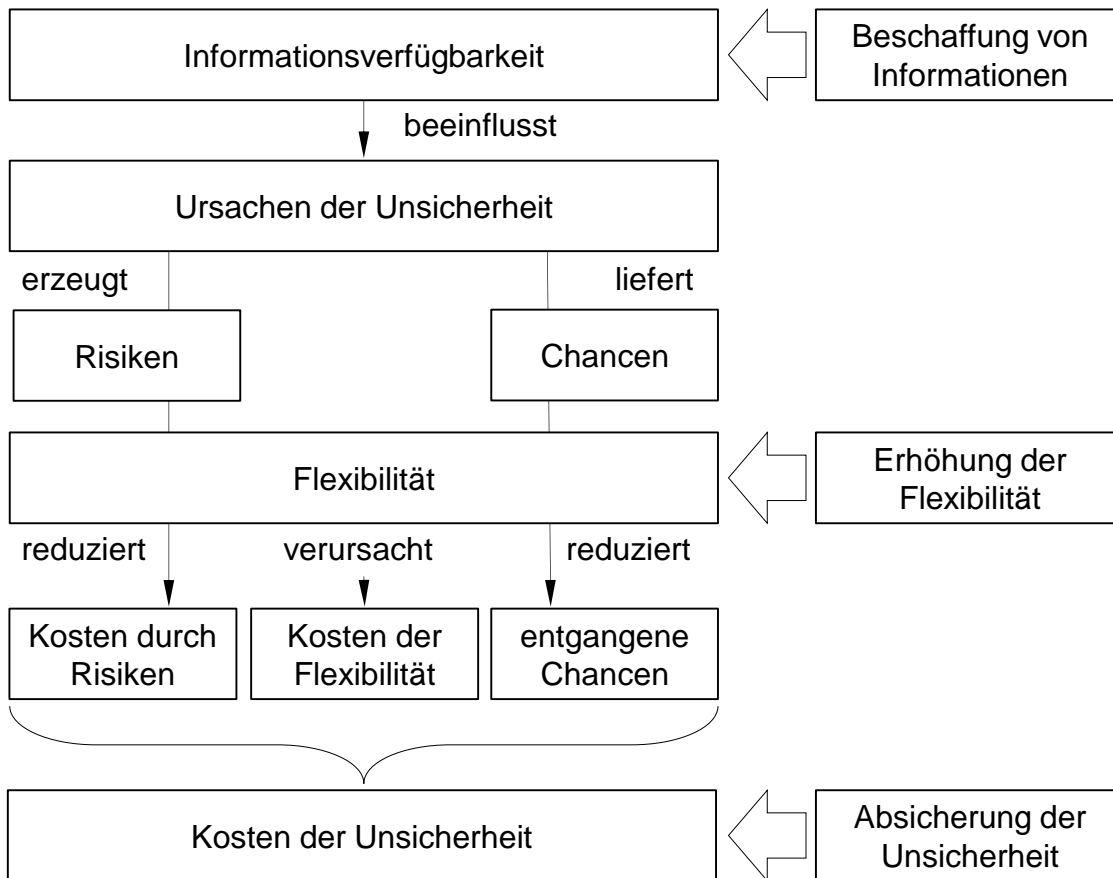


Abbildung 5 Beschreibungsmodell zu den Wechselwirkungen der Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion.

Abbildung 5 zeigt, dass die Informationsverfügbarkeit die Ursachen der Unsicherheit beeinflusst. Abschnitt 3.1 erstellt eine Übersicht der Ursachen der Unsicherheit und erläutert diese. Abschnitt 3.2 beschreibt, wie sich die Informationsverfügbarkeit auf die Unsicherheit auswirkt. Eine theoretische Ableitung aus der Statistik, ein praktisches Beispiel aus der Produktion und eine empirische Studie aus der Instandhaltungsproduktion beschreiben diesen Zusammenhang in unterschiedlichen Ausprägungen.

Abbildung 5 zeigt drei Möglichkeiten zum Umgang mit Unsicherheit, die in Abschnitt 3.3 beschrieben werden: Die Informationsbeschaffung ist eine Methode zur Reduzierung der Unsicherheit. Die Faktoren Informationsverfügbarkeit, Zeit und Kosten beschreiben die Zusammenhänge der Informationsbeschaffung und damit den Handlungsspielraum zur Reduzierung der Unsicherheit durch Information. Die Erhöhung der Flexibilität ist ein Ansatz zur Beherrschung

der Unsicherheit und ihrer Folgen. Als letzte Maßnahme beschreibt die Absicherung der Unsicherheit die Möglichkeit, mit den verbleibenden Folgen der Unsicherheit durch Vereinbarungen, Versicherungen oder bewusste Akzeptanz umzugehen. Abschließend zeigt Abschnitt 3.4 auf, wie die Zusammenhänge aller beschriebenen Größen in Kennlinien schematisch dargestellt werden können.

3.1 Ursachen der Unsicherheit

Ursache von Unsicherheit sind fehlende oder die Verarbeitung falscher Informationen (vgl. Abschnitt 2.1.1). Aufgrund der Vielfalt an zu verarbeitenden Informationen entsteht Unsicherheit in der PPS aus vielfältigen Gründen. Abbildung 6 unterscheidet dazu die Ursachen der Unsicherheit nach produktionsbedingter, produktbedingter, zustandsbedingter, extern bedingter und organisationsbedingter Unsicherheit:

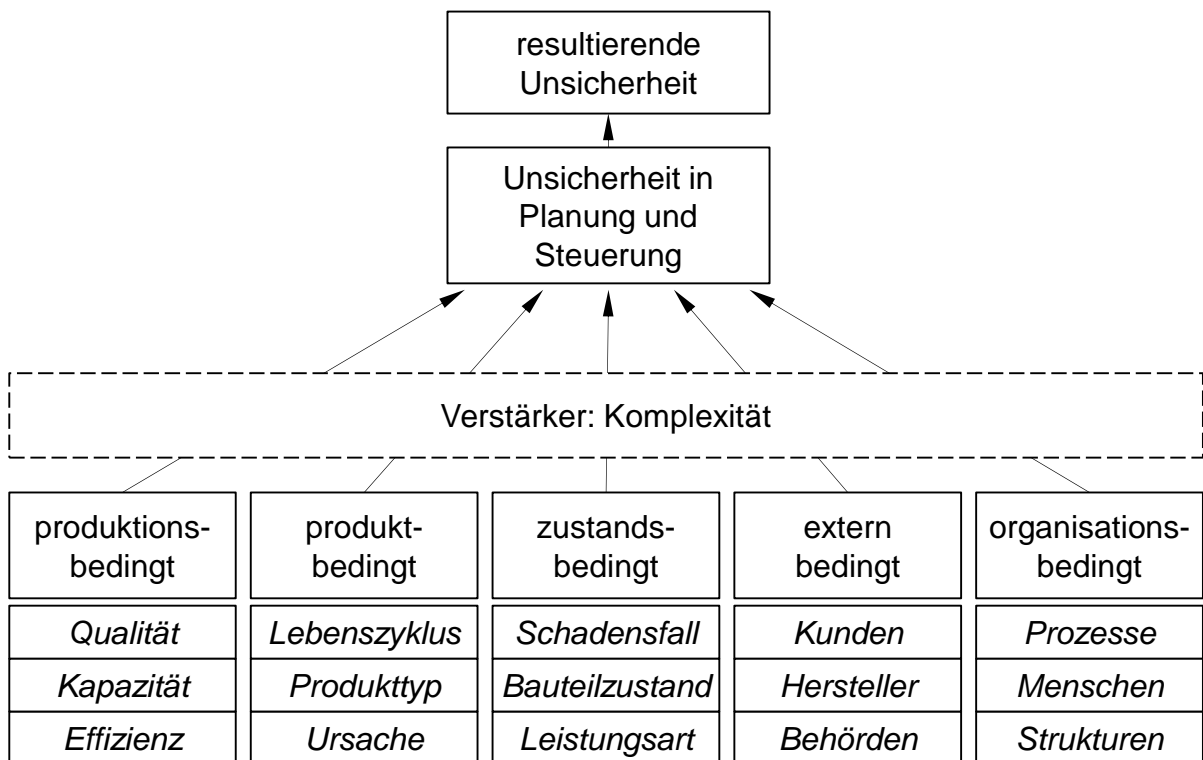


Abbildung 6 Ursachen der Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion.

Resultierende Unsicherheit und die Unsicherheit in der Planung und Steuerung:

Die Produktionsplanung und -steuerung ist verantwortlich für die Planung eines Instandhaltungsereignisses und verarbeitet die dafür notwendigen Informationen. Somit beeinflusst die PPS sowohl durch die Beschaffung und Verarbeitung von Informationen als auch durch die

Verbesserung der Methoden der Beschaffung und Verarbeitung die resultierende Unsicherheit. Diese kann analog zu den Turbulenzkeimen nach Wiendahl [Wien12] in Schwankungen, Streuungen, Plananpassungen, Abweichungen und Inkonsistenzen kategorisiert werden. Die Planung und Steuerung geht meist von sicheren Informationen aus und ignoriert mögliche Abweichungen von Plan- und Ergebnisgrößen.

Verstärker Komplexität:

Komplexität verstärkt vorhandene Ursachen der Unsicherheit, weil Informationen schwerer zu beschaffen und zu verarbeiten sind (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Produktionsbedingte Unsicherheit:

Produktionsbedingte Unsicherheiten sind Gegenstand vieler Ausführungen in der Literatur und umfassen die Schwankungen der Auftragszeiten, die aufgrund von Fehlern in der Bearbeitung und Qualitätsmängel entstehen. Prozessfehler, Ausschuss und Kapazitätsschwankungen sind die Folgen und führen zu Schwankungen in der Auftragszeit [Aytu05].

Produktbedingte Unsicherheit:

Die komplexe Technologie und der Stand im Lebenszyklus hochwertiger Investitionsgüter prägen die produktbedingten Unsicherheiten. Ältere Produkte mit langen Nutzungsdauern benötigen meist eine Überholung mit klar definierten Leistungsumfängen und hohen Zerlegungsgraden. Selbst kleinere Zerlegungsgrade können je nach Befundung der restlichen Baugruppen zu Rückfragen bei den Auftraggebern und ungeplanten weiteren Demontagen führen [Herd13]. Unbekannte Schadensbilder verlangen dabei von den Dienstleistern die Entwicklung und Abstimmung neuer Reparaturverfahren.

Zustandsbedingte Unsicherheit:

Viele in diesem Abschnitt erläuterte Unsicherheiten treten in den meisten Unternehmen auf, wenn auch in geringem Ausmaß. Die zustandsbedingte Unsicherheit ist hingegen fast ausschließlich der Instandhaltungsproduktion zu eigen. Die Diagnose zu Beginn der Instandhaltung bestimmt den Leistungsumfang und die Arbeitsinhalte (Abschnitt 2.2), kann jedoch meist

nicht alle Schäden am Instandhaltungsobjekt erkennen. Die Prozesse der Demontage, Reinigung und Befundung offenbaren weitere Schäden und erfordern eine stetige Anpassung der Auftragszeiten [Luh03, Spee93]. Der Befund der Einzelteile erstellt ein konkretes Bild zum Schaden des Bauteils und definiert einen endgültigen Leistungsumfang. Jedoch können selbst in diesem Prozess evtl. nicht alle Fehler am Bauteil identifiziert werden. So sind Gehäuseteile von Triebwerken hohen Spannungen und Temperaturen ausgesetzt. Nach der Demontage und Reinigung können Risse im Gehäuse identifiziert und bearbeitet werden. Die Bearbeitung der Gehäuseteile (insb. Wärmebehandlung nach Schweißarbeiten) kann weitere Risse oder Beschädigungen aufdecken, die eine Erweiterung der Arbeitsinhalte erfordern oder sogar zur Verschrottung des Bauteils führen.

Extern bedingte Unsicherheit:

Entscheidungsprozesse der Kunden können während der Dienstleistung zur Veränderung des Leistungsumfangs, zu Verzögerungen des Leistungsstarts oder zu Stornierungen führen. Die durch Kunden bedingte Unsicherheit ist neben der zustandsbedingten Unsicherheit die komplexeste Unsicherheitsquelle. Das Unternehmen kennt die Einstellung, das Umfeld und die Motivation insbesondere von neuen Kunden nicht im ausreichenden Maße. Die Unsicherheitsfaktoren des Kunden in dessen eigenen Umfeld ergänzen dabei die Unsicherheit, die sich aus dem Vertragsverhältnis mit dem Instandhaltungsdienstleister ergibt (vgl. Länderrisiko, Kundenrisiko und Vertragsrisiko in [Pinn07]). Barkawi erläutert kundenbedingte Unsicherheit anhand eines Beispiels: „Während ein Militärflugzeug mit gegebenem Budget so viel fliegt, wie es technisch und logistisch erzielbar ist, muss ein ziviles Flugzeug so viel fliegen wie möglich – was auch immer die Kosten sind – um das maximale Einkommen zu generieren. Hier handelt es sich um zwei Ansätze, unterschieden nach den Kriterien ‚gesetzter Input‘ (Militär) und ‚maximaler Output‘ (Airline)“ [Bark06].

Darüber hinaus machen auch Originalteilhersteller und staatliche Behörden Vorgaben zu Reparaturprozessen und zur Neuteilbeschaffung und beschränken zum Teil die Möglichkeit, Ersatzteile anderer Hersteller zu verbauen. Diese Abhängigkeit von Herstellern, Dienstleistern und staatlichen Behörden erzeugt Unsicherheit [Pfef03].

Organisationsbedingte Unsicherheit:

Organisationsbedingte Unsicherheiten entstehen aus ungeeigneten Prozessen und Strukturen oder aus fehlender oder falscher Qualifizierung von Mitarbeitern (vgl. Unternehmensrisiko in [Pinn07]). Sie decken damit ein sehr großes Feld möglicher Unsicherheiten auf, die alle unternehmensintern verursacht werden. Insbesondere die Fähigkeit eines Unternehmens, mit Kunden geeignete Verträge über Instandhaltungsdienstleistungen abzuschließen, ist eine große Quelle von Unsicherheit. Mitarbeiter müssen dazu die Risiken und Chancen richtig einschätzen und entsprechend im Vertrag verhandeln oder zumindest in der Kundenbeziehung berücksichtigen (vgl. Vertragsrisiko in [Pinn07] oder [Brug08]).

Die unterschiedlichen Arten der Unsicherheit werden in der Planung und Steuerung meist ignoriert. Selbst wenn die Unsicherheiten bekannt sind, fehlen bislang Methoden, diese Informationen in der Planung und Steuerung zu berücksichtigen.

3.2 Informationsverfügbarkeit und Entwicklung der Unsicherheit

Dieser Abschnitt erläutert den Einfluss der Informationsverfügbarkeit auf die Entstehung der Unsicherheit. Abschnitt 3.2.1 beschreibt die Auswirkung der Informationsverfügbarkeit auf die Entstehung der Unsicherheit anhand eines theoretischen und eines praktischen Beispiels. Abschnitt 3.2.2 überträgt diese Gedanken auf die Instandhaltungsproduktion und zeigt anhand einer empirischen Studie die Entwicklung der Unsicherheit über den Auftragsdurchlauf.

3.2.1 Informationsverfügbarkeit

Abschnitt 2.1.1 definiert die Verfügbarkeit von Informationen als Grundlage der Entstehung von Unsicherheit. Diese Arbeit versteht Informationsverfügbarkeit in Bezug auf die Relation der verfügbaren zur vollständigen Information. Im Folgenden wird dieses Konzept theoretisch anhand einfacher statistischer Zusammenhänge erläutert.

Veranschaulichung der Auswirkung der Informationsverfügbarkeit durch die deskriptive Statistik

Mithilfe der Statistik lässt sich die Entstehung und Entwicklung von Unsicherheit aufgrund der Informationsverfügbarkeit beschreiben (vgl. zu den folgenden Grundbegriffen der deskriptiven Statistik [Tout08]):

Gegeben ist eine ausreichend große Grundgesamtheit von Elementen mit unterschiedlichen Eigenschaften und einer Untersuchungsgröße x . Die Aufgabe der Planung ist es, eine möglichst passende Prognose für die Untersuchungsgröße auf Grundlage dieser Grundgesamtheit zu erstellen. Die Verteilungsfunktion $f(x)$ beschreibt die Verteilung der Untersuchungsgröße x über die Grundgesamtheit. Dabei beschreiben Lageparameter (z. B. Erwartungswert) und Streuungsparameter (z. B. Standardabweichung) den Verlauf der Verteilung. Aus Sicht der Planung beschreiben diese statistischen Größen die zu erwartende Ausprägung des Parameters und die Abweichung davon. Nach obiger Definition der Unsicherheit ist die Abweichung das Maß für die Unsicherheit und erschwert die Bestimmung der Untersuchungsgröße x .

Teilt man die Grundgesamtheit anhand der Eigenschaften der Elemente, ergeben sich neue Lage- und Abweichungsparameter für die entstehenden Gruppen. Sind durch die Aufteilung der Grundgesamtheit in Teilmengen Verteilungen mit geringeren Streuungsparametern erzeugt worden, wurde die Unsicherheit für diese Teilmengen reduziert. Die Untersuchungsgröße x kann nun mit geringerer Abweichung bestimmt werden. Ist es möglich, die Elemente anhand ihrer Eigenschaften so in Teilmengen aufzuteilen, dass innerhalb der Teilmengen keine Abweichung mehr auftritt, kann die Untersuchungsgröße x sicher bestimmt werden. Somit besteht keine Unsicherheit mehr.

Diese sehr vereinfachte theoretische Erläuterung beinhaltet alle wichtigen Elemente zur Beschreibung der Informationsverfügbarkeit und Entwicklung der Unsicherheit:

- Die Vielfalt der Ausprägungen der Untersuchungsgröße wird durch eine Verteilungsfunktion abgebildet. Lage- und Abweichungsparameter der Verteilung können bestimmt werden.
- Die Eigenschaften der Elemente ermöglichen es, die Grundgesamtheit in Teilmengen aufzuteilen und die Unsicherheit zu reduzieren.
- Die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften und der unbekannte Einfluss der Eigenschaften auf den Untersuchungsparameter erschweren dabei die Aufteilung in Teilmengen.

Fiktives Beispiel aus der Produktionsplanung eines Unternehmens:

Auf dieser theoretischen Basis baut ein etwas anschaulicheres Beispiel aus der Planung der Arbeitsbelastung für eine Produktfamilie auf. Die Produkte eines Unternehmens verursachen unterschiedliche Arbeitsbelastungen nach folgenden Verteilungen:

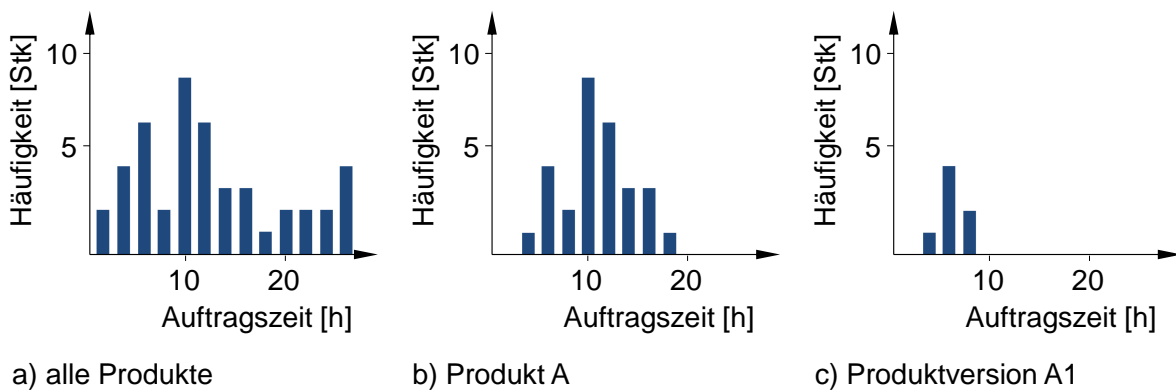


Abbildung 7 Verteilung der Auftragszeiten aller Produkte (a), für Produkt A (b) und für Produktversion A1 (c), dargestellt als Histogramm.

Abbildung 7 bildet die Verteilungen der Auftragszeiten aller Produkte, des Produktes A und der Produktversion A1 ab. Die Verteilung der Auftragszeit aller Produkte deckt einen Bereich von 2 bis 26 Stunden ab und erstreckt sich unregelmäßig über das Intervall. Der Erwartungswert der Auftragszeit eines Auftrags in der Gesamtheit der Produkte beträgt 12,2 h und die Standardabweichung 7,2 h. Der Erwartungswert der Auftragszeit eines Auftrags mit der Eingrenzung auf Produkt A beträgt 10,5 h bei einer Standardabweichung von 3,4 h. Der Erwartungswert der Auftragszeit für Produktversion A1 beträgt 6 h bei einer Standardabweichung von 1,4 h. Dieses Beispiel zeigt die Möglichkeit, die Planungsgrößen durch Nutzung einfacher Informationen zu präzisieren. Die Untergliederung der Grundgesamtheit durch Informationen in Teilmengen erzeugt neue Erwartungswerte und Abweichungsparameter. Der richtige Einsatz der Informationen reduziert Unsicherheit, erhöht allerdings auch die Anzahl der unterschiedlichen Teilmengen. Da die Datenbasis gleich bleibt, ist die Datengrundlage zur Bildung der statistischen Größen kleiner.

In obigem Beispiel sind Produkttyp und Produktversion einfach zugängliche Informationen für einen Produzenten. In einem komplexeren Umfeld sind die relevanten Informationen evtl. schwerer zu identifizieren und nicht immer oder zumindest nicht unmittelbar zugänglich. So wirkt sich das Nutzungsverhalten eines Kunden auf den Abnutzungsgrad eines Produktes aus, kann aber nur durch Nachfrage beim Kunden oder durch Erfahrung ermittelt werden. Wie in der Problemstellung bereits dargestellt (Abschnitt 1.1), sind Informationen zum Produkt und zur Dienstleistung für ein Instandhaltungsunternehmen nicht immer bekannt. Folgende Erweiterung des einfachen Beispiels oben veranschaulicht diesen Umstand:

Grundgesamtheit: Instandhaltungsereignisse unterschiedlicher Kunden

Produkt A: Instandhaltungsereignis mit Ursache: *Leistungsverlust*

Produkt A1: Schadensfall: *nicht reparierbar, Austausch des Bauteils*

Die Information zur Ursache der Instandhaltung ist evtl. noch einfach zu beschaffen. Der Schadensfall wird meist erst bei Bearbeitung erkannt und ist somit vorab nicht verfügbar. So entstehen Unsicherheiten durch mangelnde Informationsverfügbarkeit. Weniger Faktoren stehen zur Verfügung, um Erwartungswerte zu spezifizieren und Abweichungsparameter zu reduzieren. Vereinfacht gesagt: Informationsverfügbarkeit ist ein entscheidender Faktor zur Entstehung und Reduzierung von Unsicherheit.

Diese Arbeit kategorisiert die Informationsverfügbarkeit nach dem erforderlichen Aufwand, um die Informationen zu nutzen. Folgende vier Kategorien unterscheiden die Informationsverfügbarkeit:

- Offensichtliche Informationen sind ohne weiterführende Analyse verfügbar. Meist werden die offensichtlichen Informationen vom Kunden bereitgestellt oder sind durch die Lieferung des Instandhaltungsobjektes selbst verfügbar (Produkttyp, Kunde, Alter des Instandhaltungsobjektes, Grund der Instandhaltung). Dennoch kann der Aufwand zur Beschaffung dieser Informationen von Fall zu Fall unterschiedlich sein. Während der Kunde einer Triebwerksinstandhaltung die Information über die Anzahl der geflogenen Stunden immer liefert, muss der Dienstleister die Betriebszeit einer Industriegarturbine meist durch Analyse oder Nachfrage selbst ermitteln.
- Verdeckte Informationen sind nur durch weiterführende Analysen oder durch Verarbeitung anderer Informationen zu ermitteln. Welche Überholungsmaßnahmen geplant werden müssen, kann z. B. erst durch einen Abgleich der Betriebszeit der Komponente mit den Herstellerunterlagen ermittelt werden. Kundenwünsche, rechtliche Anforderungen und Vorgaben der Hersteller definieren den Umfang der Demontage eines Instandhaltungsobjektes.
- Versteckte Informationen sind erst nach Aktionen am Instandhaltungsobjekt verfügbar. Die ersten Maßnahmen am Instandhaltungsobjekt sind meist Vorinspektionen zum Zustand des Objektes und zur Identifikation visuell sichtbarer Schäden. Diese Inspektionen können auch tiefer greifend sein: So nutzt die Triebwerksinstandhaltung Boroskope, um in dafür vorgesehenen Öffnungen eine Inspektion der innen liegenden Teile durchzuführen, also z. B. eine Inspektion der Triebwerksschaufeln im Verdichter der Maschine [Stas04]. Zur Gruppe der versteckten Informationen zählen auch diejenigen Informationen, die erst nach Demontage

und Reinigung bei der Befundung ersichtlich werden. Die eben erwähnten Verdichterschau-
feln können in der Boroskop-Untersuchung, der Demontage und Reinigung unauffällig sein.
Die Befundung stellt jedoch z. B. eine Materialermüdung fest und kennzeichnet das Bauteil
als nicht mehr verwendbar.

- Unzugängliche Informationen sind eine Gruppe der versteckten Informationen, die auf-
grund ihrer besonderen Bedeutung hier separat erwähnt werden. In einer Produktion, aber
auch in der Instandsetzung gibt es Informationen, die durch Analyse oder Inspektion und
Prüfung auf Bauteilebene nicht ersichtlich sind. Diese Informationen kommen erst durch
die weiterführende Bearbeitung des Bauteils zum Vorschein. Folgendes Beispiel aus der
Triebwerksinstandhaltung veranschaulicht diese Kategorie: Für ein Gehäusebauteil eines
Triebwerkes wird nach Prüfung und Inspektion ein Reparaturverfahren eingeleitet, um vor-
handene Risse zu bearbeiten. Nach Bearbeitung der Risse treten im Rahmen einer Wärme-
behandlung weitere unentdeckte Risse im Bauteil auf. Der nun entstandene bzw. aufgedeck-
te Schaden führt zum Komplettausfall des Bauteils. Weniger komplexe, unzugängliche In-
formationen sind alle Informationen, die zu produktionsbedingten Unsicherheiten führen:
z. B. künftige unerwartete Maschinenausfälle, mitarbeiterbedingte Bearbeitungsmängel
oder Mängel an der Qualität zugekaufter Materialien.

Informationen können also nach der Art ihrer Verfügbarkeit eingeteilt werden. Eine weitere
Einteilungsmöglichkeit ist die Verfügbarkeit über den Prozess der Instandhaltung:

Wie oben bereits angedeutet, sind Informationen nicht immer zu Beginn der Instandhaltung
verfügbar. Es gibt Informationen, die der zunehmende Zeitverlauf aufdeckt [Scho03]. Andere
Informationen offenbart erst der Prozess der Instandhaltung selbst [Luh03]. Die Demontage des
Instandhaltungsobjektes ermöglicht es, den Zustand und den Schadenfall innen liegender Bau-
gruppen zu identifizieren. Scholl [Scho03] schlägt eine zeitliche Einteilung nach Ereignissen
vor, zu denen Informationen verfügbar werden:

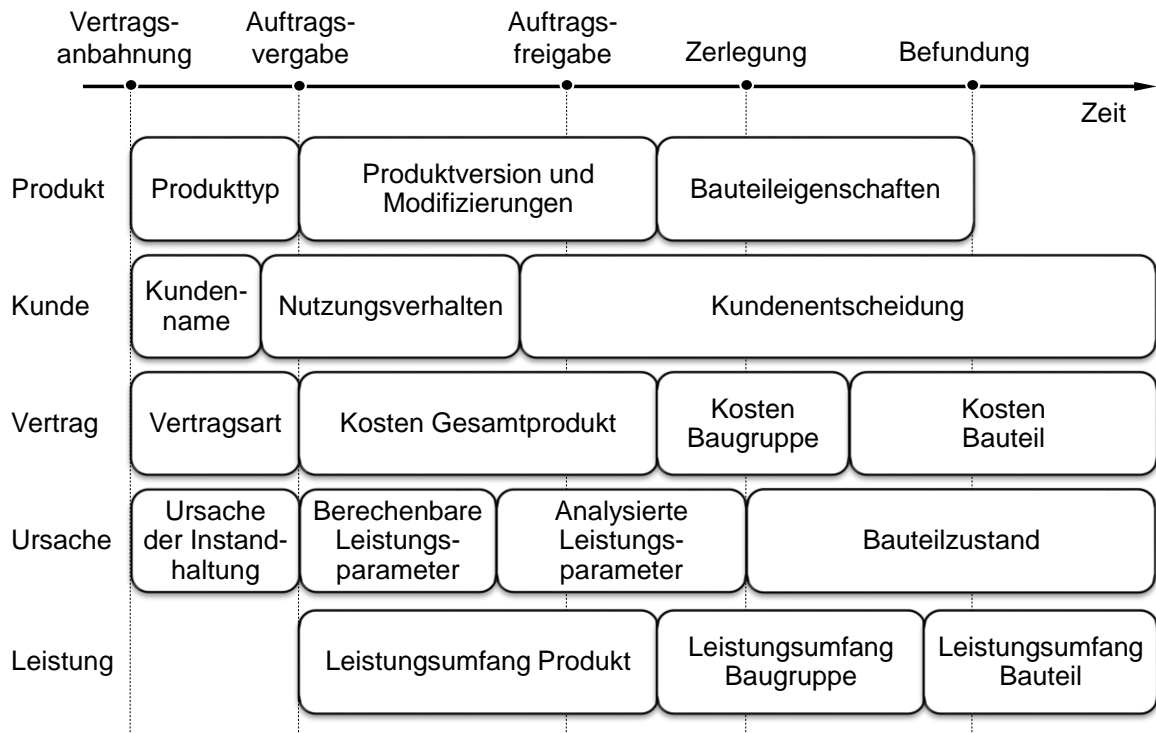


Abbildung 8 Beispiel der Informationsverfügbarkeit im Auftragsdurchlauf eines Instandhaltungsdienstleisters.

Abbildung 8 zeigt in den Kategorien Produkt, Kunde, Vertrag, Ursache und Leistung unterschiedliche Informationen. Die Anordnung der Informationen dokumentiert schematisch die unterschiedliche Verfügbarkeit im Instandhaltungsprozess, wobei der Detailgrad der Informationen im Verlauf des Auftragsdurchlaufs größer wird.

Zusammenfassend gilt: Informationen beeinflussen die Unsicherheit und können nach Art und zeitlicher Lage der Verfügbarkeit eingeteilt werden. Somit bestimmt die Informationsverfügbarkeit auch die Entwicklung der Unsicherheit über den Verlauf des Instandhaltungsprozesses. In anderen Worten: Die Unsicherheit verändert sich über den Verlauf der Instandhaltung, da die Informationsverfügbarkeit über den Auftragsdurchlauf unterschiedlich verteilt ist. Insbesondere in einem Umfeld, in dem nicht oder zumindest nicht unmittelbar alle Informationen zur Verfügung stehen, fehlt aktuell ein strukturierter Umgang mit Informationen und deren Beschaffung. Es fehlt eine einheitliche Methode zur Verwaltung und Verarbeitung relevanter Informationen zur Planung von Instandsetzungsereignissen. Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2 beschreiben einen strukturierten Umgang mit Informationen und erläutern eine Methode, Informationen nach ihrem Effekt auf die Unsicherheit zu bewerten und für die Planung nutzbar zu machen.

3.2.2 Entwicklung der Unsicherheit im Verlauf der Instandhaltungsproduktion

Es liegt die Vermutung nahe, dass die Unsicherheit im Laufe der Instandsetzung abnimmt, da immer mehr Informationen verfügbar werden. Eine empirische Studie in [Kopp15] untersucht die Entwicklung der Unsicherheit im Auftragsdurchlauf der Instandhaltungsproduktion. Die Aufwände von 110 Instandhaltungsereignissen (IHE) aus der Triebwerksinstandhaltung fließen in diese Studie ein. Ziel der Studie ist es, das Ausmaß der Unsicherheit zu unterschiedlichen Planungszeitpunkten der Instandhaltungsproduktion auszuweisen.

Unterschiedliche Informationen ermöglichen zu vier Planungszeitpunkten (Vertragsanbahnung, Auftragsfreigabe, Abschluss Zerlegung und Abschluss Befundung) die Bildung von Planungsgruppen. Für Aufträge einer Planungsgruppe gelten gleiche Planauftragszeiten. Der Variationskoeffizient der Auftragszeiten einer Planungsgruppe ist ein Maß für die Unsicherheit, da er beschreibt, wie unterschiedlich die Auftragszeiten in der Planungsgruppe verteilt sind. Je fortgeschrittener der Auftragsdurchlauf, desto mehr und bessere Informationen sind verfügbar. Mit diesen Informationen können Planungsgruppen mit geringeren Variationskoeffizienten gebildet werden.

Die Abbildung 9 stellt die Ergebnisse der Studie grafisch dar:

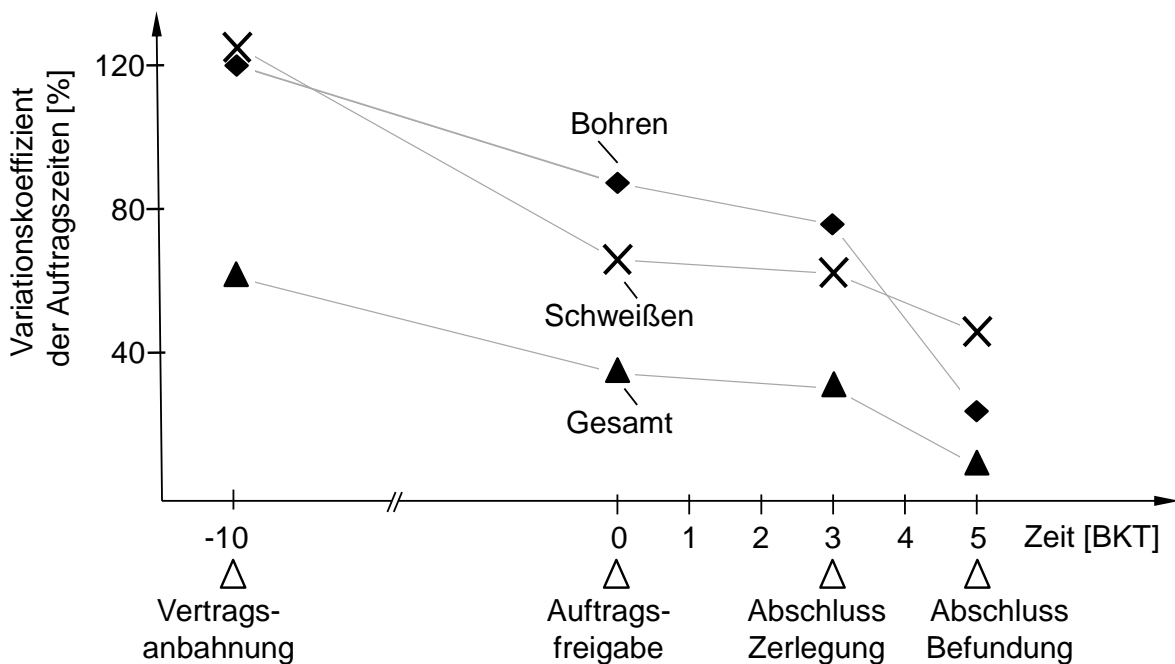


Abbildung 9 Die Mittelwerte der Variationskoeffizienten für Auftragszeiten je Planungsgruppe ausgewählter Datenreihen zu definierten Planungszeitpunkten im Auftragsdurchlauf [Kopp15].

Die Ergebnisse in Abbildung 9 zeigen die Entwicklung der Variationskoeffizienten für Auftragszeiten je Planungsgruppe für Schweißen und Bohren. Die Datenreihe *Gesamt* zeigt die Variationskoeffizienten bei Zusammenfassung der Auftragszeiten aller Kapazitätsgruppen der Bauteilinstandsetzung. Für die Datenreihe *Schweißen* sinken die Variationskoeffizienten im Verlauf des Auftragsdurchlaufs von z. B. 125 % bei Vertragsanbahnung auf 45 % bei Abschluss der Befundung

Die Ergebnisse der Studie ermöglichen es dem Unternehmen, geeignete Planungszeitpunkte für die Instandsetzung zu definieren: Der anfänglich sehr hohe Variationskoeffizient von 60 % bei Vertragsanbahnung eignet sich nicht für eine Planung der Instandsetzung. Der Variationskoeffizient sinkt bei Ankunft des Instandhaltungsobjektes (Auftragsfreigabe) auf 35 % und bei Abschluss der Zerlegung auf 30 %. Das bedeutet, dass der Planungszeitpunkt auf die Auftragsfreigabe des IHE gelegt werden kann, da nach Demontage die Unsicherheit nicht maßgeblich niedriger ist (im konkreten Beispiel liegen drei Arbeitstage zwischen den beiden Zeitpunkten). Nach der Befundung sinkt der Variationskoeffizient weiter auf 10 % und zeigt somit eine deutlich geringere Unsicherheit für die Instandsetzung auf. Die Ergebnisse der Befundung definieren somit den zweiten Planungszeitpunkt.

Diese Studie zeigt auf, dass eine Methodik benötigt wird, um die Auswirkung von Informationen auf die Planung der Instandhaltungsproduktion zu bewerten. Für die Planung der Instandhaltungsproduktion ist systematisch zu entscheiden, wann mit welchen Informationen geplant werden kann und welche Unsicherheit das Planungsergebnis birgt. Die Versuchsplanung umfasst geeignete statistische Methoden, um den Effekt von Informationen auf die Unsicherheit zu bewerten (vgl. Kapitel 5).

3.3 Umgang mit Unsicherheit und ihren Folgen

Unsicherheit entsteht aus mangelhafter Informationsverfügbarkeit (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die Folgen der Unsicherheit sind aus Unternehmenssicht nicht immer negativ. Meist erzeugt Unsicherheit Risiken und Chancen [Burm01]: Unerwartet gewonnene Aufträge von Kunden erzeugen Umsatz und sind somit zwar ungeplant, aber demnach positiv zu bewerten. Wenn die zusätzliche Kapazität jedoch nicht aufgebracht werden kann, entstehen Rückstände und die Liefertermine werden nicht mehr gehalten. Arbeitsumfänge können überraschend geringer aus-

fallen als geplant, da die erwarteten Schadensfälle nicht eingetreten sind. Wenn jedoch die hierdurch frei werdende Kapazität nicht anderweitig genutzt werden kann, wird die Produktivität der Fertigung reduziert.

Die Folge von Unsicherheit ist eine Abweichung vom geplanten Zustand. Aus Sicht der Produktionsplanung und -steuerung sind Abweichungen vom geplanten Zustand grundsätzlich negativ. Sie verursachen Steuerungsaufwand oder erfordern eine erneute Planung unter neuen Rahmenbedingungen [Wien12].

Dieses Kapitel beschreibt drei Möglichkeiten zum Umgang mit Unsicherheit und bezieht sich dabei auf die Lösungen des Risiko- und Komplexitätsmanagements:

- Reduzierung der Unsicherheit durch Informationsbeschaffung (Abschnitt 3.3.1),
- Beherrschung der Folgen der Unsicherheit durch Flexibilität (Abschnitt 3.3.2),
- Absicherung der Folgen der Unsicherheit (Abschnitt 3.3.3).

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Unsicherheit zu ignorieren. Diese Möglichkeit verändert die Unsicherheit und die daraus entstehenden Folgen nicht und hat daher keine Relevanz für dieses Kapitel.

3.3.1 Reduzierung der Unsicherheit durch Informationsbeschaffung

Die Definition der Unsicherheit selbst gibt den ersten Hinweis zum Umgang mit Unsicherheit: Unsicherheit entsteht aus unvollständigen und falschen Informationen (Abschnitt 2.1.1). Entsprechend reduziert sich Unsicherheit durch Informationsverfügbarkeit. Die Beschaffung von Informationen unterscheidet sich je nach Informationskategorie. Woltering nennt folgende Faktoren zum Informationsbedarf: „Vollständigkeit, Konsistenz, Korrektheit, Detaillierungsgrad, Zeitbezug, Quantifizierung, Aktualität, Herkunft, Verwendungsfrequenz und Aufbereitungsbedarf“ [Wolt99]. Aus dieser Aufzählung definiert diese Arbeit drei Faktoren der Informationsbeschaffung:

- Verfügbarkeit: Informationsverfügbarkeit unterteilt Informationen in vier Kategorien: offensichtliche, verdeckte, versteckte und unzugängliche Informationen (Abschnitt 3.2.1).
- Zeit: Informationen werden im späteren Verlauf des Auftragsdurchlaufes leichter zugänglich: Ingenieure können den Bauteilzustand leichter abschätzen, wenn das Instandhaltungsobjekt demontiert ist. Kundenvertreter können Entscheidungen vom Kunden einholen, wenn die Ingenieure den endgültigen Bauteilzustand analysiert haben. Je mehr Zeit vergeht,

desto besser ist die Informationsverfügbarkeit, da mehr Informationen gesammelt werden können. Je später die Information jedoch verfügbar ist, desto kleiner ist der Vorlauf der Planungsergebnisse.

- Kosten: Informationsbeschaffung ist mit Kosten verbunden [Gebh09]. Offensichtliche Informationen verursachen weniger Kosten, weil z. B. ein Telefonanruf oder das Studium der Unterlagen für die Beschaffung ausreichen. Versteckte Informationen hingegen verursachen mehr Kosten. Informationen zum Schadensfall eines Bauteils vor Demontage der Baugruppe sind mit hohen Kosten verbunden, weil die Baugruppe demontiert, die Bauteile gereinigt, geprüft und befundet werden müssen. Informationen zur Bauteilreparatur vor Befundung der Bauteile verursachen zusätzlichen Aufwand durch die Abschätzung und Expertise von Ingenieuren zur Festlegung der Reparaturverfahren und Planung der dadurch entstehenden Aufwände.

Ziel des hier vorgestellten Ansatzes ist es, die Informationsbeschaffung umfassend zu beschreiben. Die in der Studie zur Informationsverfügbarkeit (Abschnitt 3.2.2) vorgestellten Ergebnisse beruhen auf einer definierten Strategie der Informationsbeschaffung, die sich wie folgt klassifizieren lässt:

- Beschaffung der Information zum Zerlegungsgrad der Baugruppe in der Studie:
 - Zeit: nach Zerlegung der Baugruppe.
 - Verfügbarkeit: offensichtlich, da bereits zerlegt.
 - Kosten: gering, da nur Dokumentation.

Alternativ wäre es möglich, die Informationen zur Zerlegung vorab zu beschaffen.

- Alternative Beschaffung der Information zum Zerlegungsgrad der Baugruppe:
 - Zeit: vor Zerlegung der Baugruppe.
 - Verfügbarkeit: versteckt, da Baugruppe noch komplett montiert.
 - Kosten: hoch, da Inspektion der Baugruppe mit Boroskop, Interpretation der Ingenieure und Kundenentscheidung aufgrund des Vorbefundes.

Das Beispiel verdeutlicht, dass Informationsbeschaffung ein aktives Instrument zur Reduzierung der Unsicherheit ist. Die Faktoren Zeit, Verfügbarkeit und Kosten beeinflussen sich gegenseitig und bestimmen gemeinsam die Strategie der Beschaffung von Information. In anderen

Worten: Nicht nur der zeitliche Verlauf beeinflusst die Informationsverfügbarkeit, sondern auch die investierten Aufwände.

Unter dem Begriff condition monitoring überwachen Unternehmen den Zustand ihrer Maschinen und Anlagen auch während des Betriebes [Stas04]. Informationen zur Abnutzung von Komponenten und Bauteilen oder Temperaturen von Prozessen werden kontinuierlich gemessen und ausgewertet. Somit können Instandhaltungsereignisse geplant und vorbereitet werden. Die Kosten der unterschiedlichen Sensoren sind dabei von technologischen Rahmenbedingungen und den Anforderungen des Kunden abhängig und erlauben eine frühzeitige Informationsbeschaffung zu erhöhten Kosten.

Aktuell fehlt eine Methode, Unsicherheit mit unterschiedlicher Informationsverfügbarkeit zu messen. Somit kann nicht bewertet werden, ob Maßnahmen der Informationsbeschaffung Unsicherheit reduzieren. Abschnitt 5.3 beschreibt eine Methode, die Unsicherheit von Auftragszeiten zu bestimmen.

3.3.2 Beherrschung der Folgen der Unsicherheit durch Flexibilität

Die Folgen der Unsicherheit sind vielfältig und resultieren aus der Abweichung vom geplanten Zustand. Bei Überschreitung der Planauftragszeit reichen die Ressourcen für die Abarbeitung ggf. nicht mehr aus und die Fertigstellungstermine können nicht mehr eingehalten werden. Bei Unterschreitung der Planauftragszeit sind die Prozesse nicht mehr ausgelastet und die Produktivität der Produktion sinkt. Als Folge ist meist eine Neuplanung unter neuen Rahmenbedingungen erforderlich. Der Ausfall oder die Verzögerung ganzer Instandhaltungsmaßnahmen, sowie Entscheidungen von Kunden zur Änderung des Instandsetzungsumfangs kann ebenfalls eine Neuplanung anstoßen und vormals getroffene Planungsergebnisse verwerfen.

Flexibilität ist eine Möglichkeit, die Folgen von Unsicherheit zu beherrschen. Die Literatur beschreibt unterschiedliche Definitionen der Flexibilität. Eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Begriffe liefert z. B. Pagell [Page04]. Folgende Definition trifft einen für diese Arbeit passenden Flexibilitätsbegriff: „Die Handlungsflexibilität beschreibt (...) das (...) Reaktionsvermögen zur Bewältigung und Ausschöpfung neuer Chancen und Risiken aus einer veränderten Umweltsituation“ [Burm01]. Diese Definition der Flexibilität beschreibt durch den Bezug auf Chancen und Risiken auch den Zusammenhang mit Unsicherheit.

Gerwin [Gerw93] und Pagell [Page04] fassen unterschiedliche Ansätze zum Umgang mit Unsicherheit durch Flexibilität zusammen. Ausreichende Flexibilität trägt dazu bei, Unsicherheit zu beherrschen. Jedoch ist die Bereitstellung von Flexibilität mit Kosten verbunden [Mers11] und die Berücksichtigung aller Unsicherheiten nicht immer möglich [Burm01]. Wenn die Gründe, die Auswirkungen und die Zusammenhänge von Unsicherheit unbekannt sind, ist es schwer, die richtigen Maßnahmen und das richtige Ausmaß der Flexibilität zu definieren.

Eine Methode, das richtige Maß an Flexibilität aufgrund individueller Unsicherheiten zu definieren, fehlt allerdings. Maßnahmen, Flexibilität bereitzustellen, sind in der Regel teuer. Einen Mitarbeiter für mehrere Prozesse zu qualifizieren, damit er in Unterlastsituation flexibel eingesetzt werden kann, vermeidet Produktivitätsverluste, erzeugt aber Kosten für die Qualifizierung. Zudem ist ein Unternehmen der Instandhaltungsproduktion nicht nur mit einer Unsicherheitsquelle konfrontiert. Vielmehr finden parallel mehrere unsichere Ereignisse statt, wie z. B. die Instandsetzung zweier Aufträge von unterschiedlichen Kunden mit unterschiedlichen Schadenfällen. Durch die langen Durchlaufzeiten von Instandhaltungsereignissen benötigt die Instandhaltungsproduktion eine Methode, eine resultierende Unsicherheit aus gleichzeitig stattfindenden Ereignissen zu ermitteln (vgl. Kapitel 5 und 6).

3.3.3 Absicherung gegen Unsicherheit

Die Absicherung gegen Risiken ist nach der Vermeidung und Verminderung die letzte Maßnahme des Risikomanagements [Gaul03]. Die folgende Vorgehensweise ist an das Vorgehen zur Absicherung gegen Risiken nach [Pinn07] angelehnt, aber um die Sicherung von Chancen erweitert:

- 1) Identifikation verbleibender Unsicherheiten: Weil Risiken meist nicht vollständig vermieden werden können [Jako13], sind die verbleibenden Unsicherheiten im Unternehmen zu identifizieren und ggf. abzusichern. Dienstleister in der Instandhaltungsproduktion von hochwertigen Investitionsgütern verhandeln mit unterschiedlichen Kunden über individuelle Aufträge. Es ist daher nötig, die individuellen Unsicherheiten zu identifizieren und zu bemessen, um deren Folgen abzusichern oder zu akzeptieren.
- 2) Entscheidung zur Absicherung gegen Unsicherheiten: Folgende drei Strategien beschreiben die unterschiedliche Absicherung gegen identifizierte Unsicherheiten auf Basis der Einschätzung zu Risiken und Chancen:

- Übernahme der Unsicherheit durch das Unternehmen: Das Unternehmen entwirft hierbei einen Aktionsplan bei Eintreten der Unsicherheit. Chancen aus z. B. einer Volumensteigerung eines Vertrages müssen bei Eintreten durch Maßnahmen zu einer Kapazitätssteigerung aufgefangen werden. Risiken aus z. B. der Überschreitung von Kosten durch erhöhten Materialverbrauch bedürfen finanzieller Rücklagen. Aytug beschreibt z. B. Kosten, die in Erwartung einer Unsicherheit in der Fertigung anfallen [Aytu05].
- Übernahme der Unsicherheit durch den Kunden: Hierbei übernimmt der Kunde alle Folgen der Unsicherheit. Verträge, die die tatsächlich benötigte Zeit und verbrauchtes Material individuell für jedes Instandhaltungsereignis abrechnen, stellen eine Unsicherheit für den Kunden dar. Er trägt das Risiko erhöhter Aufwände, kann aber auch von reduzierten Kosten profitieren [Herd13].
- Übernahme der Unsicherheit durch beide Parteien: Beide Parteien können einen Teil der Unsicherheit übernehmen. Festpreise für Instandhaltungsereignisse beinhalten die Unsicherheit, dass die tatsächlichen Kosten geringer oder höher ausfallen könnten als der vereinbarte Preis [Herd13]. Je nach Einschätzung des zu erwartenden Kostenaufwandes stellt das eine Chance oder ein Risiko für die Vertragsparteien dar. Für beide Vertragsparteien sind die Kostentransparenz und die Planungssicherheit positiv.

Zusammenfassung zum Umgang mit Unsicherheit:

Der Umgang mit Unsicherheit und ihren Folgen ist komplex und erfordert viele Funktionen des Unternehmens. Die Maßnahme der Informationsbeschaffung setzt zunächst die Kenntnis der Unsicherheit und das Verständnis über die Konsequenzen voraus, um die Faktoren Verfügbarkeit, Zeit und Kosten daraufhin auszurichten. Die dabei zu beschaffenden Informationen können beliebig komplex und technischer oder betriebswirtschaftlicher Natur sein. Um die Flexibilität zu dimensionieren, ist es erforderlich, Unsicherheiten zu quantifizieren. Ein wirtschaftliches Maß der Flexibilität ergibt sich aus der Abwägung der Kosten zur Beherrschung von Unsicherheit mit den möglichen Folgen. Um Unsicherheiten abzusichern, müssen Unsicherheiten und deren Folgen möglichst transparent sein. Im ungünstigen Fall führen sie zur Ablehnung eines profitablen Auftrages, da hohe Preise aufgrund der verbliebenen Unsicherheiten kalkuliert wurden. Andererseits könnten defizitäre Aufträge abgeschlossen werden, falls verbleibende Unsicherheiten nicht ausreichend berücksichtigt werden. Die Grundlage für die hier vorgestellten Maßnahmen zum Umgang mit Unsicherheit ist es also, Unsicherheit bestmöglich zu quantifizieren.

In der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion fehlen Methoden, Unsicherheit anhand unterschiedlicher Informationsverfügbarkeit zu quantifizieren. Außerdem fehlt eine Vorgehensweise, den Bedarf an Flexibilität abzuleiten, um diese Unsicherheit zu beherrschen. Kapitel 5 stellt einen Ansatz zur Messung der Unsicherheit vor. Abschnitt 6.1.3 beschreibt eine Methode, die Kapazitätsflexibilität an die vorhandenen Unsicherheiten anzupassen.

3.4 Verläufe der Unsicherheit

Dieses Kapitel hat bereits viele Wechselwirkungen der Unsicherheit im Umfeld von Unternehmen aufgezeigt. Ziel dieses Abschnitts ist es, diese Wechselwirkungen durch qualitative Verläufe abzubilden. Nyhuis beschreibt die Theorie zur Ableitung von Kennlinien für logistische Kenngrößen als Erklärungsmodell [Nyhu08]: Modelle können genutzt werden, um „ein grundlegendes Verständnis über das statische und dynamische Verhalten eines Systems zu erlangen“ [Nyhu12].

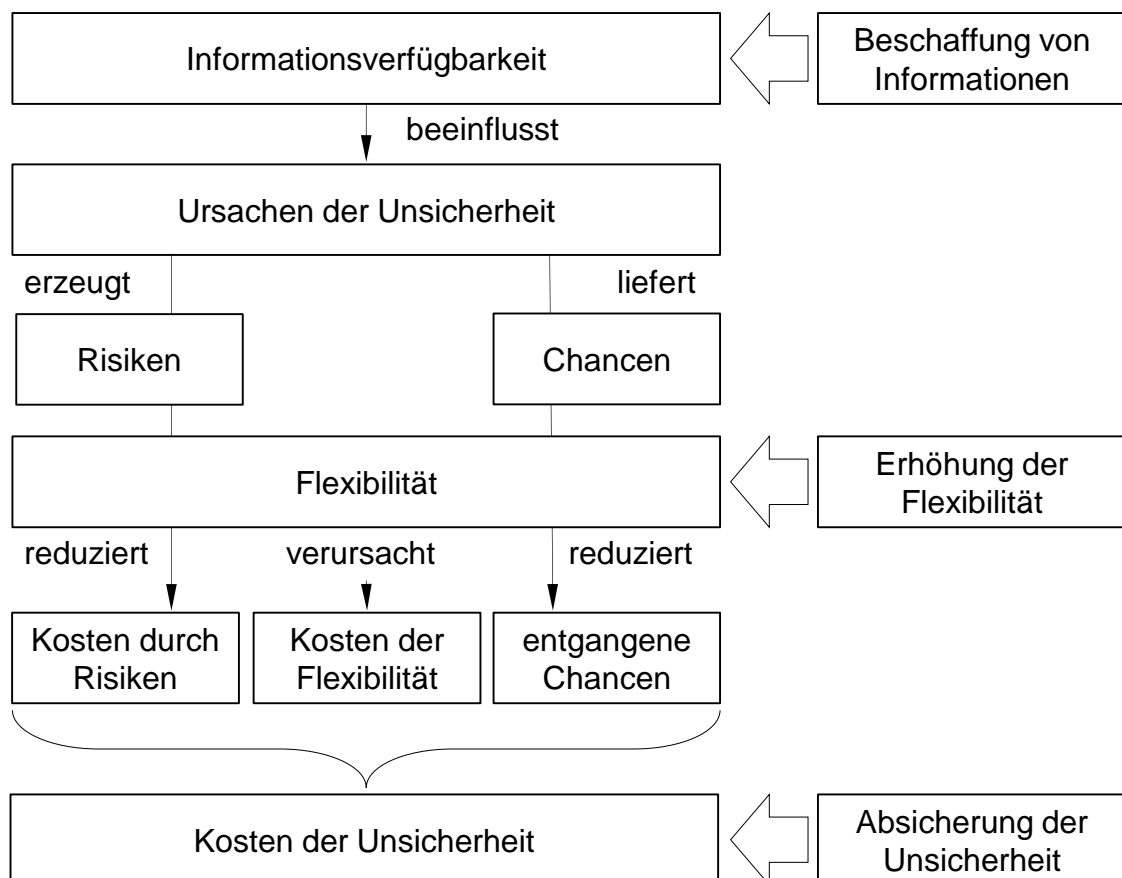


Abbildung 10 Wechselwirkungen der Unsicherheit.

Abbildung 10 beschreibt die Zusammenhänge der Begrifflichkeiten dieser Arbeit und dient bereits als Leitfaden für die vorangehenden Abschnitte des Kapitels (siehe auch Abbildung 5).

Die folgenden Ausführungen bauen auf dem Verständnis zur Modellbildung und zu den theoretischen Produktionskennlinien auf [Nyhu12].

3.4.1 Grundsätzliche Zusammenhänge der Unsicherheit

Die Kernaussagen der vorangehenden Abschnitte beschreiben die Wechselwirkungen der Modellparameter und definieren die Verläufe in Abbildung 11:

- 1) Ein erhöhter Aufwand der Informationsbeschaffung verbessert die Informationsverfügbarkeit (Abschnitt 3.3.1). Die Effizienz der Informationsbeschaffung nimmt jedoch mit steigender Informationsverfügbarkeit ab, da der Aufwand zur Beschaffung weiterer Informationen zunimmt. Der Verlauf der Informationsverfügbarkeit nähert sich den verfügbaren Informationen an. Die verfügbaren Informationen entsprechen der maximalen Information abzüglich der unzugänglichen Information. Das Informationsdelta ergibt sich aus der aktuellen Informationsverfügbarkeit und der maximalen Information. Dieses Delta ist die Grundlage der Unsicherheit.
- 2) Verbesserte Informationsverfügbarkeit reduziert die Unsicherheit (Abschnitt 3.2). Je mehr Informationen vorhanden sind, desto größer ist die Effizienz im Umgang mit Unsicherheit. Andererseits sind die Kosten der Unsicherheit begrenzt. Somit steigt die Effizienz im Umgang mit Unsicherheit mit zunehmendem Aufwand der Informationsbeschaffung und sinkt ab einem bestimmten Zeitpunkt wieder.
- 3) Die Kosten der Unsicherheit bestehen aus Kosten durch Risiken, Kosten der Flexibilität und Kosten durch entgangene Chancen. Bei fehlenden Informationen, also maximaler Unsicherheit, sind diese Kosten am höchsten, da die entstehende Unsicherheit durch maximale Flexibilitätskosten oder alternativ maximale Kosten der Absicherung ausgeglichen werden muss.
- 4) Die Gesamtkosten beinhalten den Aufwand zur Beschaffung der Informationen und die Kosten der Unsicherheit.

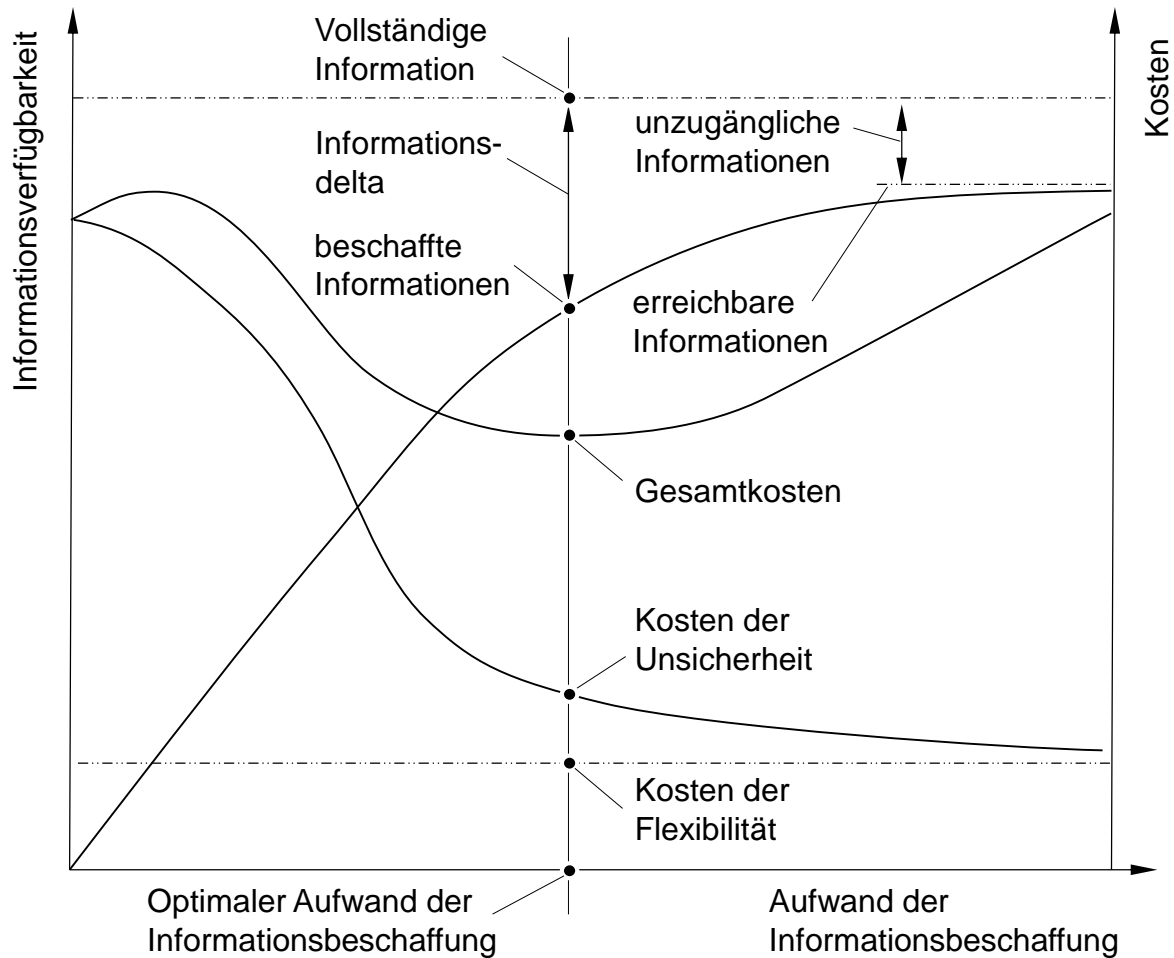


Abbildung 11 Schematischer Verlauf der Informationsverfügbarkeit und Kosten der Unsicherheit.

Die Gesamtkosten setzen sich aus dem Aufwand der Informationsbeschaffung und den Kosten der Unsicherheit zusammen. Die Kosten der Unsicherheit sinken mit steigender Informationsbeschaffung und nähern sich den Kosten der Flexibilität an. Die Kosten der Flexibilität sind ein Teil der Kosten der Unsicherheit, da das Ausmaß der Flexibilität den Verlauf der Kosten der Unsicherheit maßgeblich definiert. Je höher die Flexibilität, desto steiler verläuft die Kurve der Kosten der Unsicherheit. Jedoch steigen mit erhöhter Flexibilität auch die Kosten der Flexibilität, die unabhängig von der Informationsbeschaffung aufgebracht werden müssen. Die dargestellten qualitativen Verläufe geben Unternehmen einen Hinweis auf den Umgang mit Informationsverfügbarkeit: Es existiert ein optimaler Bereich für den Beschaffungsaufwand von Informationen. Dieser ist abhängig vom Aufwand der Informationsbeschaffung, von der Effizienz der Informationsbeschaffung und der Effizienz im Umgang mit Unsicherheit.

3.4.2 Effizienz in der Informationsbeschaffung und in der Reduzierung der Unsicherheit

Eine effiziente der Informationsbeschaffung ermöglicht es dem Unternehmen, mit geringem Aufwand relevante Informationen zu Instandhaltungsereignissen zu beschaffen. Die Effizienz im Umgang mit Unsicherheit beschreibt die Fähigkeit des Unternehmens, mit den vorhandenen Informationen, Unsicherheit bestmöglich zu reduzieren.

Steigerung der Effizienz der Informationsbeschaffung

Die Erfahrung des Unternehmens, die Prozesse des Auftragsdurchlaufes und das Produkt selbst beeinflussen die Effizienz der Informationsbeschaffung. Das Wissen und die Erfahrung der Mitarbeiter eines Unternehmens ermöglichen die effektive Beschaffung der richtigen Informationen. Datenbanken mit dem gesammelten Wissen vergangener IHE ermöglichen die Auswertung und Ableitung von Entscheidungen und deren Konsequenzen für die Informationsverfügbarkeit [Burm06]. Die Folgen sind die bessere Bildung von Schadensfällen aufgrund gesammelter Informationen und die Prognose von Folgeschäden aufgrund bekannter Schadensbilder. Die Prozesse des Auftragsdurchlaufs bestimmen die Fähigkeit der Organisation, Informationen zu verarbeiten: Der Kunde definiert mit seinen Kommunikations- und Dokumentationsprozessen maßgeblich den anfänglichen Informationsstand des Dienstleisters. Die Integration des Kunden in den Auftragsdurchlauf erleichtert die Verarbeitung von Informationen zum Investitionsgut durch die Arbeitsvorbereitung und PPS [Schn03] sowie die Einleitung der ersten Schritte zur Inspektion und Befundung (z. B. Zustandsüberwachung beim Kunden durch „Health and Usage Monitoring“ [Stas04]). Die Prozesse der Inspektion und Befundung entscheiden letztendlich mit unterschiedlichen Diagnose- und Auswertungswerkzeugen über den finalen Leistungsumfang und über die Effizienz der Informationsverarbeitung.

Im Gegensatz zum Aufbau der eigenen Erfahrung und zur Verbesserung der Prozesse des Auftragsdurchlaufes kann das Unternehmen den Stand im Produktlebenszyklus nicht beeinflussen. Der Lebenszyklus eines Produktes bietet dem Dienstleister unterschiedliche Herausforderungen (vgl. dazu Abschnitt 1.1 und [Herd13]).

Eine effizientere Informationsbeschaffung erzeugt bei gleichem Aufwand mehr Informationen als eine ineffizientere. Gesteigerte Erfahrung, bessere Prozesse und der Stand des Produktes im Lebenszyklus beeinflussen den Verlauf der Informationsverfügbarkeit.

Steigerung der Effizienz im Umgang mit Unsicherheit

Die Flexibilität eines Unternehmens, neue Informationen zu verarbeiten und wirksame Maßnahmen einzuleiten, definiert die Effizienz im Umgang mit Unsicherheit. Maßnahmen zur Steigerung der Flexibilität reduzieren die Folgen von Unsicherheit, erzeugen jedoch Kosten zur Umsetzung und Bereitstellung der Maßnahmen (Abschnitt 3.3.2). Diese Kosten sind Fixkosten und bleiben auch bei geringer Unsicherheit. Eine Veränderung im Ausmaß der Unsicherheit erfordert es somit, die Kosten von Flexibilitätsmaßnahmen zu überprüfen und ggf. anzupassen.

3.4.3 Verwendung der Verläufe

Die hier vorgestellten Verläufe dienen als qualitatives Erklärungsmodell [Arno08]. Die Kennlinien beschreiben das Verhalten von Informationsverfügbarkeit und Unsicherheit und bilden die Auswirkungen der Effizienz der Informationsbeschaffung und der Effizienz im Umgang mit Unsicherheit ab. Das vorgestellte Erklärungsmodell ist hilfreich, Wechselwirkungen in der Instandhaltungsproduktion zu verstehen. Folgende Schritte sind notwendig, um das qualitative Erklärungsmodell in ein quantitatives Entscheidungsmodell umzuwandeln [Acko78, Arno08]:

- 1) Quantifizierung des Aufwandes der Informationsbeschaffung: Der Aufwand der Informationsbeschaffung kann in Kosten gemessen werden. Diese Informationen sind je nach Komplexität leicht zu beschaffen. Eine Liste mit allen Maßnahmen der Informationsbeschaffung und entsprechendem Aufwand gemessen in Kosten verschafft einen Überblick über alle Möglichkeiten. Einfacher wird diese Aufstellung, wenn sie für einen bestimmten Zeitpunkt im Instandsetzungsprozess definiert wird. Problematisch sind jedoch die richtigen Prioritäten der Informationsbeschaffung. Ein Unternehmen kann nicht immer zweifelsfrei diejenigen Maßnahmen der Informationsbeschaffung identifizieren, die den meisten Nutzen erbringen, um diese zuerst durchzuführen. Zudem haben Informationen je nach Projekt einen unterschiedlichen Nutzen (siehe Abschnitt 3.2.2), womit sich eine unterschiedliche Maßnahmenpriorität je Projekt ergibt. Ein Pilotenreport liefert z. B. bei einem Reparaturfall wichtige Informationen zur Identifizierung der individuellen Schadensfälle. In einem Überholungsfall wird das Triebwerk evtl. unabhängig von diesem Report zerlegt und hilft dem Unternehmen nicht bei der Festlegung einer Auftragszeit.
- 2) Bestimmung der Informationsverfügbarkeit: Die Maßnahmen der Informationsbeschaffung bewirken eine erhöhte Informationsverfügbarkeit. Informationsverfügbarkeit ist allerdings

schwer messbar und geprägt vom Anteil der unzugänglichen und somit unbekanntem Informationen. Die Informationstheorie und die Entscheidungslehre diskutieren Möglichkeiten zur Messung von Information [Luhm00]. Eine Möglichkeit besteht darin, die Liste der Maßnahmen zur Informationsbeschaffung aus Punkt 1) um die jeweils gewonnenen Informationen zu ergänzen. Die Informationsverfügbarkeit beschreibt dann die Relation der Informationen aus den durchgeführten Maßnahmen zu den Informationen aller Maßnahmen.

- 3) Messung der Kosten der Unsicherheit: Die Kosten der Unsicherheit lassen sich nur schwer quantifizieren. Eine Möglichkeit ist die Vereinfachung auf einen oder wenige Faktoren. Die Varianz der Stundenverbräuche kann z. B. die Kennlinie der Kosten der Unsicherheit über dem Aufwand der Informationsverfügbarkeit beschreiben. Kapitel 5 beschreibt dafür eine Methode zur Messung der Unsicherheit anhand logistischer Größen. Diese Vereinfachung schränkt die Belastbarkeit der Ergebnisse ein, da keine konkret entstehenden Kosten gemessen werden. Diese vereinfachte Lösung erlaubt es jedoch, den richtigen Aufwand der Informationsbeschaffung zu ermitteln und damit die Kosten der Unsicherheit zu reduzieren.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Verläufe verdeutlichen die Wirkzusammenhänge zwischen Information, Unsicherheit und Kosten und unterstützen somit einen strukturierten Umgang mit Unsicherheit im Unternehmen. Aufgrund der hohen Komplexität kann ein Unternehmen die Verläufe nur schwer als ein quantifiziertes Entscheidungsmodell nutzen. Gezielte Vereinfachungen erlauben dennoch die Entscheidungsfindung zu den vom Unternehmen beeinflussbaren Variablen: dem Aufwand der Informationsbeschaffung, dem Ausmaß der Flexibilität und der Absicherung der Unsicherheit.

Zusammenfassend beschreibt dieses Kapitel Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion als ein komplexes Modell mit unterschiedlichen, schwer zu quantifizierenden Parametern. Unsicherheit liefert Chancen und Risiken. Flexibilität ermöglicht dem Instandsetzungsdienstleister die Nutzung der Chancen und die Reduzierung der Risiken. Durch die Beherrschung der Folgen der Unsicherheit vermeidet Flexibilität Kosten, wobei sie selbst ein Kostentreiber ist. Unsicherheit kann jedoch nie komplett vermieden werden und es bleiben Folgen von Unsicherheit unabhängig von Informationsverfügbarkeit und Flexibilität. Die Absicherung der Folgen der Unsicherheit ist die letzte Maßnahme zum Umgang mit Unsicherheit.

4 Anpassung der PPS an die Instandhaltungsproduktion

Die Unsicherheit in der Instandhaltungsproduktion erfordert die Anpassung der Methoden der PPS. Die Analyse der Produktionsplanung und -steuerung unter den Rahmenbedingungen der Instandhaltungsproduktion liefert ein erweitertes Anforderungsprofil der Aufgaben der PPS in Abschnitt 4.1. Der Abschnitt 4.2 definiert diese Anforderungen als Handlungsfelder und Grundlage der weiteren Kapitel dieser Arbeit.

4.1 Anforderungen an die Aufgaben der PPS

Dieser Abschnitt stellt den Aufgaben der PPS (Abschnitt 2.3) die Rahmenbedingungen der Instandhaltungsproduktion gegenüber und formuliert Anforderungen an die Kapazitätsplanung und -steuerung in der Instandhaltungsproduktion (geordnet mit A1 bis A5).

A1 – Die PPS muss die Unsicherheit der Aufträge und die Ursachen dieser Unsicherheit für alle Beteiligten transparent darstellen.

Mit fortschreitendem Auftragsdurchlauf reduziert sich die Unsicherheit der Aufträge, so dass die Planungsparameter der PPS kontinuierlich anzupassen sind. Von der Absatzplanung bis zur ersten Untersuchung des Instandhaltungsobjektes beschreibt folgendes Beispiel den Anpassungsbedarf:

- Stufe 1: Der Kunde hat mündlich ein Instandsetzungsereignis angemeldet.
- Stufe 2: Erste Informationen zum Instandhaltungsereignis werden ausgetauscht.
- Stufe 3: Der Vertrag ist erstellt und alle Rahmenbedingungen sind definiert.
- Stufe 4: Das Instandhaltungsobjekt ist beim Dienstleister eingetroffen.
- Stufe 5: Der Leistungsumfang ist beschrieben und kommuniziert.

In den frühen Stadien des Auftragsdurchlaufs verändern sich Informationen schnell. Kunden melden ihre Instandhaltungsereignisse an, verändern Zeitpunkt und Leistungsumfang oder stornieren die Aufträge wieder. Ein Kraftwerksbetreiber zieht z. B. aufgrund aktueller Stillstandszeiten die Instandsetzung einer Industriegarturbine um mehrere Monate nach vorn. Eine Luftfahrtgesellschaft verschiebt aufgrund aktuell guter Auslastungszahlen die Wartung der Flugzeugtriebwerke um mehrere Wochen nach hinten. Instandhaltungsereignisse sind allerdings nicht nur unberechenbaren Faktoren ausgeliefert: Kraftwerke, die zur Kälteerzeugung eingesetzt werden, werden meist in den Wintermonaten, Kraftwerke zur Wärmeerzeugung in

den Sommermonaten gewartet. Luftfahrtgeräte unterliegen Regularien zur periodischen Instandhaltung, die nur wenig Spielraum für den Kunden gewähren. Unternehmen haben feste Zeiten für Betriebsferien, in denen meist auch große Wartungen durchgeführt werden. Neben der Unsicherheit des Leistungsstarts sind insbesondere die Einflussfaktoren auf die Auftragszeiten vielfältig. Die Anlieferung des Instandhaltungsobjektes ermöglicht es, die Schäden zu untersuchen und die Auftragszeiten der Reparaturaufträge zu ermitteln. Vorab können die Schäden nur geschätzt oder aus den Informationen der Kunden abgeleitet werden. Die Umfänge zur Reparatur hängen vom Zustand der Bauteile ab und können erst bei Befundung definiert werden. Zum einen ist es daher wichtig, die Planungsgrößen möglichst effizient auf Basis der vorhandenen Informationen zu prognostizieren [Eick13]. Zum anderen muss die dann noch bestehende Unsicherheit für alle Prozessbeteiligten transparent sein, da die Planung der PPS die Grundlage vieler Entscheidungen im Unternehmen ist.

A2 – Die Planungsgrößen der PPS spiegeln die Unsicherheit wider und orientieren sich an den verfügbaren Informationen des Unternehmens.

Die PPS kann aufgrund der fehlenden Informationen meist keine konkreten Fertigungsaufträge erstellen, um eine mittel- bis langfristige Terminierung und Kapazitätsplanung durchzuführen. Sie nutzt daher Referenzprodukte oder Referenzarbeitspläne, um in der Durchlaufterminierung und Kapazitätsplanung Auftragszeiten schätzen und verplanen zu können. Komplexe und vielfältige Informationen ermöglichen es, die Auftragszeiten abzuschätzen. Sie erfordern aber auch einen hohen Aufwand, die Informationen zu beschaffen und zu verarbeiten. Eine systematisierte Vorgehensweise bei der Definition der benötigten Informationen, der Analyse der verfügbaren Informationen und der Festlegung von Referenzwerten ist notwendig. Die Planung muss den entstehenden Aufwand der Informationsbeschaffung und -verarbeitung mit dem erreichten Nutzen gegenüberstellen. Sie muss in der Lage sein, neue Informationen kurzfristig einzuarbeiten [Scho03]. Neue Produkte, Kunden und Leistungsumfänge verändern die Rahmenbedingungen zur Informationsbeschaffung, so dass die Referenzwerte ständig zu überprüfen sind.

A3 – Die Methoden der Kapazitätsplanung berücksichtigen die Unsicherheit der Aufträge in der Belastungsplanung.

Die um die Unsicherheit ergänzten Planungsgrößen ermöglichen es, die Belastungsplanung um eine Abbildung der Unsicherheit zu erweitern. Das Ergebnis der Planung zeigt somit nicht nur

die zu erwartende Belastung, sondern auch die zu erwartende Abweichung von dieser Belastung. Das Unternehmen ist damit in der Lage, die Unsicherheit der Auftragszeiten als Entscheidungsparameter zu berücksichtigen. Diese erhöhte Transparenz ist vor allem wegen der geringen Belastungsflexibilität der Instandhaltungsproduktion notwendig. Weil der Kunde den Auftragsstart und die Durchlaufzeit bestimmt, kann die Instandhaltungsproduktion den Auftragsstart nicht verschieben, um Engpässe und Produktivitätsverluste zu vermeiden. Entsprechend wichtig ist es daher, die Unsicherheit in der Belastungsplanung abzubilden, um den Kapazitätsabgleich zu unterstützen und die Machbarkeit des Produktionsprogrammes einschätzen zu können.

A4 – Die Kapazitätsplanung bestimmt die benötigte Kapazitätsflexibilität und berücksichtigt diese im Kapazitätsabgleich.

Aufgrund der geringen Belastungsflexibilität ist die Kapazitätsflexibilität in der Instandhaltungsproduktion von besonderer Bedeutung. Die Kapazitätsflexibilität ist aufgrund der hohen Anforderungen an die Qualifizierung und der wechselnden Verteilung der Belastung im Unternehmen besonderen Anforderungen unterworfen:

Die Arbeit an technisch komplexen Maschinen und Anlagen erfordert einen hohen Wissensstand und die Übernahme der Ergebnisverantwortung von den Mitarbeitern [Pata04]. Feedbackschleifen der Mechaniker zu den planenden Stellen prägen zudem die Instandhaltungsproduktion: Fehler in der Leistungsbeschreibung der Ingenieure werden von den Mechanikern gefunden und berichtet [Kinn04]. Werden diese Fehler erst später oder im schlimmsten Fall beim Kunden entdeckt, entstehen Mehraufwände oder Einbußen durch den Verlust des Kunden. Nicht entdeckte Fehler durch die Instandhaltung können in der Luftfahrt gravierende Unfälle verursachen (vgl. Patankar zu instandhaltungsbedingten Unfällen [Pata04]).

Unterschiedliche Produkttypen, eine hohe Vielfalt an Einzelteilen, individuelle Leistungsausprägungen und externere Anforderungen führen zu einer unterschiedlichen Verteilung der Belastungen für die Bereiche des Unternehmens. Folgende Beispiele verdeutlichen die Vielfalt möglicher Ereignisse:

- Hohe Belastung der Arbeitsvorbereitung: Der aktuelle Produktmix im Unternehmen belastet die Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung besonders stark, so dass sich die Erstellung der Leistungsbeschreibung für das Instandhaltungsobjekt verzögert.

- Hohe Belastung in der Demontage: Ein Kunde möchte alle demontierten Baugruppen selbst untersuchen und bei allen weiteren Demontageschritten anwesend sein.
- Hohe Belastung in der Reinigung, Prüfung und Befundung: Überholungsaufträge verursachen einen besonders großen Prüfungsaufwand. Die Häufung von aufeinanderfolgenden Aufträgen mit dieser Leistungsausprägung belastet daher insbesondere die Abteilungen zur Bauteilprüfung und Befundung.
- Hohe Belastung in der Teileinstandsetzung: Kunden können darauf bestehen, die original verbauten Teile instandzusetzen, was für die Bauteilinstandsetzung höhere Belastungen verursacht. Fordern Kunden dagegen eine geringe Durchlaufzeit, die mit einer vermehrten Beschaffung von Ersatzteilen einhergeht, kann dies die Bauteilinstandsetzung entlasten.
- Hohe Belastung für den Testlauf: Einige Kunden stellen besondere Ansprüche an den Testlauf ihrer Instandhaltungsobjekte: Test bei Anlieferung mit Dokumentation, Test vor Auslieferung mit Anwesenheit des Kunden und bereitgestelltem Werkzeug.

Die Ausprägung der Auftragszeiten und die daraus folgende Verteilung der Belastung im Unternehmen ist eine Folge der Unsicherheit der Instandhaltungsproduktion. Je nach Ausprägung der Unsicherheit kann die aktuelle Situation im Unternehmen alle an der Auftragsabwicklung beteiligten Prozesse unverhältnismäßig hoch belasten.

Die Anforderungen an die Qualifizierung und wechselnde Engpässe erschweren es, ein geeignetes Maß für die Kapazitätsflexibilität in der Instandhaltungsproduktion zu definieren. Die Belastungsplanung muss zu erwartende Abweichungen vom Planwert aufzeigen, um die benötigte Kapazitätsflexibilität abzuleiten. Die aktuelle Kapazitätsflexibilität muss immer auch die Grundlage des Kapazitätsabgleichs im Rahmen der Kapazitätsplanung sein, um Engpässe und Produktivitätsverluste zu vermeiden. Eickemeyer [Eick13] entwickelt ein mathematisches Optimierungsmodell der Kapazitätsabstimmung im Rahmen der Instandhaltungsproduktion und berücksichtigt die Nutzung diverser Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität. Das Modell berücksichtigt jedoch keine Unsicherheit der Auftragszeiten und nutzt nicht die Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter.

A5 – Die Methoden der Kapazitätssteuerung nutzen die Mehrfachqualifikation und die Anpassung der Arbeitszeit im Rahmen der definierten Kapazitätsflexibilität, um die schwankenden Belastungen auszugleichen.

Die Kapazitätssteuerung übernimmt die kurzfristige Koordination der Maßnahmen zur Anpassung des Kapazitätsangebotes im Rahmen der vorhandenen Kapazitätsflexibilität (Abschnitt 2.3). Die Veränderung der Arbeitszeiten, Einstellung von Mitarbeitern, Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit und Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter sind Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität.

Die hohen Anforderungen an Qualifizierung und umfangreiche Regularien von Herstellern und Behörden (Abschnitt 2.2) schränken die Einstellung neuer Mitarbeiter und die Nutzung von Leiharbeitnehmern stark ein. Die Arbeitsgeschwindigkeit zu erhöhen ist meist aus Gründen der Sicherheit nicht möglich und oft nicht ratsam: Beispielsweise definiert ein Mitarbeiter der Befundung einen wesentlichen Teil des Umsatzes des Dienstleisters, indem er die Bauteile befundet. Eine falsche Entscheidung aufgrund von Zeitdruck verursacht Kosten oder verärgert den Kunden. Die Anpassung der Arbeitszeit im Rahmen von Arbeitszeitmodellen und die Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter verbleiben damit als kurzfristig einsetzbare Methoden der Kapazitätsflexibilität [Wien11]. Die Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter ist aus weiteren Gründen eine wichtige Maßnahme für Unternehmen der Instandhaltungsproduktion:

- Mitarbeiter mit Mehrfachqualifizierung können innerhalb ihrer Arbeitszeit ohne zeitliche Vorlaufzeit und ohne zusätzliche Kosten anderen Prozessen zugeordnet werden.
- Unterschiedliche Produkte mit unterschiedlichen Schadensfällen fordern vielfältige Qualifikationen [Kinn04]. Mitarbeiter mit mehreren Qualifikationen können prozessübergreifend arbeiten und somit Durchlaufzeiten reduzieren.
- Produktmix, Kundenmix und die unterschiedlichen Leistungsausprägungen lasten Prozesse schwankend aus und führen zu Unterlast- und Überlastsituationen. Bei fehlender Mehrfachqualifizierung führt das zu niedrigerer Produktivität bzw. höheren Durchlaufzeiten.
- Spezielle Reparaturen sind wichtige Elemente, neue Kunden zu gewinnen. Die Auslastung dieser speziellen Prozesse ist jedoch insbesondere in der Anlaufphase gering und sporadisch. Um Produktivitätsverluste zu vermeiden, müssen die Mitarbeiter zusätzlich auf andere Prozesse geschult sein.

Da die Mehrfachqualifizierung mit Kosten verbunden ist, müssen die Qualifizierungsmaßnahmen dem tatsächlichen Flexibilitätsbedarf angepasst werden. Die Planung unter Unsicherheit

bestimmt das benötigte Ausmaß der Flexibilität und dient somit als Entscheidungshilfe zur Definition der Mehrfachqualifizierung.

4.2 Handlungsfelder für die Aufgaben der PPS

Der vorangehende Abschnitt beschreibt die Anforderungen an die Aufgaben der PPS aufgrund der Unsicherheit und der besonderen Rahmenbedingungen der Instandhaltungsproduktion. Dieser Abschnitt leitet drei grundlegende Handlungsfelder zur Anpassung der Kapazitätsplanung und -steuerung an die Anforderungen ab. Das erste Handlungsfeld (H1) folgt aus dem Umstand, dass Unsicherheit in den Aufgaben der PPS nicht abgebildet wird. Die Berücksichtigung der Unsicherheit in der Planung bildet das zweite Handlungsfeld (H2). Das dritte Handlungsfeld (H3) formuliert den Bedarf zur Berücksichtigung der Unsicherheit in der Steuerung.

H1 – Die PPS kann die Unsicherheit in der Auftragszeit der Aufträge bestimmen.

Das Handlungsfeld H1 beschreibt den Bedarf, im Planungssystem der PPS systematisch mit Unsicherheit umzugehen. Es resultiert aus den Anforderungen A1 und A2: A1 fordert von der Planung, Unsicherheit der Aufträge und deren Ursachen transparent darzustellen. A2 fordert von der Planung, diese Unsicherheit je nach Informationsverfügbarkeit in den Planungsgrößen des Unternehmens abzubilden. Die Planung muss die Unsicherheit der Auftragszeiten kennen und quantifizieren, um Entscheidungen treffen zu können. Das folgende Kapitel 5 stellt eine Methode vor, Planauftragszeiten zu definieren und die Unsicherheit zu messen. Die Planungsgrößen nach den verfügbaren Informationen zu klassifizieren, ermöglicht es der Planung, die zugrunde liegenden Informationsverfügbarkeit systematisch zu nutzen und Unsicherheit zu quantifizieren.

H2 – Die Kapazitätsplanung berücksichtigt die Unsicherheit in der Auftragszeit.

Das Handlungsfeld H2 resultiert aus den Anforderungen A3 und A4: A3 definiert den Anspruch an die Belastungsplanung, Unsicherheit zu berücksichtigen und A4 fordert von der Kapazitätsabstimmung, die Kapazitätsflexibilität zu bestimmen und zu berücksichtigen. Die Planung muss in der Lage sein, Aussagen zu Lieferterminen, Kapazitäten und Durchlaufzeiten zu jedem Zeitpunkt des Auftragsdurchlaufes zu tätigen. Dieses Handlungsfeld beschreibt eine Methode, die die Kapazitätsplanung um die Unsicherheit der Auftragszeiten erweitert. Dies ermöglicht

es der Planung, Unsicherheit für Zeitperioden in der Belastungsplanung abzubilden und die benötigte Kapazitätsflexibilität zu bestimmen.

H3 – Die Kapazitätssteuerung nutzt die Kapazitätsflexibilität zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen.

Die Kapazitätsflexibilität ermöglicht es der Kapazitätssteuerung, Kapazität an kurzfristige Abweichungen anzupassen. Aufgrund der fehlenden Belastungsflexibilität ist die Kapazitätssteuerung eine entscheidende Maßnahme, Plantermine einzuhalten (A5). Geringe Informationsvorlaufzeiten erfordern kurzfristig einsetzbare Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität, wie die Anpassung der Arbeitszeiten und die Nutzung der Mehrfachqualifikation.

5 Bestimmung der Unsicherheit der Auftragszeit

Dieses Kapitel widmet sich dem ersten Handlungsfeld H1 und stellt eine Methodik vor, die Unsicherheit in der Auftragszeit der Instandhaltungsaufträge zu bestimmen.

Abschnitt 5.1 definiert und beschreibt die Klassifizierung der Planungsgrößen aufgrund der vorhandenen Informationsverfügbarkeit und stellt mögliche Ausprägungen der Detailtiefe und Einflussfaktoren in der Instandhaltungsproduktion vor.

Abschnitt 5.2 überträgt die Methodik der statistischen Versuchsplanung auf die Klassifizierung der Planungsgröße. Eine empirische Datenmenge aus der Instandhaltungsproduktion ermöglicht es, die Effekte von Informationen auf die Unsicherheit zu ermitteln und die Klassifizierung der Planungsgrößen festzulegen.

Abschnitt 5.3 beschreibt die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Verteilung der Auftragszeiten. Dieser Abschnitt ermittelt eine Funktion zur korrekten Abbildung der Unsicherheit einer Planungsgröße durch analytisch ermittelbare Parameter.

Abschnitt 5.4 beschreibt die Vorgehensweise zur Kombination von Verteilungen und definiert Faltungsregeln für die Parameter der Verteilungen.

Abschnitt 5.5 stellt Chancen und Herausforderungen in der Umsetzung der Methode gegenüber und beschreibt Lösungsansätze.

5.1 Klassifizierung der Planungsgrößen

Unsicherheit verändert sich mit unterschiedlichem Stand der Informationsverfügbarkeit (Abschnitt 3.2). Die Klassifizierung ermöglicht es, gleichartige Instandhaltungsereignisse zu vergleichen [Maun02]. Eine Klasse beschreibt die abgebildete Detailtiefe und die verwendeten Einflussfaktoren, um Unsicherheit zu bestimmen:

- Die **Detailtiefe** legt fest, ob die Klasse die Auftragszeiten des ganzen Produkts oder nur Teile davon umfasst (Produktdetail) oder ob die Klasse den gesamten Prozess oder nur Teilprozesse abbildet (Arbeitssystem).
- Die **Einflussfaktoren** beschreiben die Informationen einer Klasse, um die Arbeitsinhalte und das Ausmaß der Unsicherheit zu bestimmen. Informationen zum Produkttyp, zum Kunden oder zu Leistungsumfängen verändern die Verteilung der Planungsgröße. Bei einer

Nachkalkulation beschreiben die Einflussfaktoren die Eigenschaften der zugrunde liegenden Grundgesamtheit, auf deren Basis die Verteilung der Planungsgröße ermittelt wird.

Abbildung 12 zeigt ein Beispiel für mögliche Elemente der Detailtiefe und Einflussfaktoren. Die Elemente spiegeln die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Instandhaltungsbetriebes wider, da das Unternehmen diese Informationen beschaffen und verarbeiten können muss.

Detailtiefe				
Produktdetail	Gesamtprodukt	Großbaugruppe	Baugruppe	Bauteil
Arbeitssystem	Kostenstelle	Kapazitätsgruppe	Arbeitsplatz	Arbeitsvorgang
Einflussfaktoren				
Produkt	Kein Einfluss	Typ/ Version	Konfiguration Produkt	Konfiguration Bauteil
Kunde	Kein Einfluss	Kunde	Nutzungsverhalten	Kundenentscheidung
Vertrag	Kein Einfluss	Vertragsart	Kosten Gesamtprodukt	Kosten Baugruppe/ Bauteil
Ursache	Kein Einfluss	Ursache der Instandsetzung	Leistungsparameter	Bauteilzustand
Leistungsumfang	Kein Einfluss	Leistungsumfang Produkt	Leistungsumfang Baugruppe	Leistungsumfang Bauteil

Abbildung 12 Morphologischer Kasten zur Definition der Detailtiefe und der Einflussfaktoren zur Klassifizierung.

Die *Detailtiefe* unterscheidet das Produktdetail, in diesem Beispiel das Gesamtprodukt, die Großbaugruppe, die Baugruppe und das Bauteil. Bei einfachen Produkten reicht evtl. eine Unterteilung in Gesamtprodukt und Bauteil. Das Arbeitssystem kann in Kostenstelle, Kapazitätsgruppe, Arbeitsplatz und Arbeitsvorgang unterteilt werden. Die Kostenstelle umfasst alle Bereiche, die einer organisatorischen Einheit des Unternehmens zugeordnet werden. Die

Kapazitätsgruppe (KG) adressiert einen Leistungsbereich, in dem die Mitarbeiter ähnliche Qualifizierungen aufweisen.

Die *Einflussfaktoren* unterscheiden die Kategorien Produkt, Kunde, Vertrag, Ursache und Leistungsumfang. Die Auswahl der Kategorien hat einen entscheidenden Einfluss auf die spätere Arbeit mit Klassen (siehe in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels). Auch hier gilt wiederum, dass diese Kategorien und die Elemente die Situation des Unternehmens widerspiegeln müssen. Die Einflussfaktoren beschreiben die Informationsverfügbarkeit der Kundenaufträge und sollten deshalb die Informationen mit dem vermeintlich größten Effekt auf die Bildung der Planungsgrößen reflektieren. Die Definition dieser Informationen ist in einem komplexen Umfeld nicht einfach, sodass die Einflussfaktoren mit zunehmender Erfahrung mit Unsicherheit angepasst werden sollten. Unwichtige Elemente können durch Elemente ersetzt werden, die einen deutlichen Einfluss auf die Unsicherheit zeigen. Andere Elemente müssen hingegen ersetzt werden, weil sich die Beschaffung der Information als zu aufwendig oder nicht sinnvoll herausgestellt hat. Beispielsweise kann das Unternehmen feststellen, dass der *Leistungsumfang der Baugruppe* nicht einfach verfügbar ist, der *Leistungsumfang der Großbaugruppe* hingegen von der Arbeitsvorbereitung bereitgestellt wird und ohne großen Aufwand für die Planung verwendet werden kann. In der Kategorie *Vertrag* stellt das Unternehmen fest, dass die Kostenelemente die logistischen Größen kaum beeinflussen und ersetzt diese Elemente durch Vertragselemente, die in den Verträgen mit den Kunden häufig auftreten.

Die Detailtiefe und die Einflussfaktoren ermöglichen es, Planauftragszeiten festzulegen und die Verteilung der Auftragszeiten zu definieren. Gebhard [Gebh09] beschreibt die Nutzung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Abbildung der Schwankungen einer Planungsgröße aufgrund regelmäßiger Störungen. Die Abbildung der möglichen Ausprägungen und der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit in den Verteilungen ermöglicht dem Unternehmen Entscheidungen unter Berücksichtigung von Unsicherheit [Gaul03]. Parameter beschreiben den Verlauf der Verteilungen und dienen selbst als Messgröße der Unsicherheit [Dorm13]:

- Lageparameter: Mittelwert,
- Streuungsparameter: Standardabweichung,
- Schiefenparameter: Schiefe,
- Wölbung: Diese Arbeit verwendet keinen Wölbungsparameter.

Zusammenfassend gilt: Die Klassifizierung der Planungsgrößen ist eine Methode, um Informationsverfügbarkeit und die Verteilung der Auftragszeiten im Unternehmen abzubilden. Die Detailtiefe wird auf die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Unternehmens abgestimmt. Die Einflussfaktoren spiegeln die Informationen wider, die die Verteilung der Planungsgrößen definieren. Die so entstehenden Klassen bilden durch die Verteilung der Planungsgröße und durch die Parameter der Verteilung Unsicherheit ab. Neue Erkenntnisse, Erfahrungen und Rahmenbedingungen im Unternehmen verwerfen, ersetzen oder erweitern die Detailtiefe und Einflussfaktoren der Klassen. Sie erzeugen damit neue Verteilungen und verändern die Unsicherheit der Planungsgrößen.

5.2 Auswahl der Detailtiefe und Einflussfaktoren

Für die Definition der Detailtiefe und der Einflussfaktoren besteht die Herausforderung darin, diejenigen Informationen auszuwählen, die die geringste Unsicherheit für die Planung ergeben. Die Abwägung zwischen einer Reduzierung der Unsicherheit und einer Erhöhung der Komplexität durch die Informationsbeschaffung erfordert es, die Effekte von Informationen zu quantifizieren. Je mehr Informationen in die Planung einfließen, desto größer ist die Möglichkeit, Unsicherheit zu reduzieren. Es steigen jedoch auch die Kosten der Informationsbeschaffung, die Anzahl der Klassen und der Aufwand für die Erstellung und Verwaltung. Abbildung 13 beschreibt die Zielsetzung der Klassifizierung mithilfe einer Vier-Felder-Matrix:

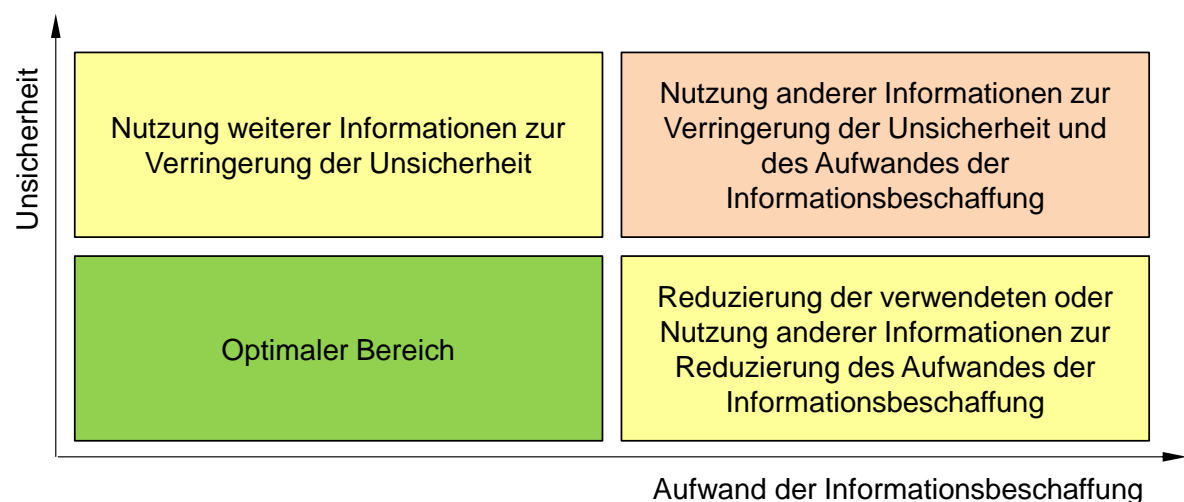


Abbildung 13 Vier-Felder-Matrix zur Beschreibung der Zielsetzung der Klassifizierung.

Die statistische Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments (DoE)) ermöglicht es, die Effekte von Faktoren auf ein Merkmal zu ermitteln [Klep13, Sieb10]. Fischer beschrieb 1935 die

Grundlagen der DoE [Fisc66]. Mittlerweile ist die DoE weltweit standardisiert [Anto14, Mont08]. Die DoE liefert eine Vorgehensweise zur Planung und Auswertung von Versuchsreihen mit dem Ziel, die Effekte und Wechselwirkungen von Faktoren auf ein Merkmal zu beschreiben. Ein Beschreibungsmodell fasst die Ergebnisse in Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte zusammen und zeigt somit übersichtlich die Einflussfaktoren, ihren Einfluss und vorhandene Wechselwirkungen auf das Merkmal [Sieb10]. Die Methode liefert nicht nur eine Möglichkeit, Effekte einfach zu ermitteln, sie berücksichtigt implizit auch die Wechselwirkungen von Effekten und weist sie aus. Die Regressionsanalyse beschreibt ebenfalls die Zusammenhänge von Einflussfaktoren auf ein Merkmal mithilfe einer Regressionsfunktion [Ecks14]. Problematisch gestalten sich dabei allerdings das Kollinearitätsproblem und die vielfältigen Kombinationen der zu prüfenden Einflussfaktoren.

Diese Arbeit nutzt die DoE nicht als Methode zur Durchführung und Auswertung von Versuchen, sondern zur systematischen Auswertung von durchgeführten Instandhaltungsereignissen. Ziel der Auswertung ist die Ermittlung von geeigneten Faktoren zur Bestimmung der Auftragszeiten mit möglichst geringer Unsicherheit. Dieser Abschnitt definiert Methoden, um geeignete Faktoren auszuwählen, die Ausprägungen der Faktoren einzustellen, die Daten vorzubereiten, die Versuche durchzuführen und die Ergebnisse zu bewerten. Die vorhandene Informationsverfügbarkeit, die Effekte der Informationen und die Maßnahmen der Informationsbeschaffung definieren passende Einflusskriterien und bilden Klassen. Folgendes Untersuchungsmodell orientiert sich an den acht Schritten der DoE nach Kleppmann [Klep13] und ermöglicht es im Folgenden, die Methode an den Anwendungsfall anzupassen und zu erweitern:

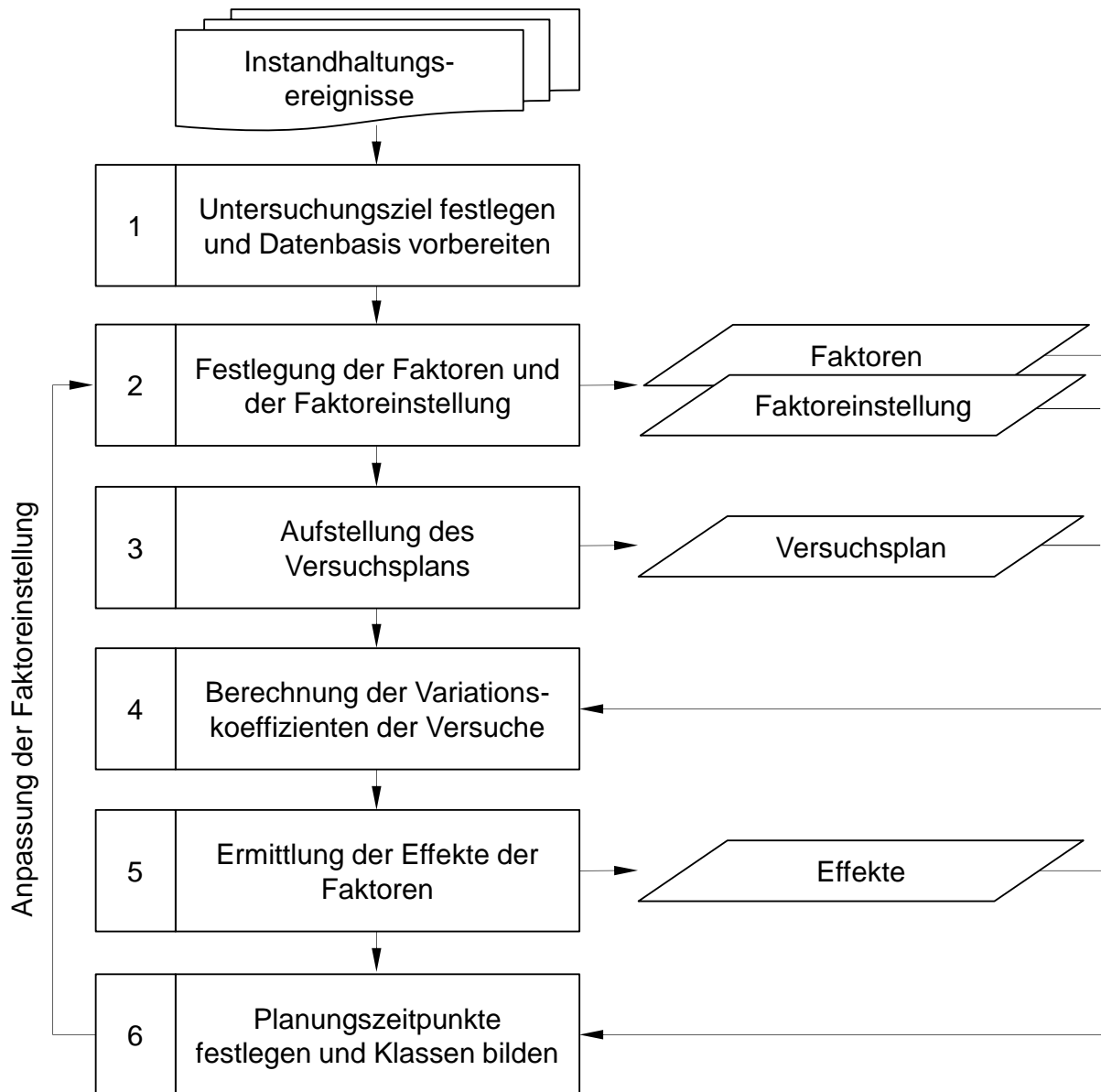


Abbildung 14 Untersuchungsmodell der DoE zur Ermittlung der Effekte von Informationen auf die Reduzierung der Unsicherheit.

Schritt 1 –Untersuchungsziel festlegen und Datenbasis vorbereiten:

Das Untersuchungsziel ist es, die Effekte von Informationen auf die Unsicherheit der Auftragszeiten zu ermitteln, um geeignete Informationen zu bestimmen. Aufträge in Planungsgruppen, die aufgrund gleichartiger Informationen gebildet werden, erhalten die gleiche Planauftragszeit. Große Schwankungen der Auftragszeit innerhalb einer Planungsgruppe sind daher gleichbedeutend mit einer hohen Abweichung der Aufträge von ihrer Planauftragszeit. Zielgröße ist demnach der Variationskoeffizient der Auftragszeit in den Planungsgruppen, die aufgrund der Faktoreinstellung gebildet werden, weil er diese Schwankungen in der Auftragszeit abbildet.

Die Auswertung abgeschlossener Instandhaltungsereignisse (IHE), deren Informationen und die daraus resultierende Unsicherheit ermöglichen es, die Effekte der Informationen auf die Unsicherheit zu bestimmen. Im Gegensatz zur gewöhnlichen Anwendung der DoE werden allerdings keine Versuche durchgeführt, sondern eine vorhandene Datenbasis unter wechselnden Rahmenbedingungen ausgewertet. Trotz dieses Sachverhalts wird im Folgenden weiterhin von Versuchsplan und Versuchen gesprochen, um den Bezug zur DoE zu unterstreichen. Im Gegensatz zu einer Regressionsanalyse bietet die DoE eine einfache Möglichkeit, Auswertungen mit unterschiedlicher Kombination der Einflussfaktoren durchzuführen.

Instandhaltungsproduzenten haben in der Regel vielfältige Daten zu IHE: Informationen von Kunden, eigene ermittelte technische Parameter, Entscheidungen während des Auftragsdurchlaufes und nicht zuletzt Informationen zu Auftragszeiten. Die Auswertung dieser Daten ermöglicht es, die verursachte Unsicherheit zu ermitteln, indem die geplanten mit den tatsächlichen Ergebnisgrößen verglichen werden. Außerdem können im Nachhinein Planungsparameter definiert werden, die zu geringerer Unsicherheit geführt hätten. Diese Erfahrung verbessert die Planung für kommende IHE, die ähnliche Eigenschaften und Rahmenbedingungen aufweisen.

Schritt 2 – Festlegung der Faktoren und der Faktoreinstellung:

Die Faktoren der Untersuchung sind die möglichen Ausprägungen der Detailtiefe und der Einflussfaktoren. Die Einstellungstabelle definiert zwei Ausprägungen eines jeden Faktors mit definiertem Abstand [Sieb10]. Diese Ausprägungen werden Stufen genannt. Die Größe dieser Stufen kann einen großen Einfluss auf den Effekt haben und muss daher sorgfältig ausgewählt werden [Klep13]. Die Faktorauswahl muss die Informationsverfügbarkeit zum Planungszeitpunkt und die Wechselwirkungen der Faktoren untereinander berücksichtigen, um das gewünschte Untersuchungsziel zu erreichen.

Die Einflussfaktoren der Instandhaltungsproduktion auf die Unsicherheit sind meist nicht quantifizierbar und nur qualitativ messbar. Die Stufeneinstellung qualitativer Faktoren unterliegt der steigenden Informationsverfügbarkeit im Auftragsdurchlauf (Abschnitt 3.2). Manche Informationen können durch erhöhten Aufwand ermittelt werden, andere hingegen sind zu gewissen Zeitpunkten unerreichbar (Abschnitt 3.2.1 und 3.3.1). Zu bestimmten Planungszeitpunkten existieren somit Einschränkungen für die Auswahl sinnvoller Stufeneinstellungen der Faktoren. Zum Zeitpunkt des Wareneingangs eines Instandhaltungsobjektes können z. B. noch keine Aus-

sagen zum Leistungsumfang der Bauteile getroffen werden. Diese Information steht zum Zeitpunkt des Wareneingangs noch nicht zur Verfügung, um die Effekte auf die Unsicherheit zu bestimmen.

Die Einflussfaktoren der Instandhaltungsproduktion haben eine Vielzahl von möglichen Ausprägungen. Eine gewählte Stufeneinstellung kann schnell das Untersuchungsziel verfehlen und mehrere neue Untersuchungen mit alternativen Stufeneinstellungen erfordern. Die hier vorgestellte Methode unterstützt durch standardisierte Vorlagen der Einstellungstabelle, des Versuchsplanes und der Ergebnisaufarbeitung die Wiederholung von Versuchen mit alternativen Einstellungen. Folgender Einstellungsplan bildet alle Gruppen der Detailtiefe und Einflussfaktoren aus Abschnitt 5.1 ab:

Faktor		Faktoreinstellung	
		-	/ +
Produktdetail	PD	Gesamtprodukt	/ Gesamtprodukt
Arbeitssystem	AS	Kapazitätsgruppe	/ Kapazitätsgruppe
Produkt	P	Version	/ Variante
Kunde	K	Region	/ Name
Vertrag	V	<i>nicht berücksichtigt</i>	/ Art
Ursache	U	initial	/ final
Leistungsumfang	L	Produkt	/ Baugruppe

Tabelle 1 Standardisierter Einstellungsplan mit Detailtiefe und Einflussfaktoren. (vgl.

[Sieb10])

Die Tabelle 1 zeigt einen exemplarischen Einstellungsplan mit allen Gruppen der Detailtiefe und Einflussfaktoren nach der Vorlage in Abschnitt 5.1. Die Faktoreinstellung des Produktdetails und des Arbeitssystems weist keinen Unterschied aus und geht somit nicht in die Effektberechnung mit ein. Diese Faktoren haben jedoch einen großen Einfluss auf die Versuchsdurchführung, weil sie definieren, wie die Datenbasis aufbereitet werden muss. In obigem Beispiel werden die Auftragszeiten der IHE auf Produkttiefe und auf Kapazitätsgruppen aufsummiert. Alternativ können die Auftragszeiten z. B. auch auf Baugruppen und Arbeitsplätzen aufsummiert werden. Unterschiedliche Faktoreinstellungen der Elemente der Detailtiefe sind möglich, erhöhen aber den Aufwand der Versuchsdurchführung, da für die individuellen Versuche die Datenbasis jeweils nach Faktorkombination aufsummiert werden muss.

Schritt 3 – Aufstellung des Versuchsplans:

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, um Versuchspläne zu erstellen. Insbesondere bei einer hohen Anzahl von Faktoren führen verschiedene Versuchspläne zu einem unterschiedlichen Durchführungsaufwand und u. U. zu einer unterschiedlichen Güte der Ergebnisse [Sieb10]. Bei Untersuchung von drei Faktoren bietet sich aufgrund der geringen Anzahl der Vollfaktorplan zur Verwendung an. Diese Methode führt alle möglichen Kombinationen der Ausprägungen im Versuchsplan auf [Sieb10]:

Versuch	Faktoren			Wechselwirkungen				VarK [%]
	P	U	L	PU	PL	UL	PUL	
1	-	-	-	+	+	+	-	v1
2	+	-	-	-	-	+	+	v2
3	-	+	-	-	+	-	+	v3
4	+	+	-	+	-	-	-	v4
5	-	-	+	+	-	-	+	v5
6	+	-	+	-	+	-	-	v6
7	-	+	+	-	-	+	-	v7
8	+	+	+	+	+	+	+	v8

Effekt	E_P	E_U	E_L	E_{PU}	E_{PL}	E_{UL}	E_{PUL}
	Haupteffekte			Wechselwirkungseffekte			

VarK: Variationskoeffizient [%]

vX: Variationskoeffizient für Versuch X [%]

E_P Effekt für Faktor oder Faktorkombination

Tabelle 2 Vollfaktorplan mit drei Faktoren (P – Produkt, U – Ursache und L – Leistungsumfang), 8 Versuchen und dem Variationskoeffizienten *VarK* als Versuchsmerkmal.

Der Vollfaktorplan in Tabelle 2 führt in den Zeilen die Faktoreinstellung für acht Versuche auf. Die Einstellung „+“ symbolisiert die detaillierte Faktoreinstellung nach der Einstellungstabelle in Tabelle 1 und die Einstellung „-“ die grobe Ausprägung. Die letzte Spalte zeigt den resultierenden Variationskoeffizienten *VarK* der Versuche an. Die Zeile *Effekt* berechnet die Effekte der Faktoren und unterscheidet in Haupt- und Wechselwirkungseffekte. Haupteffekte beschreiben die Effekte der Faktoren im Einstellungsplan auf das Versuchsmerkmal. Wechselwirkungseffekte beschreiben die Effekte der Kombination der Faktoren auf das Versuchsmerkmal. Folgender Rechenweg liefert die Effekte der Faktoren in der Zeile *Effekt* [Klep13]:

$$E_X = \frac{2}{N} \cdot \left(\sum v_{\text{pos}} - \sum v_{\text{neg}} \right) \quad (5.1)$$

- E_X : Effekt des Faktors X
 N : Anzahl Versuche
 v_{pos} : Merkmalsausprägung bei positiver Faktorausprägung
 v_{neg} : Merkmalsausprägung bei negativer Faktorausprägung

Mit steigender Anzahl der Faktoren im Einstellungsplan steigt der Durchführungsaufwand des Vollfaktorplanes deutlich an [Sieb10]. Bei vier Faktoren enthält der Plan 16 und bei fünf Faktoren bereits 32 Versuche, um alle Faktorkombinationen zu berücksichtigen. Die teilfaktoriel- len Versuchspläne ermöglichen es, die Versuchsanzahl durch Vermengung der Effekte zu re- duzieren [Klep13]. Exemplarisch erläutert die Erstellung eines Versuchsplanes mit fünf Faktoren die Methode: Ein Vollfaktorplan mit fünf Faktoren auf zwei Stufen ergibt 32 Versu- che. Der teilfaktoriel- le Versuchsplan (im Folgenden Teilfaktorplan [Sieb10]) ermöglicht die Durchführung mit 16 Versuchen. Grundlage dafür ist der Versuchsplan mit $(5-1) = 4$ Faktoren (A, B, C, D) und 16 Versuchen. Mit der Annahme, dass der Vierfachwechselwirkungseffekt ABCD vernachlässigbar gering ist, ersetzt der Faktor E diesen Effekt im Versuchsplan und erzeugt somit einen Plan mit fünf Faktoren. Die Konsequenz ist allerdings, dass folgende Ef- fekte miteinander vermengt sind [Klep13]:

A + BCDE	B + ACDE	C + ABDE	D + ABCE
E + ABCD	AB + CDE	AC + BDE	AD + BCE
AE + BCD	BC + ADE	BD + ACE	BE + ACD
CD + ABE	CE + ABD	DE + ABC	

Abbildung 15 Vermengung der Effekte bei einem Teilfaktorplan mit 5 Faktoren [Klep13].

Unter der Annahme, dass die Vierfach- und Dreifachwechselwirkungen vernachlässigbar klein sind, gefährdet diese Vereinfachung nicht die Aussagekraft der Ergebnisse. Diese komplexen Wechselwirkungen der Informationen sind für die Instandhaltungsproduktion eher auszuschlie- ßen. Tabelle 3 führt den resultierenden Teilfaktorplan auf:

Vers.	Faktoren					Wechselwirkungen										VarK [%]
	P	K	V	U	L	PK	PV	KV	UL	PU	KU	VL	VU	KL	PL	
1	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	v1
2	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	+	-	v2
3	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	v3
4	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	v4
5	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	v5
6	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	v6
7	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	v7
8	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	v8
9	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	v9
10	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	v10
11	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	v11
12	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	v12
13	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	v13
14	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	v14
15	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	v15
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	v16

Effekt	E _P	E _K	E _V	E _U	E _L	E _{PK}	E _{PV}	E _{KV}	E _{UL}	E _{PU}	E _{KU}	E _{VL}	E _{VU}	E _{KL}	E _{PL}
	Haupteffekte					Wechselwirkungseffekte									

P: Produkt K: Kunde V: Vertrag U: Ursache L: Leistungsumfang
E: Effekt v: Versuch VarK: Variationskoeffizient

Tabelle 3 Teilfaktorieller Versuchsplan mit fünf Faktoren (P, K, V, U, L) auf zwei Stufen mit Haupteffekten und Zweifachwechselwirkungseffekten.

Diese Arbeit geht nicht auf weitere Methoden zur Erstellung von Versuchsplänen ein, da die vorgestellten Versuchspläne mit drei und fünf Faktoren für die Zielsetzung ausreichen. Kleppmann [Klep13] und Siebertz [Sieb10] erläutern die Erstellung und Handhabung von Versuchsplänen ausführlich.

Schritt 4 – Berechnung der Variationskoeffizienten der Versuche:

Die Einstellungstabelle und der Versuchsplan ermöglichen die Durchführung der Versuche. Je nach Größe der Datenbasis und Komplexität der Einstellungstabelle ist der Durchführungsaufwand sehr groß und kann ohne geeignete Programme nicht bewältigt werden. Die Durchführung der Versuche besteht aus drei Schritten:

- 1) Aggregation der Rohdaten auf die Detailtiefe und Zuordnung der Faktoreinstellungen zu den Datensätzen: Die Auftragszeiten müssen nach gegebener Einstellungstabelle (Tabelle

1) auf das Produktdetail und das Arbeitssystem aufsummiert werden. Die Faktorausprägungen der Einstellungstabelle geben den Detaillierungsgrad der zu nutzenden Informationen an. Die Informationen ergänzen jeden Datensatz im geforderten Detaillierungsgrad. Ein Instandhaltungsereignis weist z. B. für den Faktor Produkt die grobe Faktorausprägung Produktversion und die detaillierte Faktorausprägung Produktvariante auf. Tabelle 4 zeigt den Tabellenaufbau der Datenbasis und führt unter der Spalte Bemerkungen eine mögliche Faktoreinstellung auf:

Feldname	Bemerkung
Auftragsnummer	Instandhaltungsereignis
Produktdetail	Gesamtprodukt
Arbeitssystem	Kapazitätsgruppe
Produkt-	Version
Produkt+	Variante
Kunde-	Region
Kunde+	Name
Vertrag-	<i>nicht berücksichtigt</i>
Vertrag+	Art
Ursache-	initial
Ursache+	final
Leistungsumfang-	Produkt
Leistungsumfang+	Baugruppe
Auftragszeit	Auftragzeit in [h]

Tabelle 4 Standardisierte Datenbasis der Versuche.

- 2) Erstellung der Klassen nach Versuchsplan: Jeder Versuch definiert die Einflussfaktoren, die zur Klassifizierung genutzt werden sollen. Die Datensätze mit gleichen Informationen bilden die Klassen und ermöglichen die Berechnung des Variationskoeffizienten der Auftragszeiten innerhalb der Klassen.
- 3) Berechnung des Variationskoeffizienten: Der Mittelwert der Variationskoeffizienten der Klassen beschreibt die Unsicherheit der gewählten Faktoreinstellung eines Versuchs.

Schritt 5 – Ermittlung der Effekte der Faktoreinstellung:

Tabelle 5 zeigt das Beispiel eines Beschreibungsmodells zur Darstellung der Ergebnisse einer Versuchsdurchführung:

Versuch	Faktoren			Wechselwirkungen				VarK [%]
	P	U	L	PU	PL	UL	PUL	
1	-	-	-	+	+	+	-	93%
2	+	-	-	-	-	+	+	80%
3	-	+	-	-	+	-	+	80%
4	+	+	-	+	-	-	-	71%
5	-	-	+	+	-	-	+	73%
6	+	-	+	-	+	-	-	66%
7	-	+	+	-	-	+	-	73%
8	+	+	+	+	+	+	+	66%
Effekt	-9%	-5%	-11%	1%	1%	5%	-1%	
	Haupteffekte			Wechselwirkungseffekte				

P: Produkt U: Ursache L: Leistungsumfang
VarK: Variationskoeffizient

Tabelle 5 Auswertungsbeispiel einer Versuchsreihe mit drei Faktoren.

Der Effekt des Faktors *P* (Produkt) beträgt -9 %, d. h., der Faktor reduziert den Variationskoeffizienten und damit die Unsicherheit um 9 %. Der Wechselwirkungseffekt *UL* beträgt 5 %, d. h., die Kombination der beiden Faktoren Ursache und Leistungsumfang erhöht den Variationskoeffizienten um 5 %.

Die Korrelation und die stochastische Abhängigkeit der Zufallsvariablen beeinflusst die Höhe der Wechselwirkungseffekte. Besteht eine positive oder negative Korrelation zwischen den Haupteffekten ist der Wechselwirkungseffekt positiv. Ein Schaden am Triebwerk, der von einem fremden Objekt verursacht wurde, geht nahezu immer mit einer Komplettzerlegung des Triebwerks einher. Beide Informationen haben einen hohen Effekt auf die Definition der Auftragszeiten der Instandhaltung. Bei Nutzung beider Informationen gleichzeitig, hebt der Wechselwirkungseffekt einen Haupteffekt auf. Hohe gegenläufige Wechselwirkungseffekte können Informationsbeschaffung verbessern, indem redundante Informationen aufgezeigt und so vermieden werden können. Bei einem Schaden durch ein fremdes Objekt kann also der Leistungsumfang ohne zusätzliche Informationsbeschaffung gleich definiert werden.

Die Wechselwirkungseffekte zweier voneinander abhängigen Faktoren können negativ sein, wenn keine oder eine geringe Korrelation zwischen den Faktoren besteht. Zwei Faktoren sind voneinander abhängig, wenn das Eintreten des einen Ereignisses von dem Eintreten des anderen Ereignisses beeinflusst wird. Informationen zum Produkt und zum Leistungsumfang ermöglichen eine bessere Definition der Auftragszeiten. Die Kombination beider Information liefert

weitere Informationen: Der Leistungsumfang „Reparatur der Verdichters“ kann für ein einzelnes Produkt deutlich besser definiert werden, als generell über alle Produkte. Fallstudie 2 zeigt diese Abhängigkeit in Tabelle 15b auf Seite 113: Der Faktor P (Produkt) reduziert die Unsicherheit um 3,4 %, der Faktor L (Leistungsumfang) um 7,0 % und die Kombination der Faktoren PL um weitere 1,2 %. Gleiche Leistungsumfänge unterscheiden sich also für unterschiedliche Produkte: Eine Inspektion einer Turbine (Leistungsumfang) erzeugt z. B. bei Produkt A und bei Produkt B immer deutlich unterschiedliche Aufwände.

Ein Signifikanztest bewertet die Ergebnisse der Versuchsdurchführung: Ein Effekt ist signifikant, wenn er größer als seine Zufallsstreuung ist [Klep13]. Die Signifikanz kann mit unterschiedlichen Vertrauensbereichen (VI: Vertrauensintervall) geprüft werden. Die Vertrauensbereiche geben die Wahrscheinlichkeit bzw. das Signifikanzniveau an, dass der ermittelte Effekt nur zufällig auftritt, wenn kein Einfluss auf das Ergebnis besteht [Klep13]:

VI	Wahrscheinlichkeit	Symbol	Bedeutung
-	größer 5%	-	Kein Hinweis auf Unterschied
VI ₉₅	kleiner 5% und größer 1%	*	Indifferent, möglichst mehr Daten
VI ₉₉	kleiner 1% und größer 0,1%	**	Signifikanter Unterschied
VI _{99,9}	kleiner 0,1%	***	Hochsignifikanter Unterschied

VI: Vertrauensintervall

Tabelle 6 Bewertung der Signifikanz der Ergebnisse [Klep13].

Die Zufallsstreuung der Standardabweichung der Versuche kann nach Kleppmann [Klep13] durch das Pooling kleinerer Effekte ermittelt werden. Da der Variationskoeffizient ebenso wie die Standardabweichung ein Abweichungsparameter ist, wird diese Vorgehensweise hier angewendet [Klep13]:

$$VI_{X\%} : E - t_{X\%;N} \cdot s_{\bar{d}} \leq \delta \leq E + t_{X\%;N} \cdot s_{\bar{d}} \quad (5.2)$$

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{zUF}}} * \sum (E_{\text{zUF}})^2} \quad (5.3)$$

- $VI_{X\%}$: Vertrauensintervall bei einem Signifikanzniveau von X %
 E : Effekt
 $t_{X\%,N}$: Wert der t-Verteilung mit Signifikanzniveau X % und Anzahl Stichproben N
 $s_{\bar{d}}$: Zufallsstreuung des Effekts (durch Pooling aus zufälligen Effekten ermittelt)
 δ : wahrer Effekt
 n_{zuf} : Anzahl der Zufallseffekte
 E_{zuf} : Zufallseffekte

Die grafische Abbildung der Effekte erleichtert die Unterscheidung der wahren und der zufälligen Effekte:

Fallstudie 3 - FPG			
Faktor	Effekt	grafische Abbildung	Sign.
K	-16,5%		***
P	-10,7%		***
U	-7,5%		***
L	-5,9%		***
KL	-2,6%		***
PL	-0,8%	Zufällige Effekte	-
KU	-0,7%	auf einer	-
V	-0,3%	geraden Linie	-
PU	0,0%		-
KV	0,0%		-
VL	0,3%		-
VU	0,7%		-
PV	0,7%		-
UL	7,5%		***
PK	8,7%		***

Sign.: Signifikanzbewertung VarK: Variationskoeffizient
 P: Produkt K: Kunde V: Vertrag
 U: Ursache L: Leistungsumfang

Abbildung 16 Grafische Abbildung zur Ermittlung der wahren und zufälligen Effekte. Daten aus der *Fallstudie 3 – FPG* in Abschnitt 7.2.1.

Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der Fallstudie 3 aus Abschnitt 7.2.1. Demnach reduzieren z. B. der Faktor P (Produkt) die Unsicherheit um 16,5 % und der Faktor V (Vertrag) um 0,3 %. Die Faktoren K (Kunde), P (Produkt) und U (Ursache) weisen die höchsten Effekte auf und bieten sich als Klassifizierungskriterien an. Eine detaillierte Interpretation und Verarbeitung

der Ergebnisse dieser Fallstudie findet in Abschnitt 7.2.1 statt. Um die zufälligen Effekte zu ermitteln, werden die Effekte aufsteigend sortiert. Die grafische Abbildung zeigt Effekte, die geringe Werte aufweisen und durch eine gerade Linie verbunden werden können. Diese Effekte können dadurch als zufällige Effekte identifiziert werden: PL, KU, V, PU, KV, VL, VU, PV. Die Formel (5.3) berechnet die Zufallsstreuung:

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{zuf}}} * \sum (E_{\text{zuf}})^2} = 0,6 \% ;$$

Formel (5.2) berechnet die Vertrauensintervalle und bewertet damit die Signifikanz der Effekte in Abbildung 16:

$$VI_{95}: E - t_{95\%;5000} \cdot s_{\bar{d}} \leq \delta \leq E + t_{95\%;5000} \cdot s_{\bar{d}}; \Rightarrow VI_{95} : E - 1,18\% \leq \delta \leq E + 1,18\%;$$

$$VI_{99}: E - t_{99\%;5000} \cdot s_{\bar{d}} \leq \delta \leq E + t_{99\%;5000} \cdot s_{\bar{d}}; \Rightarrow VI_{95} : E - 1,55\% \leq \delta \leq E + 1,55\%;$$

$$VI_{95}: E - t_{95\%;5000} \cdot s_{\bar{d}} \leq \delta \leq E + t_{95\%;5000} \cdot s_{\bar{d}}; \Rightarrow VI_{95} : E - 1,97\% \leq \delta \leq E + 1,97\%;$$

Schritt 6 – Planungszeitpunkte festlegen und Klassen bilden:

Die Effekte der Informationen unterstützen die PPS bei der Klassifizierung der Planungsgröße [Kopp15]. Neben den Effekten beeinflussen auch die Verfügbarkeit und der Aufwand zur Ermittlung der Informationen zum Planungszeitpunkt die Klassifizierung. Detaillierte Einflussfaktoren können u. U. in frühen Planungsperioden nicht genutzt werden, da die Informationen noch nicht zur Verfügung stehen [Scho03]. Die Auswahl der Planungsperiode und die Auswahl der Detailtiefe und Einflussfaktoren müssen gemeinsam vorgenommen werden. Es existieren zwei Herangehensweisen zur Abstimmung der Planungsperioden mit der Klassifizierung:

- 1) Vordefinierte Planungszeitpunkte beeinflussen die Klassifizierung: Die zum definierten Planungszeitpunkt verfügbaren oder akquirierbaren Informationen beeinflussen die Klassifizierung und die Auswahl der Detailtiefe und Einflussfaktoren.
- 2) Die Effektberechnung beeinflusst die Definition der Planungszeitpunkte: Die Übersicht der Effekte von Informationen bestimmt die Ermittlung geeigneter Planungszeitpunkte. Planungszeitpunkte können auf den Zeitpunkt verschoben werden, zu dem geeignete Informationen vorliegen oder beschafft werden können. Somit steht der Planung ein Werkzeug zur Ermittlung eines Planungszeitpunktes zur Verfügung, der einerseits so früh wie möglich und andererseits so spät wie nötig liegt [Scho03]. Frühe Planungszeitpunkte erzeugen Vorlauf zur Vorbereitung in der Fertigung, während spätere Zeitpunkte die Nutzung besserer

Informationen ermöglichen. Abschnitt 3.2.2 zeigt anhand der Ergebnisse einer Studie die konkrete Definition zweier Planungszeitpunkte auf.

Beide Vorgehensweisen führen zur Klassifizierung für alle definierten oder identifizierten Planungszeitpunkte. Die Verteilung der Planungsgrößen kann daraufhin durch Nachkalkulation, durch Expertenschätzung oder durch Analogiebildung ermittelt werden (vgl. Abschnitt 5.3). Diese Arbeit nutzt einen abgewandelten Algorithmus der Versuchsdurchführung zur Erstellung der Klassen (Seite 141 im Anhang zeigt den Algorithmus zur automatischen Erstellung der Klassen in R). Die automatisierte Erstellung der Klassen birgt das Risiko von Fehlern und Unplausibilitäten und muss immer von Experten überprüft werden, bevor die Klassen eingesetzt werden.

Die Nutzung der definierten Klassen erfordert eine an die verwendeten Informationen angepasste Informationsbeschaffung. Maßnahmen der Informationsbeschaffung verursachen Kosten, wobei Informationen mit hohen Effekten u. U. auch hohe Kosten der Informationsbeschaffung zur Folge haben. Der Abgleich der Kosten der Informationsbeschaffung mit den Effekten der Informationen führt evtl. zu einer Veränderung der Klassen. Neben den Kosten können auch veränderte Rahmenbedingungen eine neue Klassifizierung der Planungsgrößen erfordern. Insbesondere die Entwicklung der Instandhaltungsgüter im Lebenszyklus (siehe Problemstellung in Abschnitt 1.1) verändert die zur Verfügung stehenden Informationen und die Effekte der Informationen auf die Ausprägung der Auftragszeiten. Ein einfaches Beispiel für Maschinen zeigt diesen Zusammenhang: Für Produkte zu Beginn der Produktlebenszyklus ist leichter Ölverlust ein Anzeichen für Defekte und verursacht Leistungsverlust. Für ältere Produkte ist leichter Ölverlust eine Begleiterscheinung der normalen Abnutzung und wird im Rahmen der Überholung ohne weitere Analysen beseitigt.

5.3 Ermittlung der Verteilung der Auftragszeit

Die vorgenommene Klassifizierung im vorangehenden Abschnitt erzeugt Klassen und bildet die Grundlage, um Verteilungen der Auftragszeit für die definierten Klassen zu erzeugen. Die Verteilung der Auftragszeit ermöglicht es, Unsicherheit in der Planung und Steuerung zu verarbeiten und für die Kapazitätsplanung zu verwenden. Konfidenzintervalle beschreiben das Intervall und die Eintrittswahrscheinlichkeit von Auftragszeiten. Zudem kann die Unsicherheit der Auftragszeiten gleichzeitig stattfindender Ereignisse verarbeitet und eine resultierende Verteilung erzeugt werden. Diese resultierende Verteilung ermöglicht es der Kapazitätsplanung, auftretende Belastungen und ihre Unsicherheit auf die Kapazitätsgruppen zu bewerten.

Die Verteilung kann unterschiedlich ermittelt werden [Bamb02]:

- durch die Nachkalkulation empirischer Daten,
- durch die Einschätzung von Experten aus Planung und Technik,
- durch Analogiebildung aus vorhandenen Klassen mit ähnlichen Einflussfaktoren.

Die statistischen Größen Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe erlauben eine Abbildung der Unsicherheit der Auftragszeit. Die PPS benötigt jedoch die zugrunde liegende Verteilung, um die Planungsgröße in den Prozessen der Planung und Steuerung zu verarbeiten. Die Statistik bietet durch die Methoden der Verteilungsanalyse die Möglichkeit, statistische Merkmale zu beschreiben. Die Verteilungsfunktion und die Dichtefunktion ermöglichen die grafische Analyse der Häufigkeiten eines Merkmals über dem Wertebereich [Ecks06, Stel07]. Die Beschreibung der Verteilung als Funktion erlaubt zudem die Kombination mehrerer Merkmale miteinander (vgl. Faltung von Verteilungen in Abschnitt 5.4).

Die Verteilungsanalyse bietet ein Werkzeug zur Quantifizierung der Auftragszeit in den Klassen. In dieser Arbeit werden folgende Begriffe der deskriptiven Statistik verwendet:

- Dichtefunktion (kurz PDF): Dichtefunktionen beschreiben die Verteilung einer Variable [Tout08]. Die Dichtefunktion ermöglicht die Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten für Ausprägungen einer stetig verteilten Zufallsvariable [Stel07].
- Empirische Dichtefunktion (EPDF): Die empirische Dichtefunktion ist eine aus empirischen Daten ermittelte Dichtefunktion. Im Gegensatz dazu können Dichtefunktionen auch konstruiert oder theoretisch begründet werden [Ecks06].
- Parametertypen zur Beschreibung einer Verteilung [Bene12]:
 - Lageparameter: Mittelwert,
 - Streuungsparameter: Standardabweichung,
 - Schiefe: Schiefeparameter.

Die Wissenschaft definiert spezielle Verteilungen für unterschiedliche Einsatzgebiete. Die Weibull-Verteilung beschreibt z. B. die Lebensdauer und Ausfallhäufigkeit von elektronischen Bauelementen oder Werkstoffen und wird auch häufig zur Beschreibung von Windgeschwindigkeiten herangezogen [Segu00, Vogt69]. Die Normalverteilung beschreibt z. B. biologische und physiologische Merkmale [Schä10]. McLaughlin [McLa01] erstellt eine umfangreiche

Auflistung von speziellen Verteilungen und erläutert die Parameter. Feitelson [Feit08] nennt für viele spezielle Verteilungen konkrete Anwendungsgebiete.

Die folgenden Abschnitte widmen sich der Aufgabe, eine Verteilung für die Arbeitsbelastung in der Instandhaltungsproduktion zu finden und zu beschreiben. Statistiker bezeichnen diese Vorgehensweise mit dem Begriff „Fitting“ [Ricc05]. Es bestehen drei Optionen des Fittings [Feit08, Ricc05]: Auswahl einer passenden speziellen Verteilung, Transformation einer speziellen Verteilung oder Beschreibung einer eigenen Verteilung.

Abschnitt 5.3.1 beschreibt die Eigenschaften der Planungsgrößen in der Instandhaltungsproduktion als Anforderungen an die gesuchte Verteilung. Diese Eigenschaften schließen einen Großteil der speziellen Verteilungen aus und identifizieren Verteilungen zur weiteren Prüfung und Anpassung.

Abschnitt 5.3.2 passt die identifizierten Verteilungen an empirische Daten der Instandhaltungsproduktion an. Ein grafischer Vergleich bewertet die Ergebnisse der Anpassung.

Abschnitt 5.3.3 beschreibt die Transformation der Normalverteilung in die Unsicherheitsverteilungsfunktion (UVF), um ein besseres Anpassungsergebnis zu erzeugen. Abschließend wird die Parametrisierung der UVF beschrieben.

5.3.1 Anforderung an die Verteilung und Einschränkung des Untersuchungsbereichs

Die gesuchte Verteilung muss die Eigenschaften der Planungsgrößen in der Instandhaltungsproduktion abbilden. Für die Arbeitsaufwände von IHE gilt:

- Beschreibung auf positive Mittelwerte ohne Werteeinschränkung,
- sowohl eine links-, als auch eine rechtsschiefe Verteilung ist möglich,
- große und kleine Standardabweichungen der Daten treten auf.

Außerdem muss die Verteilung der Zielsetzung der Arbeit gerecht werden und im Hinblick auf den Einsatz im Unternehmen eine praktikable Lösung bieten:

- Analytische Bestimmung der Parameter: Parameter beschreiben Verteilungen und können unterschiedlich ermittelt werden. Die Parameter vieler spezieller Verteilungen können nur näherungsweise bestimmt werden. Eine analytische Bestimmung der Parameter

ermöglicht es dem Unternehmen, die Parameter aufgrund der verfügbaren Informationen zu berechnen.

- **Interpretierbarkeit der Parameter:** Die Parameter ermöglichen es der Planung nicht nur, die Verteilung der Auftragszeit zu beschreiben. Sie dienen auch dem Vergleich der Verteilungen untereinander, der Plausibilisierung der Ergebnisse und der Kommunikation der entstehenden Klassen. Abstrakte Parameter erschweren diese Aufgaben.

Viele Verteilungen erfüllen diese Anforderungen nicht und werden vorab ausgeschlossen. Um zu ermitteln, welche Verteilungen für die Prüfung infrage kommen, gibt es unterschiedliche Herangehensweisen [Feit08, Ricc05]:

- Die Art der Daten: Verteilungen mit Einschränkungen im positiven Wertebereich (z. B. Beta-Verteilung), Verteilungen ohne Schiefenparameter (z. B. Laplace-Verteilung) oder Verteilungen ohne unabhängigen Abweichungsparameter (z. B. Erlang-Verteilung) erfüllen grundsätzlich nicht die Anforderungen.
- Nach grafischer Ähnlichkeit: Unsichere Planungsgrößen in der Instandhaltungsproduktion haben einen erwarteten Wert und eine Abweichung davon. Die Verteilung muss dementsprechend genau ein Maximum aufweisen. Die Exponential-, Pareto- oder geometrische Verteilung weisen z. B. kein eindeutiges Maximum auf. Die Funktionsverläufe der Uniform-, Laplace- oder Dreiecksverteilung weisen ebenfalls Eigenschaften auf, die sie von einer weiteren Betrachtung ausschließen.
- Durch Berechnung eines Koeffizienten: Ein von Lage-, Streuungs-, Schiefe- und Wölbungsparametern abhängiger Koeffizient beschreibt die empirischen Daten und dient zur Auswahl einer passenden Verteilung (vgl. z. B. Pearson-Koeffizient in [Ricc05]).

Diese Arbeit wählt zu untersuchende Verteilungen nach der Art der Daten und nach grafischer Ähnlichkeit aus. Folgende Aufzählung beschreibt alle Verteilungen, die auf ihre Eignung untersucht wurden [McLa01]:

- Die Normalverteilung (Norm) hat zwar keine Möglichkeit, Schiefe aus den empirischen Daten abzubilden, sie ergänzt die Ergebnisse aber als einfache Verteilung mit analytisch ermittelbaren Parametern.
- Die logarithmische Normalverteilung (lNorm) kann rechtsschiefe Verteilungen abbilden, hat jedoch keinen unabhängigen Schiefeparameter.

- Die schiefe Normalverteilung (sNorm) ergänzt die Normalverteilung um einen Schiefeparameter.
- Die logistische Verteilung (Log) hat drei unabhängige Parameter zur Anpassung der Verteilung an Lage, Streuung und Schiefe. Diese können jedoch nicht analytisch ermittelt werden.
- Die Gamma-Verteilung (Gam) nutzt wie die logistische Verteilung drei unabhängige, nicht analytisch bestimmbare Parameter.
- Die Weibull-Verteilung (Wei) nutzt wie die logistische Verteilung oder die Gamma-Verteilung drei unabhängige, nicht analytisch bestimmbare Parameter.
- Die Fischer-Verteilung (Fis) passt durch zwei unabhängige Parameter die Lage, Streuung und Schiefe der Verteilung an.

5.3.2 Schätzung der Parameter und Bewertung des Anpassungsergebnisses

Die ausgewählten Verteilungen weisen unterschiedlich komplexe Dichtefunktionen und verschiedenartige Parameter auf. Die Parameter ermöglichen jeweils die Anpassung des Verlaufs der Funktion. Dieser Abschnitt passt die ausgewählten Verteilungen an empirische Stichproben aus der Instandhaltungsproduktion an. Verschiedenartige Stichprobenmengen testen die Anpassungsmöglichkeiten der Verteilungen unter wechselnden Rahmenbedingungen. Die Anpassung einer Verteilung an eine empirische Datenbasis ist je nach Anzahl der Parameter und gewünschter Güte der Verteilung komplex. Die Abschätzung der Parameter für Schiefe und Wölbung fordert dabei eine große empirische Datenbasis [Shor95]. Einige Verteilungen (z. B. Normalverteilung) erlauben die analytische Ermittlung der Parameter wie Mittelwert als Lageparameter oder Standardabweichung als Streuungsparameter [McLa01]. Andere Verteilungen (z. B. Weibull-Verteilung) erfordern hingegen ein Schätzverfahren zur Anpassung der Verteilung an die empirischen Daten. Drei Möglichkeiten zur Abschätzung der Parameter sind möglich [Ricc05]:

- analytisch (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe),
- Momente,
- Maximum Likelihood.

Das Statistikprogramm R liefert für die Anpassung der Verteilungen ein vordefiniertes Paket (vgl. R-Paketdokumentation in [Deli14]). Dieses Paket bietet für viele Verteilungen einen Algorithmus zur Schätzung der Parameter mit der Maximum-Likelihood-Methode und liefert die

Parameter der angepassten Dichtefunktion. Sieben Verteilungen und 17 empirische Stichprobenmengen ergeben 119 Anpassungsvorgänge. Aufgrund dieser Vielzahl und der oben angesprochenen Komplexität durch Schätzverfahren nutzt diese Arbeit einen Automatisierungsalgorithmus. Ein Programmcode in R passt alle zu untersuchenden Verteilungen an die Stichprobenmengen an und erzeugt die grafische Gegenüberstellung der angepassten und der empirischen Dichtefunktion (genutzter Programmcode im Anhang auf Seite 135). Die Ergebnisse werden anhand der grafischen Ähnlichkeit der empirischen und der angepassten Verteilung bewertet.

Auswahl repräsentativer Stichproben

Verschiedenartige Eigenschaften der Stichprobenmengen spiegeln die Vielfalt der in der Instandhaltungsproduktion auftretenden Fälle wider:

- großer und kleiner Lageparameter,
- großer und kleiner Streuungsparameter,
- symmetrische, links- und rechtsschiefe Verteilungen.

Die ausgewählten Stichproben bilden Arbeitsaufwände realer Aufträge der Instandhaltung von Flugzeugtriebwerken und Industriegasturbinen ab. Tabelle 7 führt alle Stichprobenmengen mit der Anzahl der Elemente auf:

Stichprobenmenge					Qualitative Bewertung		
Nr Klasse	\bar{x}	σ	s	N	\bar{x}	σ	s
lfd -	[h]	[h]	-	[Stk]	-	-	-
1 PR03_WS26_xxxx	639	296	1,0	11	Groß	Groß	rechts
2 PR13_WS05_xxxx	2131	1070	-0,1	19	Groß	Groß	norm
3 PR02_WS23_xxxx	1679	775	-0,6	26	Groß	Groß	links
4 PR01_WS01_xxxx	1779	437	-1,3	65	Groß	Groß	links
5 PR24_WS01_xxxx	937	130	0,5	26	Groß	Klein	rechts
6 PR01_WS01_xxxx	1887	477	-0,1	52	Groß	Klein	norm
7 PR01_WS03_xxxx	1712	491	-2,0	96	Groß	Klein	links
8 PR01_WS02_xxxx	1797	160	0,6	37	Groß	Klein	links
9 PR22_WS03_KGRP	4	3	2,1	167	Klein	Groß	rechts
10 PR21_WS01_KGRP	30	11	-0,1	97	Klein	Groß	norm
11 PR24_WS01_KGMF	135	64	-0,8	26	Klein	Groß	links
12 PR11_WS05_KGME	122	56	1,2	47	Klein	Klein	rechts
13 PR11_WS01_KGBF	186	52	0,1	52	Klein	Klein	norm
14 PR21_WS01_KGUU	22	7	-0,6	102	Klein	Klein	links
15 PR01_WS02_KGXX	34	10	0,8	37	Klein	Klein	rechts
16 PR01_WS02_KGHH	19	5	0,0	37	Klein	Klein	norm
17 PR01_WS01_KGXX	42	13	-0,8	65	Klein	Klein	links

Tabelle 7 Übersicht der ausgewählten Stichproben zur Anpassung der Verteilungen.

Die Stichproben sind nach den in Abschnitt 5.2 definierten Klassen gruppiert. Die Namenskonvention in der Tabelle 7 spiegelt diese Klassifizierung wider und ermöglicht es somit, einen Überblick über die verwendeten Informationen der Klasse zu erhalten. Folgendes Beispiel erläutert die Namenskonvention am Beispiel der 11ten Stichprobe aus Tabelle 7:

Beispiel	Namenskonvention	Beschreibung
PR24	Produkttyp	PR24 entspricht einem Triebwerk für kleine Hubschrauber. Kunden sind meist Privatpersonen.
WS01	Leistungsumfang Produkt	WS01 entspricht einem Leistungsumfang mit kompletter Zerlegung des Instandhaltungsobjektes.
KGMF	Kapazitätsgruppe	KGMF entspricht der Kapazitätsgruppe zur Montage des Triebwerks.

Tabelle 8 Benennung der Stichprobenmengen nach verwendeten Informationen der Klassifizierung (Abschnitt 5.2).

In Tabelle 7 zeigen die ersten Klassen anstelle der Kapazitätsgruppe die Bezeichnung „xxxx“. Diese Klassen summieren die Arbeitsumfänge aller verwendeten Kapazitätsgruppen auf und weisen deshalb einen höheren Arbeitsumfang und im Vergleich zu den anderen Klassen auch eine geringe Unsicherheit auf.

Die statistischen Größen Mittelwert (\bar{x}), Standardabweichung (σ) und Schiefe (s) vermitteln einen Eindruck zu den Eigenschaften der Stichprobe. Diese Werte haben keinen Einfluss auf die Anpassung und dienen nur zur Orientierung. Das Anpassungsverfahren nutzt die zugrunde liegenden einzelnen Elemente der Stichprobe. Die Stichproben 1 bis 8 unterscheiden nicht nach Kapazitätsgruppen und zeigen die gesamte Auftragszeit für ein Instandsetzungsereignis. Die Stichproben 9 bis 17 unterscheiden die Auftragszeiten nach Kapazitätsgruppen.

Verarbeitung der Daten in R und Bewertung der Ergebnisse

Der Programmcode im Anhang auf Seite 135 zeigt die Vorgehensweise in R bei der Anpassung der ausgewählten Verteilungen an die Stichproben. Das Programm ermittelt für jede Verteilung zunächst die Parameter der Verteilung, zeichnet damit den Verlauf der angepassten Verteilung und ergänzt die Dichtefunktion der Stichprobe. Die Ausgabe erfolgt auf einer Übersicht mit einem Histogramm der empirischen Daten und allen angepassten Verteilungen. Folgende Abbildung 17 zeigt beispielhaft diese Übersicht für die Klasse *PR01_WS01_KGXX*:

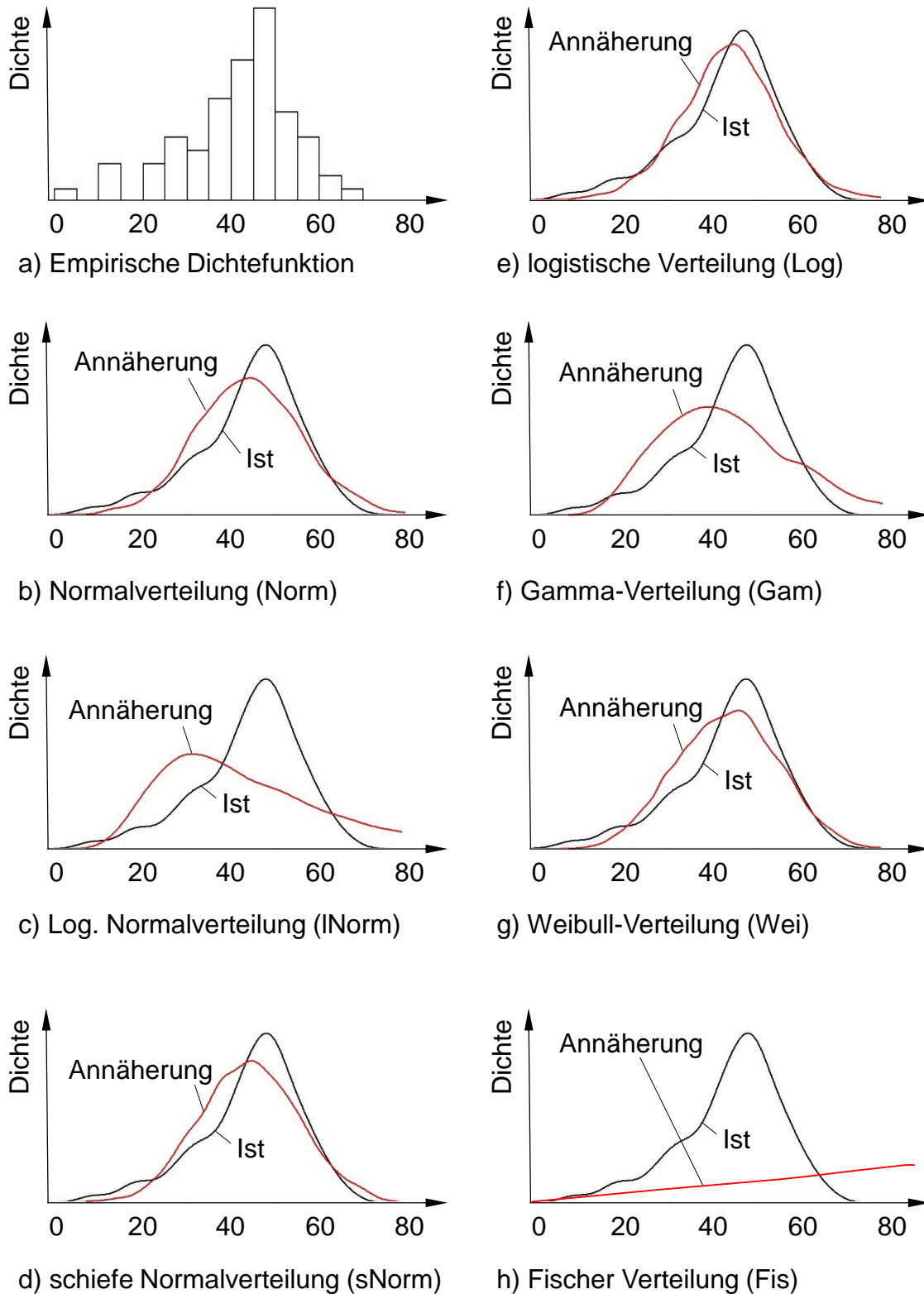


Abbildung 17 Anpassung der speziellen Verteilungen an die empirische Verteilung für die Stichprobe PR01_WS01_KGXX.

Folgende qualitativen Kriterien bewerten die Ergebnisse der Anpassung:

Kriterien	Bewertung	Wert
Mittelwert, Streuung und Schiefe o. k.	++	+2
Mittelwert und Streuung o. k.	+	+1
Mittelwert o. k.	0	0
leicht außerhalb des Mittelwerts	-	-1
stark außerhalb des Mittelwerts	--	-2
kein Ergebnis der Anpassung	n/a	n/a

Tabelle 9 fasst die qualitative Bewertung der Ergebnisse zusammen:

Stichprobenmenge	Norm	INorm	SNorm	Log	Gam	Wei	Fis
Nr Klasse							
1 PR03_WS26_xxxx	+	+	+	+	++	+	+
2 PR13_WS05_xxxx	++	-	++	++	0	--	+
3 PR02_WS23_xxxx	+	-	+	+	-	--	-
4 PR01_WS01_xxxx	+	-	+	+	0	--	--
5 PR24_WS01_xxxx	+	++	+	+	++	+	++
6 PR01_WS01_xxxx	+	0	+	+	+	+	--
7 PR01_WS03_xxxx	+	-	+	+	0	0	0
8 PR01_WS02_xxxx	+	+	+	+	+	-	--
9 PR22_WS03_KGRP	+	n/a	++	+	+	+	n/a
10 PR21_WS01_KGRP	++	-	++	++	0	++	n/a
11 PR24_WS01_KGMF	+	-	+	+	-	-	n/a
12 PR11_WS05_KGME	+	-	+	+	+	+	+
13 PR11_WS01_KGBF	++	0	++	++	+	++	-
14 PR21_WS01_KGUU	+	-	+	+	0	+	--
15 PR01_WS02_KGXX	+	++	+	+	++	+	--
16 PR01_WS02_KGHH	++	0	++	++	+	++	--
17 PR01_WS01_KGXX	+	--	+	+	0	+	--
Summe Bewertung:	21	n/a	22	21	10	6	n/a

Tabelle 9 Bewertung der Anpassungsergebnisse.

Die Ergebnisse der Normalverteilung, der schiefen Normalverteilung und der logistischen Verteilung zeigen eine gute Anpassung an die Daten. Die Normalverteilung kann jedoch keine Schiefe abbilden und die anderen Verteilungen bilden Schiefe, insbesondere Linksschiefe, ungenügend ab.

Interpretation und weitere Vorgehensweise

Bei Daten ohne Schiefe ist die Normalverteilung eine einfache und gute Möglichkeit zur Abbildung der Unsicherheit. Bei schiefen Verteilungen kann keine spezielle Verteilung ausreichend gut die empirischen Daten abbilden. Zudem können nur Statistikprogramme durch Schätzverfahren die Parameter ermitteln, die dadurch schlecht interpretierbar sind. Der folgende Abschnitt transformiert die Normalverteilung und erweitert die resultierende Verteilung um einen Schiefeparameter, um bessere Anpassungsergebnisse zu erzielen.

5.3.3 Erzeugung einer passenden Verteilung durch Transformation

Die Ergebnisse der Anpassung spezieller Verteilungen an die empirischen Daten zeigen, dass keine Verteilung die Anforderung der Planungsgrößen der Instandhaltungsproduktion erfüllt. Insbesondere schiefe Verteilungen erschweren die Anpassung der Verteilungsparameter. Viele Verteilungen ermöglichen zudem nicht die analytische Ermittlung der Parameter und erzeugen damit einen erhöhten Aufwand durch die Nutzung von Schätzverfahren [Shor95]. Auf Basis der Ergebnisse in Abschnitt 5.3.2 ist es das Ziel der folgenden Ausführungen, eine Verteilungsfunktion mit den geforderten Eigenschaften zu erzeugen. Dieser Abschnitt nutzt die Normalverteilung als Ausgangsbasis und transformiert sie in fünf Schritten: Ergänzung eines Schiefekoeffizienten, Korrektur der Abweichung, Korrektur des Lageparameters, Normierung als Dichtefunktion und Optimierung der Anpassungskoeffizienten.

Ausgangsbasis Normalverteilung:

Die Normalverteilung ist eine symmetrische Verteilung, die vom Mittelwert \bar{x} als Lageparameter und von der Standardabweichung σ als Abweichungsparameter definiert ist. Beide Parameter können analytisch bestimmt werden [McLa01]. Formel (5.4) beschreibt die Dichtefunktion der Normalverteilung:

$$\text{PDF}_N = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.4)$$

$$A = \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2}}\right) \quad (5.5)$$

A : Normierungskoeffizient

\bar{x} : Mittelwert

σ : Standardabweichung

A entspricht dem Normierungsfaktor der Dichtefunktion der Normalverteilung. Da die Dichtefunktion in den folgenden Schritten transformiert wird, kann dieser Term vernachlässigt werden. Die Normierung der transformierten Funktion findet weiter unten statt.

Schritt 1 – Ergänzung des Schiefekoeffizienten:

Der Schiefekoeffizient ermöglicht es der resultierenden Verteilung, symmetrische, rechtsschiefe und linksschiefe Verteilungen abzubilden. Er besteht aus vier Teilen:

- Funktionsverlauf des Schiefekoeffizienten: Der Arkustangens (Atan) weist eine S-Kurvenform mit einem Wertebereich von $-\pi/2$ bis $+\pi/2$ auf. Er hat also im negativen wie im positiven Wertebereich einen Grenzwert.
- Abhängigkeit von der Schiefe s: Ein negativer Wert von s beschreibt eine linksschiefe Verteilung und ein positiver Wert eine rechtsschiefe Verteilung. Je größer bzw. kleiner die Ausprägung, desto schiefere die Verteilung. Die Schiefe s kann mit folgender Formel berechnet werden [Tout08]:

$$s = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^3}} \quad (5.6)$$

n : Stichprobenumfang

\bar{x} : Mittelwert

- Abhängigkeit vom Mittelwert \bar{x} : $\frac{x-\bar{x}}{\bar{x}}$ entspricht dem Lageparameter der Kurve und versetzt den Wendepunkt der Funktion auf den Mittelwert der Daten.
- Korrekturfaktor: K_s entspricht dem Korrekturfaktor der Schiefe sorgt für den gewünschten Verlauf der Verteilung in Abhängigkeit von dem Schiefeparameter. Dieser Faktor wird im letzten Schritt dieses Abschnittes bestimmt.
- Normierung: $(+\pi)$ versetzt den Wertebereich auf $(\pi/2)$ bis $(3\pi/2)$ und $(/\pi)$ normiert den Funktionsabschnitt auf 1.

Formel (5.7) beschreibt den Schiefekoeffizienten Koeff_s mit allen oben beschriebenen Elementen:

$$\text{Koeff}_s = \left(\frac{\text{atan} \left(-K_s \cdot s \cdot \frac{x-\bar{x}}{\bar{x}} \right) + \pi}{\pi} \right)^3 \quad (5.7)$$

- \bar{x} : Mittelwert
 s : Schiefeparameter siehe Formel (5.6)
 K_s : Korrekturfaktor des Schiefeparameters

Formel (5.8) beschreibt die Transformation der Normalverteilung mit dem Schiefekoeffizienten:

$$\text{PDF}_{\text{NS}} = A \cdot \exp \left(- \left(\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2} \right) \cdot \left(\frac{\text{atan} \left(-K_s \cdot s \cdot \frac{x-\bar{x}}{\bar{x}} \right) + \pi}{\pi} \right)^3 \right) \quad (5.8)$$

- A : Normierungskoeffizient
 \bar{x} : Mittelwert
 σ : Standardabweichung
 s : Schiefeparameter
 K_s : Korrekturfaktor des Schiefeparameters

Diese Transformation ermöglicht die Abbildung unterschiedlicher Schiefeparameter durch die Verteilung. Abbildung 18 zeigt eine schematische Verteilung mit unterschiedlichen Schiefeparametern bei gleich bleibendem Mittelwert und gleich bleibender Standardabweichung:

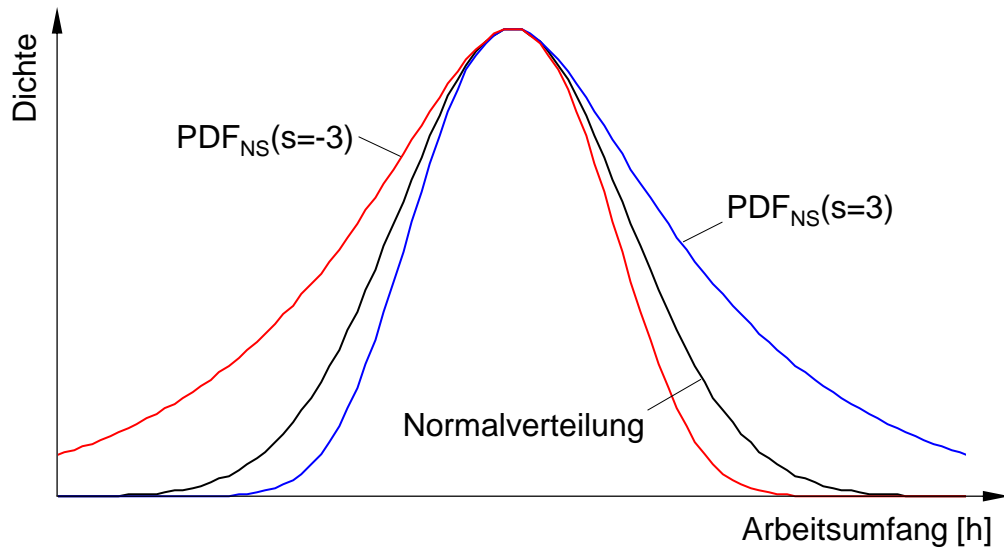


Abbildung 18 Schematische Verteilung mit unterschiedlichen Schiefeparametern. Rot: $s = -3$; blau: $s = 3$; schwarz: $s = 0$.

Schritt 2 – Korrektur der Streuung:

Mit zunehmender Schiefe kann die Standardabweichung nicht mehr einfach interpretiert werden [Feit08]. Somit beeinflusst die Schiefe den Abweichungsparameter. K_σ entspricht dem Korrekturfaktor für die Abweichung, um diesen Zusammenhang in der Verteilung zu berücksichtigen:

$$PDF_{NSK} = A \cdot \exp\left(-\left(\frac{(x-\bar{x})^2}{2 \cdot (\sigma \cdot K_\sigma)^2}\right) \cdot \left(\frac{\text{atan}\left(-K_s \cdot s \cdot \frac{x-\bar{x}}{\bar{x}}\right) + \pi}{\pi}\right)^3\right) \quad (5.9)$$

- A : Normierungskoeffizient
- \bar{x} : Mittelwert
- σ : Standardabweichung
- s : Schiefeparameter
- K_σ : Korrekturfaktor des Streuungsparameters
- K_s : Korrekturfaktor des Schiefeparameters

Abbildung 19 stellt diese Korrektur schematisch dar:

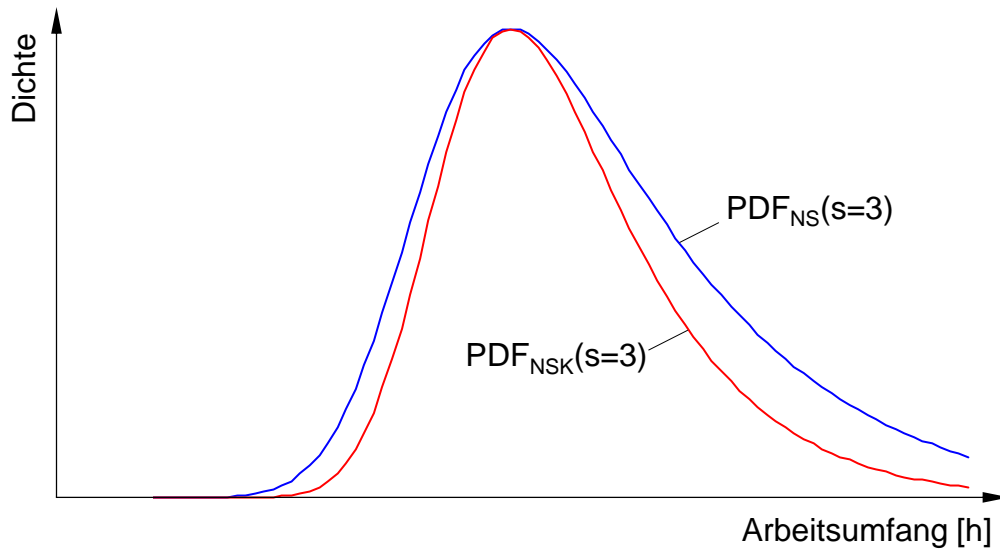


Abbildung 19 Schematische Verteilung mit Schiefekoeffizienten und Korrektur der Streuung. Schwarz: Normalverteilung; blau: ohne Korrektur der Streuung; rot: mit Korrektur der Streuung.

Schritt 3 – Korrektur der Lage:

Nach aktuellem Stand der Funktion in Formel (5.9) bleibt der Modus mit zunehmender Schiefe gleich und entspricht dem Parameter \bar{x} . Da \bar{x} allerdings dem Mittelwert der Verteilung entsprechen soll, muss sich der Modus mit zunehmender Schiefe verändern: Bei rechtsschiefen Verteilungen muss sich der Modus nach links verschieben und bei linksschiefen analog nach rechts. Durch die Anpassung des Lageparameters in Abhängigkeit von s kann dieses Verhalten herbeigeführt werden. $K_l(s, \sigma)$ beschreibt die Korrektur des Lageparameters in Abhängigkeit von s und σ . Formel (5.10) berücksichtigt den Faktor in der Verteilung und wird als Unsicherheitsverteilungsfunktion (UVF) bezeichnet:

$$\text{PDF}_{\text{UVF}} = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-\bar{x}+K_l)^2}{2(b-K_\sigma)^2}\right) \cdot \left(\frac{\text{atan}\left(-K_s \cdot s \cdot \frac{x-\bar{x}+K_l}{\bar{x}}\right) + \pi}{\pi}\right)^3 \quad (5.10)$$

- A : Normierungskoeffizient
 \bar{x} : Mittelwert
 σ : Standardabweichung
s : Schiefeparameter
 K_l : Korrekturfaktor des Lageparameters
 K_σ : Korrekturfaktor des Steuerparameters
 K_s : Korrekturfaktor des Schiefeparameters

Abbildung 20 zeigt die grafische Darstellung der PDF_{UVF} gemeinsam mit der PDF_{NSK} :

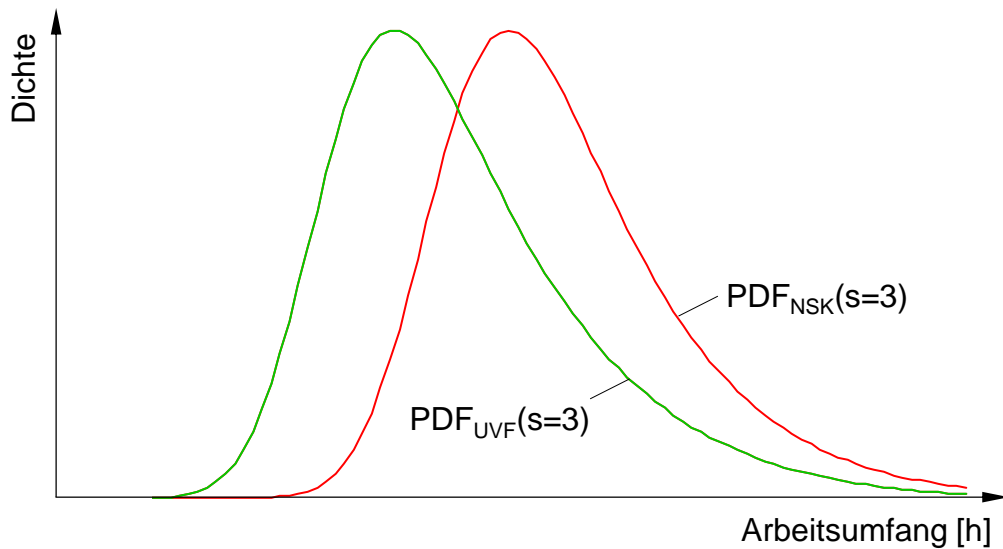


Abbildung 20 Schematische Verteilung mit Schiefekoeffizienten und Korrektur der Lage.

Schwarz: Normalverteilung; rot: ohne Korrektur der Lage; grün: mit Korrektur der Lage.

Schritt 4 – Normierung als Dichtefunktion:

Die Verteilung weist nun die geforderten Anforderungen auf, ist aber noch keine Dichtefunktion. Das Integral über eine Dichtefunktion muss 1 ergeben. Das gilt für die aktuelle Funktion nur bei $s = 1$. Der Gleichungsterm A in Formel (5.5) ist der Normierungsfaktor für die Normalverteilung und nach den vorgenommenen Anpassungen nicht mehr korrekt. Aufgrund der Komplexität der UVF kann ihr Integral nicht bestimmt werden, sodass der Faktor nicht allgemein definiert werden kann. Durch Statistikprogramme kann das Integral für definierte Parameter

jedoch ausgerechnet bzw. angenähert werden, sodass der Faktor numerisch bestimmt werden kann.

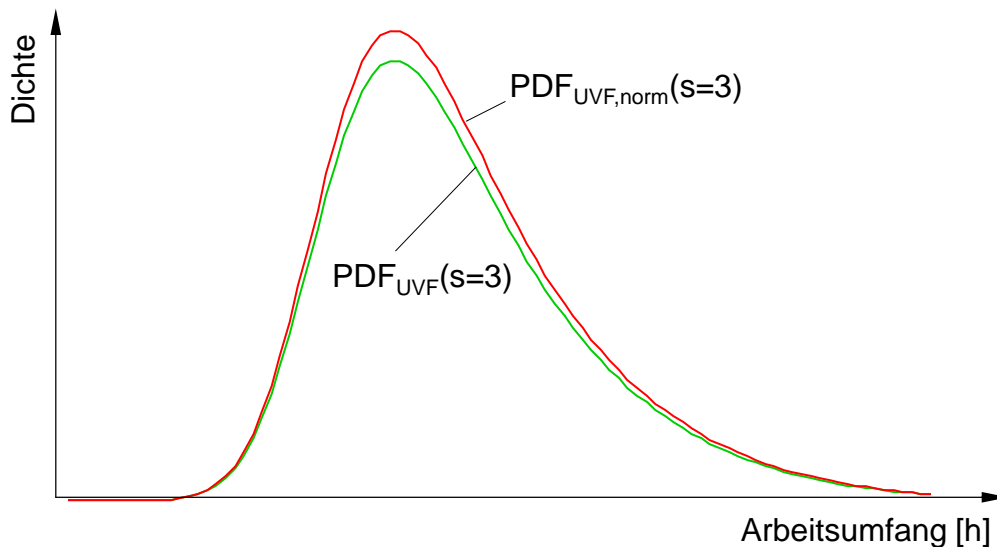


Abbildung 21 Normierung der Verteilung durch numerische Bestimmung des Normierungsfaktors A. Grün: ohne Normierung; rot: mit Normierung.

Schritt 5 – Optimierung der Korrekturfaktoren:

Die Auslegung der Korrekturfaktoren ermöglicht es, die Parameter der UVF analytisch zu ermitteln. Ohne Korrekturfaktoren müssten die Parameter durch Schätzverfahren ermittelt werden (Abschnitt 5.3.2) und könnten damit nicht mehr einfach interpretiert werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die UVF auf Basis bekannter und analytisch berechenbarer Parameter zu bestimmen. Die Korrekturfaktoren müssen die Verteilungsfunktion beeinflussen, um ein optimales Anpassungsergebnis unter Verwendung von Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe der empirischen Daten zu erzeugen.

Die oben definierten Stichproben werden durch die UVF abgebildet und mit alternativen Einstellungen der Faktoren der empirischen PDF gegenübergestellt. Folgende Faktoreinstellung führt zu einem guten Ergebnis:

$$K_l = (0,2 \cdot s \cdot \sigma) \quad (5.11)$$

$$K_\sigma = \left(s^2 \cdot \frac{\sigma}{10} \right) \quad (5.12)$$

$$K_s = 0,5 \quad (5.13)$$

- σ : Standardabweichung
 s : Schiefeparameter
 K_l : Korrekturfaktor des Lageparameters
 K_σ : Korrekturfaktor des Steuungsparameters
 K_s : Korrekturfaktor des Schiefeparameters

Abbildung 22 zeigt exemplarisch vier Beispiele einer Anpassung mit der UVF:

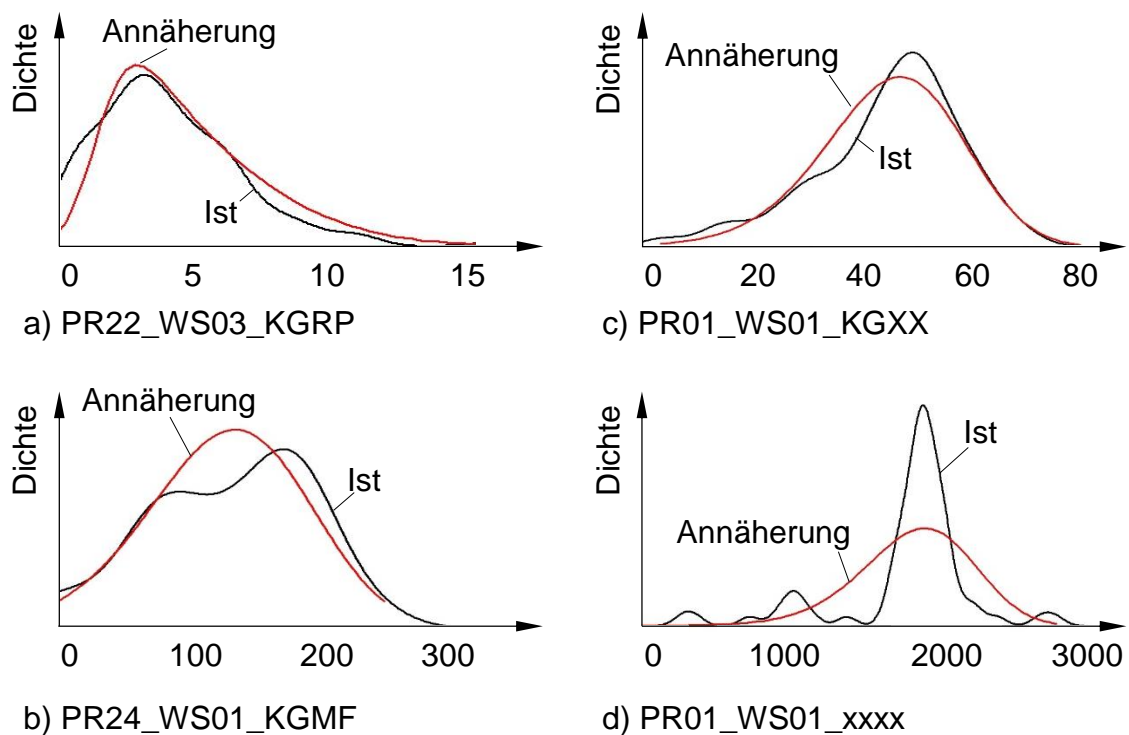


Abbildung 22 Anpassung der UVF an ausgewählte Stichproben.

Die Beispiele in Abbildung 22 zeigen, dass die UVF unterschiedliche empirische Stichproben gut abbildet. Abbildung 22a und Abbildung 22b zeigen gute Anpassungsergebnisse an eine linksschiefe und eine rechtsschiefe Verteilung. Abbildung 22c und Abbildung 22d zeigen die Anpassungsergebnisse an eine bimodale und eine multimodale Verteilung. Die UVF bildet multimodale Verteilungen nur ungenügend ab und nähert sie einer Verteilung mit einem Modus an. Multimodale Verteilungen können vermieden werden, indem die Klassifizierungskriterien

angepasst werden. Folgende Tabelle zeigt die Gegenüberstellung der Konfidenzintervalle der empirischen und der angepassten Verteilung durch die UVF:

PR01_WS01_KGXX			
	Empirische Verteilung	Annäherung UVF	Abweichung
Median	44	42	-5%
Quantil 10 %	24	25	+4%
Quantil 90 %	56	58	+4%

a) Quantile für die Klasse PR01_WS01_KGXX

PR01_WS01_xxxx			
	Empirische Verteilung	Annäherung UVF	Abweichung
Median	1877	1851	-1%
Quantil 10 %	1061	826	-22%
Quantil 90 %	2056	2290	+11%

b) Quantile für die Klasse PR01_WS01_xxxx

Tabelle 10 Gegenüberstellung der Quantile (10 % und 90 %) der empirischen Verteilung mit der Annäherung durch die UVF.

Tabelle 10a beschreibt eine gute Anpassung der UVF, da der Median und die berechneten Quantile nur geringfügig mit 4 % bzw 5 % abweichen. Tabelle 10b zeigt eine deutliche Abweichung in den berechneten Quantilen (22 % bzw. 11 %). Der Median der empirischen und der angepassten Verteilung ist jedoch nahezu gleich.

Die UVF ist somit eine Dichtefunktion, die durch analytisch zu ermittelnde Parameter die Ausprägung der Auftragszeit unter Unsicherheit beschreibt. Die statistischen Größen Schiefe und Standardabweichung reichen aus, um das Ausmaß der Unsicherheit zu beschreiben. Die UVF ermöglicht zudem die Integration der Unsicherheit in die Planung und Steuerung:

- Einschätzung der Auftragszeiten mit der Dichtefunktion: Der Verlauf und die Form der UVF ermöglichen es, die Ausprägung und die Eintrittswahrscheinlichkeit der Auftragszeit unter Berücksichtigung der Schiefe der Verteilungen einzuschätzen.
- Bestimmung von Konfidenzintervallen: Die Standardabweichung beschreibt den Wertebereich um den Mittelwert, der ca. 68 % der Ausprägungen enthält. Durch die UVF können alternative Konfidenzintervalle für Auftragszeiten bestimmt werden, die eine höhere oder niedrigere Realisierungswahrscheinlichkeit aufweisen.

- Kombination von Verteilungen: Die UVF ermöglicht es, Klassen durch Faltung der jeweiligen Verteilungen miteinander zu kombinieren. Abschnitt 5.4 erläutert diese Vorgehensweise im Detail.
- Integration der Unsicherheit in die Belastungsrechnung: Die Bestimmung von Konfidenzintervallen ermöglicht es, die resultierende Unsicherheit in der Planung zu berücksichtigen. Die Kombination von Verteilungen erlaubt es, gleichzeitig stattfindende Aufträge zu berücksichtigen. Diese Eigenschaften ermöglichen es der Planung, die resultierende Unsicherheit für eine Zeitperiode mit mehreren unsicheren Ereignissen abzubilden. Die Vorgehensweise zur Integration der Unsicherheit in die Planung beschreibt Abschnitt 6.1.

5.4 Kombination von Verteilungen durch Faltung

Die UVF ermöglicht es auf Grundlage der Parameter Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe, Unsicherheit der Auftragszeiten einer Klasse abzubilden (Abschnitt 5.3). In der Praxis kommt es vor, dass mehrere voneinander unabhängige unsichere Ereignisse gleichzeitig stattfinden. Insbesondere die Instandhaltungsproduktion ist von hohen Auftragszeiten geprägt und somit werden z. B. die Bauteile mehrerer Instandhaltungsobjekte gleichzeitig instandgesetzt oder parallel mehrere Baugruppen demontiert. Die resultierende Unsicherheit der Auftragszeit ist somit von den gleichzeitig stattfindenden Ereignissen beeinflusst und kann durch die Faltung der zugrunde liegenden Verteilungen ermittelt werden [Stel07]. Zielsetzung dieses Abschnittes ist es, die Faltung mehrerer Verteilungen mit gleichen oder unterschiedlichen Parametern zu beschreiben. Die so entstehende Verteilung der gesamten Auftragszeit ermöglicht es der Planung und Steuerung, Kapazitäten bereitzustellen und die zu erwartende Unsicherheit für die Belastung einzelner Kapazitätsgruppen abzubilden. Die Faltung soll ohne komplexe Rechenoperationen oder Statistikprogramme durchgeführt werden können. Die Parameter der zu kombinierenden Verteilungen beschreiben die Parameter der resultierenden Verteilung.

Die Faltung F_{f^*g} ist definiert mit [Schm11, Stel07]:

$$F_{f^*g} = \int_{-\infty}^{\infty} f(z-y)g(y)dy \quad (5.14)$$

$f(z)$: Verteilung f für Variable z

$g(y)$: Verteilung g für Variable y

Die Faltung kann nur mit zwei Verteilungen durchgeführt werden. Die Faltung dreier Verteilungen muss nacheinander durchgeführt werden:

$$F_{f*g*h} = F_{(F_{f*g})*h} \quad (5.15)$$

- f : Verteilung f
- g : Verteilung g
- h : Verteilung h
- F_{f*g} : Faltung der Verteilungen f und g

Da das Integral der UVF keine abgeschlossene Form aufweist (Abschnitt 5.3.3), kann die Faltung nicht analytisch durchgeführt werden. Somit bleibt nur die numerische Lösung der Integrale durch ein Statistikprogramm. Das Ergebnis der Faltung ermöglicht die Ermittlung der Parameterkombination der UVF, die ebenfalls die Faltung abbildet. Im Folgenden wird eine Regel zur Parameterberechnung der resultierenden Verteilung einer Faltung bestimmt:

Zunächst werden drei Verteilungen definiert, die gefaltet werden sollen: Drei Triebwerke (f1, f2, f3) werden gleichzeitig auf einer Arbeitsplatzgruppe demontiert. Die Auftragszeit der Instandsetzung ist unsicher und nach folgenden Parametern verteilt:

- f1: $\bar{x}_1 = 190h$, $\sigma_1 = 50h$, $s_1 = 1$
- f2: $\bar{x}_2 = 110h$, $\sigma_2 = 60h$, $s_2 = 2$
- f3: $\bar{x}_3 = 150h$, $\sigma_3 = 40h$, $s_3 = 1,5$

Die Faltung $g_{f_1*f_2}$ wird durchgeführt:

$$g_{f_1*f_2} = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(z-y)f_2(y)dy \quad (5.16)$$

Abbildung 23 zeigt die grafische Darstellung der Funktionen f_1 , f_2 , das numerisch ermittelte Faltungsergebnis f_1*f_2 und die Annäherung der UVP:

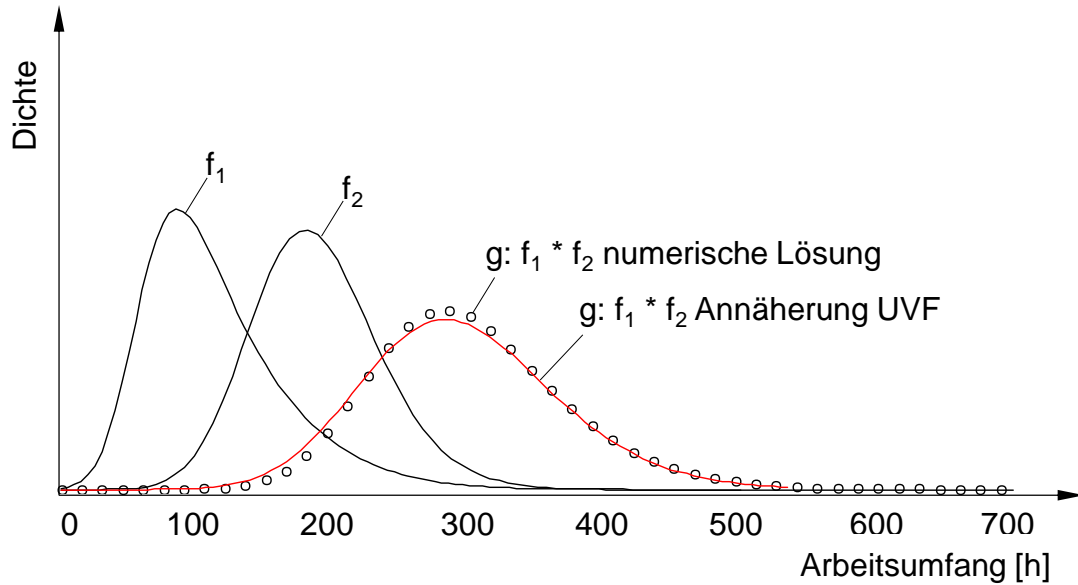


Abbildung 23 Faltung von f_1 und f_2 und Annäherung der UVF an die numerische Lösung.

Abbildung 23 zeigt die Faltung von f_1 mit f_2 und stellt das numerisch ermittelte Ergebnis g dar. Das numerische Ergebnis g der Faltung kann nun mit den Parametern der UVF angepasst werden, sodass gilt:

$$g_{f_1 * f_2} = \text{UVF}(\bar{x}_g; \sigma_g; s_g) = g \quad (5.17)$$

\bar{x}_g : Mittelwert von g ermittelt aus den Parametern \bar{x}_1 und \bar{x}_2

σ_g : Standardabweichung von h ermittelt aus σ_1 und σ_2

s_g : Schiefeparameter von h ermittelt aus s_1 und s_2

Mit dem Faltungsergebnis g kann die Faltung mit f_3 durchgeführt werden:

$$h_{g * f_3} = \int_{-\infty}^{\infty} g(z - y) f_3(y) dy \quad (5.18)$$

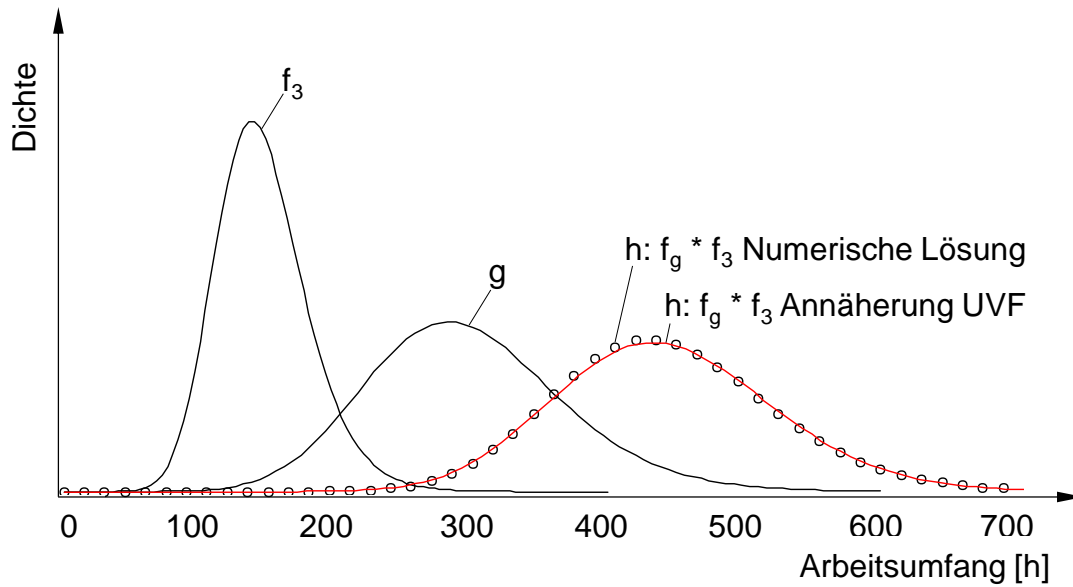


Abbildung 24 Faltung g und f_3 und Näherung der UVP an die numerische Lösung.

Abbildung 24 führt die Faltung von g mit f_3 aus und stellt das numerisch ermittelte Ergebnis h dar. Die aus dieser Faltung resultierende Verteilung h kann wiederum mit den Parametern der UVF angepasst werden, sodass gilt:

$$h_{g*f_3} = \text{UVF}(\bar{x}_h; \sigma_h; s_h) = h \tag{5.19}$$

- \bar{x}_h : Mittelwert von h ermittelt aus \bar{x}_g und \bar{x}_3
- σ_h : Standardabweichung von h ermittelt aus σ_g und σ_3
- s_h : Schiefeparameter von h ermittelt aus s_g und s_3

Zwischenergebnis ist nun die Annäherung der Faltungsergebnisse aus jeweils zwei Verteilungen durch die UVF. Um eine Vielzahl von Verteilungen miteinander zu kombinieren, wäre eine Annäherung der UVF sinnvoll, die die Faltung aller Verteilungen ohne Zwischenschritte abbildet:

$$i_{f_1*f_2*f_3} = \text{UVF}(\bar{x}_{f_1f_2f_3}; \sigma_{f_1f_2f_3}; s_{f_1f_2f_3}) \tag{5.20}$$

- \bar{x}_i : Mittelwert von i ermittelt aus \bar{x}_1 , \bar{x}_2 und \bar{x}_3
- σ_i : Standardabweichung von i ermittelt aus σ_1 , σ_2 und σ_3
- s_i : Schiefeparameter von i ermittelt aus s_1 , s_2 und s_3

Faltungsregeln:

Die Faltungsregeln ermöglichen die Festlegung der resultierenden Parameter einer Faltung aufgrund der Parameter der zugrunde liegenden Verteilungen. Für den Mittelwert und die Standardabweichung gelten die allgemeingültigen Zusammenhänge. Der Zusammenhang für die resultierende Schiefe kann durch Experimente festgestellt werden:

$$\bar{x}_i = \sum_{n=1}^n \bar{x}_n \quad (5.21)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{n=1}^n \sigma_n^2} \quad (5.22)$$

$$s_i = \frac{0,9^n}{n} * \left(\frac{\sum_{n=1}^n s_n \bar{x}_n}{\sum_{n=1}^n \bar{x}_n} \right) \quad (5.23)$$

- n : Anzahl der zu faltenden Verteilungen
- \bar{x}_i : Lageparameter der resultierenden Verteilung
- \bar{x}_n : Lageparameter der Verteilung n
- σ_i : Streuungsparameter der resultierenden Verteilung
- σ_n : Streuungsparameter der Verteilung n
- s_i : Schiefeparameter der resultierenden Verteilung
- s_n : Schiefeparameter der Verteilung n

Der resultierende Schiefeparameter s_i wird von der Anzahl, der Schiefe und den Mittelwerten der zu faltenden Verteilungen beeinflusst. Schiefeparameter von Verteilungen mit hohen Mittelwerten wirken sich demnach größer im resultierenden Schiefeparameter aus, als solche mit kleinen Mittelwerten. Die Schiefe nimmt allerdings mit der Anzahl der zu faltenden Verteilungen immer mehr ab, so dass hier der zentrale Grenzwertsatz Anwendung findet. Demnach nähert sich bei einer Faltung einer großen Anzahl unabhängiger Verteilungen die resultierende Verteilung einer Normalverteilung an.

Folgende Abbildung 25 zeigt die Faltung obiger Verteilungen in einem Schritt unter Verwendung der Faltungsregeln:

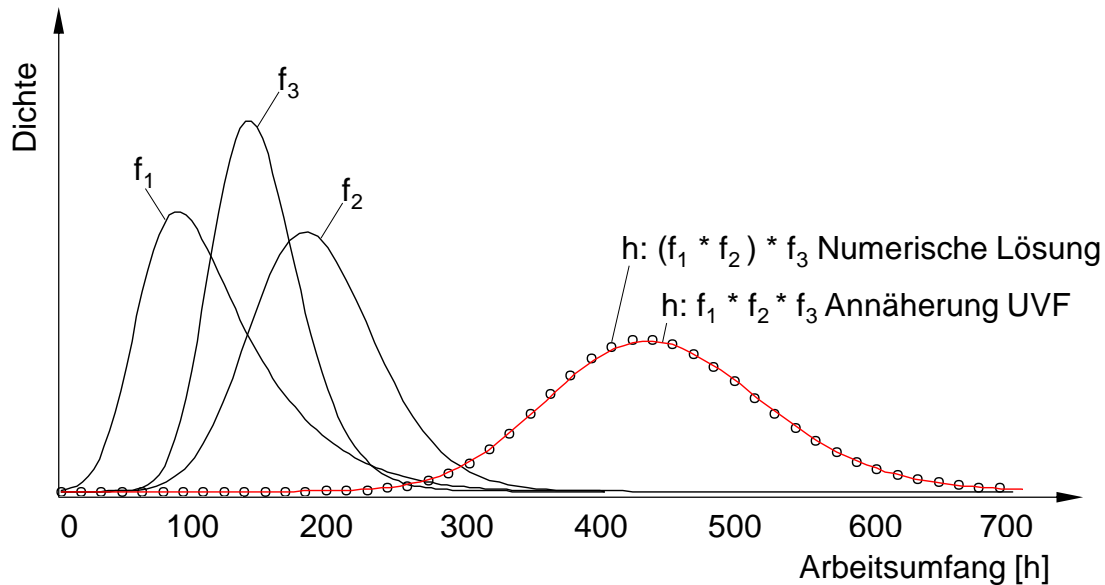


Abbildung 25 Faltung der Verteilungen f_1 , f_2 und f_3 und Annäherung der UVF an die numerische Lösung.

Abbildung 25 zeigt die Verteilungen f_1 , f_2 und f_3 sowie das numerisch ermittelte Faltungsergebnis $h: (f_1 * f_2) * f_3$. Das numerische Faltungsergebnis kann mithilfe der UVF und der oben beschriebenen Faltungsregeln analytisch angenähert werden. Dies ermöglicht es der Planung, die Verteilungen der Auftragszeiten in der Belastungsplanung zu berücksichtigen, um die resultierende Unsicherheit bei gleichzeitig stattfindenden Instandhaltungsereignissen zu bestimmen.

5.5 Chancen und Herausforderungen zur Messung der Unsicherheit

Die Beschreibung des Ausmaßes der Unsicherheit ermöglicht es dem Unternehmen, Risiken, Chancen und Handlungsfelder in der Planung sichtbar zu machen. Risiken können vorab eingeschätzt, vermieden oder mit Maßnahmen abgemildert werden. Der Vertrieb kann z. B. Aufträge mit hoher Unsicherheit ablehnen oder die Fertigung von Aufträgen beschleunigen. Potenziell höhere Arbeitsvolumen bilden auch die Chance auf größere Umsätze ab und ermöglichen Maßnahmen zur gezielten Steigerung des Arbeitsvolumens. Bei der Einführung neuer Produkte geben vorhandene und vergleichbare Klassen Aufschluss über die zu erwartende Unsicherheit. Klassen speichern Erfahrungen mit Produkten, Leistungsumfängen oder Kunden und können für eine ähnliche Situation wiederverwendet werden. Wiederholungsfehler können somit vermieden werden.

Die Nutzung von Einflussfaktoren zur Bildung der Klassen erfordert jedoch die Beschaffung von Informationen. Je nach Klassifizierung können die Vorgaben der Beschaffung von Informationen hohe Kosten verursachen. Die Nutzung der Verteilungen der Auftragszeiten im Planungssystem erfordert zudem neue Methoden und Prozesse im Unternehmen. Doppelgipflige Verteilungen, starke Ausreißer in der Datenbasis oder eine zu geringe Datenbasis ergeben u. U. fehlerhafte Parameter und falsche Schlussfolgerungen. Die Nutzung fehlerhafter Klassen in der PPS kann zu Engpässen, Überkapazitäten und Terminverzögerungen führen.

Die Entscheidung, Unsicherheit zu berücksichtigen, ist eine Einzelfallentscheidung und erfordert es, die Chancen und die Herausforderungen der Messung der Unsicherheit gegenüberzustellen. Die Klassifizierung wägt die Vorteile der erhöhten Transparenz mit den Nachteilen der erhöhten Kosten und Komplexität ab. Die richtige Auswahl und Kombination der Einflussfaktoren der Klassen durch Experten erleichtern es, die Ergebnisse zu plausibilisieren und Fehler in der Klassifizierung zu vermeiden. Neben den Auftragszeiten können weitere Größen des Instandhaltungsdienstleisters Gegenstand der Methode sein, wie z. B. die Unsicherheit des Bauteilzustandes oder die Lieferzeitpunkte des Instandhaltungsobjektes. Unsicherheit über den Bauteilzustand ermöglicht es dem Unternehmen abzuschätzen, welche und wie viele Bauteile ersetzt oder repariert werden müssen. Zusammen mit der Unsicherheit der Arbeitsumfänge kann daraus z. B. die Unsicherheit der Gesamtkosten eines Auftrages ermittelt werden.

6 Kapazitätsplanung und -steuerung unter Unsicherheit

Dieses Kapitel beschreibt eine Methode zur Durchführung der Kapazitätsplanung und -steuerung unter Unsicherheit. Das Handlungsfeld H2 beschreibt den Bedarf, die Unsicherheit des Arbeitsumfangs im Rahmen der Kapazitätsplanung zu berücksichtigen. Das Handlungsfeld H3 definiert die Notwendigkeit, die Kapazitätsflexibilität zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen durch die Kapazitätssteuerung einzusetzen.

Abschnitt 6.1 erläutert die Kapazitätsplanung unter Unsicherheit. Der Abschnitt erweitert die Belastungsrechnung um die Verteilungen der Auftragszeiten aus Kapitel 5, stellt eine Methode der Kapazitätsabstimmung zur Ermittlung des Flexibilitätsdefizits vor und beschreibt den Umgang mit dem Flexibilitätsdefizit. Anhand der Belastungsplanung und der Kapazitätsabstimmung erläutert die Methode die Anpassung der Kapazitätsflexibilität zur Verbesserung der Auslastung der Produktion.

Abschnitt 6.2 nutzt die Kapazitätsflexibilitätsmatrix zur Anpassung der Kapazitätssteuerung. Der Abschnitt stellt eine Rückstandsregelung und eine Methode zur kurzzyklischen Anpassung des Mitarbeiterereinsatzes mithilfe der Kapazitätsflexibilitätsmatrix vor.

6.1 Kapazitätsplanung unter Unsicherheit

Die Quantifizierung der Unsicherheit in Klassen ermöglicht es der PPS, die Belastungsrechnung um die Verteilungen der Auftragszeiten zu erweitern (Kapitel 5). Abschnitt 6.1.1 stellt eine Methode zur Belastungsplanung unter Unsicherheit vor. Abschnitt 6.1.2 führt die Kapazitätsabstimmung anhand der Kapazitätsflexibilitätsmatrix durch. Diese Matrix fasst die Ergebnisse der Belastungsplanung unter Unsicherheit zusammen, stellt sie der vorhandenen Kapazitätsflexibilität gegenüber und ermittelt daraus das Flexibilitätsdefizit. Abschnitt 6.1.3 stellt abschließend Maßnahmen zum Umgang mit dem ermittelten Flexibilitätsdefizit vor.

6.1.1 Belastungsplanung unter Unsicherheit

Die Belastungsplanung umfasst die Durchlaufterminierung und die Kapazitätsbedarfsermittlung und wird in der Grobressourcenplanung sowie in der Termin- und Kapazitätsplanung benötigt (Abschnitt 2.3). Dieser Abschnitt erläutert die Erweiterung der Belastungsplanung um Parameterberechnungen zur Berücksichtigung der Unsicherheit. Außerdem werden die Ergebnisse der Belastungsplanung als Konfidenzintervall dargestellt, um neben den Ausprägungen

der Planungsgröße auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten zu bestimmen. Der Abschnitt stellt eine einfache und eine komplexe Methode zur Bildung der Konfidenzintervalle vor.

Die Parameter Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe beschreiben die Unsicherheit durch die in Kapitel 5 vorgestellten Klassen. Um Unsicherheit auch in der Belastungsplanung zu berücksichtigen, müssen alle diese Parameter Teil der Planung sein. Tabelle 11 zeigt drei Aufträge mit unterschiedlichen Parameterwerten für den Mittelwert, die Standardabweichung und die Schiefe. Werden diese Aufträge gleichzeitig in der Produktion bearbeitet, können die Parameter der resultierenden Verteilung mithilfe der Faltungsregeln aus Abschnitt 5.4 ermittelt werden. Die Faltung A*B*C beschreibt die Parameter der resultierenden Verteilung:

Auftrag	\bar{x}	σ	s
	[h]	[h]	-
Auftrag A	400	150	1,5
Auftrag B	300	80	1,0
Auftrag C	100	30	-0,5
Faltung A*B*C	800	173	0,3

\bar{x} : Mittelwert

σ : Standardabweichung

s: Schiefe

Tabelle 11 Drei Aufträge mit unterschiedlichen Parametern zur Bildung der resultierenden Verteilung.

Formel (5.21) berechnet die resultierende Planbelastung (Mittelwert), Formel (5.22) die resultierende Standardabweichung und Formel (5.23) den resultierenden Schiefeparameter. Die Faltungsregeln ermöglichen es somit, eine Belastungsplanung mithilfe einer einfachen Tabellenkalkulation durchzuführen.

Der Variationskoeffizient erlaubt eine Schätzung der Unsicherheit der Auftragszeiten. Der Variationskoeffizient für die resultierende Verteilung (Faltung A*B*C) in Tabelle 11 beträgt 22 % und bildet den Quotienten aus Standardabweichung (173 h) und Mittelwert (800 h). Somit liegt die resultierende Auftragszeit mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 68 % (Standardabweichung) zwischen 627 und 973 Stunden. Diese Grenzen beschreiben ein Konfidenzintervall (KI) der Belastungsplanung mit einem Konfidenzniveau von 68%. Konfidenzintervalle charakterisieren die Grenzen der Belastungen je Kapazitätsgruppe und Zeitperiode, in denen sich die Arbeitsbelastung mit einer definierten Wahrscheinlichkeit einstellen. Obige Berechnungen aufgrund der Standardabweichung bzw. des Variationskoeffizienten ignorieren allerdings die

Schiefe. Der Schiefeffizientparameter $s=0,3$ zeigt, dass die Belastungswerte nicht gleichmäßig um den Mittelwert verteilt sind. Die Interpretation der Standardabweichung lässt sich zudem mit zunehmender Schiefe nicht mehr einfach vornehmen, da sie nur für eine Normalverteilung eindeutig definiert ist. Da mit zunehmender Aggregation die Schiefe der Verteilungen abnimmt, werden im Folgenden zwei Herangehensweisen zur Definition des Konfidenzintervalls vorgestellt:

- **Symmetrische Konfidenzintervalle:** Die erste Herangehensweise ignoriert die Schiefe und nutzt allein die Standardabweichung zur Bildung des Konfidenzintervalls. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass keine Unsicherheitsverteilungsfunktion (UVF) benötigt wird und der statistische Berechnungsaufwand minimiert wird.
- **Asymmetrische Konfidenzintervalle:** Der zweite Ansatz nutzt die Schiefe der Verteilungen, um das Konfidenzintervall zu bilden. Zudem bietet der Ansatz die Möglichkeit, Konfidenzintervalle mit unterschiedlichem Konfidenzniveau zu definieren.

Symmetrische Konfidenzintervalle

Bei hoch aggregierten (d. h. aus vielen Aufträgen bestehenden) Klassen oder großen Zeiträumen ist die Schiefe der Verteilungen gering. Tabelle 11 zeigt, dass die Schiefe der Einzelaufträge (bis zu $s=1,5$) bereits stark abnimmt, wenn 3 Aufträge miteinander kombiniert werden (Schiefe der resultierenden Verteilung $s=0,3$). Reichen diese Klassen für die gesetzte Aufgabenstellung aus, kann ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Konfidenzintervalle angewendet werden. Durch die geringe Schiefe gleicht sich die UVF der Normalverteilung an (Abschnitt 5.3.3). Die Standardabweichung kann somit einfach interpretiert werden, da sie den Bereich um den Mittelwert beschreibt, in dem sich die Ausprägung der Planungsgröße mit ca. 68 % Wahrscheinlichkeit befindet.

Asymmetrische Konfidenzintervalle

Bei niedrig aggregierten Klassen kann der Schiefeffizientparameter ausschlaggebend für die Grenzen des Konfidenzintervalls sein. Eine symmetrische Abbildung der Abweichung ausgehend vom Mittelwert ist damit nicht mehr ausreichend. Zudem kann die Eintrittswahrscheinlichkeit des Konfidenzintervalls nicht angepasst werden, wenn nur die Standardabweichung zu Grunde gelegt wird. Planer könnten ein größeres Konfidenzintervall fordern und den Bereich mit bspw. 80 % Eintrittswahrscheinlichkeit verplanen. Die Berücksichtigung der Schiefe und die Vorgabe

eines Konfidenzniveaus erfordern es, die UVF und weiterer statistischer Methoden zu nutzen. Das asymmetrische Konfidenzintervall bestimmt den gesuchten Bereich mithilfe der UVF um den Median der jeweiligen Verteilung. Da das Integral der UVF analytisch nicht bestimmbar ist, nutzt diese Arbeit einen numerischen Ansatz, um das Konfidenzintervall in R zu bestimmen. Abbildung 26 zeigt eine Belastungsplanung mit unterschiedlicher Berechnung der Konfidenzintervalle:

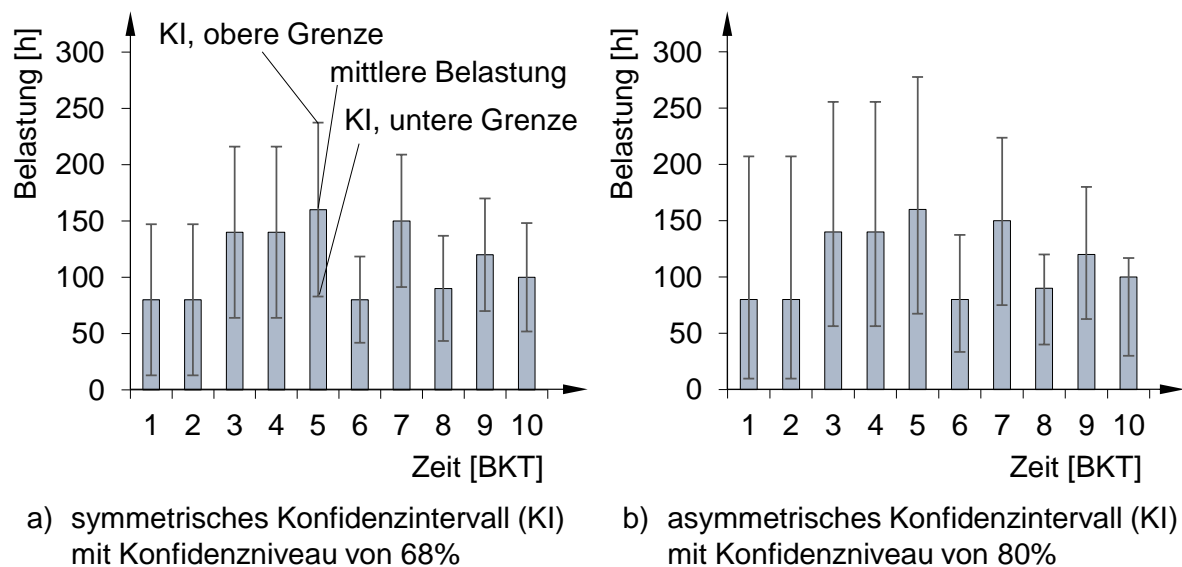


Abbildung 26 Beispiel der Belastungsrechnung mit symmetrischem (a) und asymmetrischem Konfidenzintervall (b) mit jeweils unterschiedlichem Konfidenzniveau bei 68 % bzw. 80 %.

Die Diagramme in Abbildung 26 zeigen je Zeitperiode die Planbelastung (mittlere Belastung) und den Bereich, in dem sich die Ausprägung der Belastung mit beschriebener Wahrscheinlichkeit einstellt. Die symmetrische Berechnung des Konfidenzintervalls (Abbildung 26a) zeigt eine identische Abweichung in positive wie in negative Richtung vom Mittelwert aus. Die asymmetrische Berechnung (Abbildung 26) zeigt je nach Schiefe der Verteilung eine größere positive Abweichung (positiver Wert des Schiefeparameters) oder eine größere negative Abweichung (negativer Wert des Schiefeparameters). Außerdem nutzt die asymmetrische Belastungsplanung ein größeres Konfidenzniveau von 80 %.

6.1.2 Kapazitätsabgleich mit der Kapazitätsflexibilitätsmatrix

Der vorangehende Abschnitt beschreibt die Belastungsplanung unter Unsicherheit und erweitert das Ergebnis der Planung um Konfidenzintervalle zur Abschätzung der Ausprägung und Eintrittswahrscheinlichkeit der Belastung. Originäre Aufgabe des Kapazitätsabgleichs ist es, zu

prüfen, ob die berechneten Belastungen von der vorhandenen Kapazität gedeckt sind. Im Rahmen dieser Arbeit prüft der Kapazitätsabgleich zusätzlich, ob die vorhandene Flexibilität für die auftretende Unsicherheit ausreicht. Die Kapazitätsflexibilitätsmatrix beschreibt die vorhandene Flexibilität aufgrund der Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter und bietet die Möglichkeit, Flexibilität in den Kapazitätsabgleich miteinzubeziehen (vgl. Kapazitätsflexibilität in Abschnitt 2.3). Dadurch kann bereits früh im Planungsprozess ein mögliches Kapazitätsdefizit identifiziert werden und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Belastungen können verschoben werden, alternative Szenarien verplant oder die Mitarbeiterflexibilität erhöht werden. Die Produktionssteuerung erhält durch den Kapazitätsabgleich die Transparenz über den aktuellen und künftigen Stand der Kapazitäten in der Fertigung und kann agieren (siehe später in Abschnitt 6.2).

Dieser Abschnitt beschreibt zunächst den Aufbau der Kapazitätsflexibilitätsmatrix und gibt Hinweise zur Interpretation der Matrix. Die Matrix ermöglicht den einfachen Abgleich der Belastungsunsicherheit mit der Flexibilität der Kapazitäten. Fehlende oder überflüssige Flexibilität kann dadurch schnell ermittelt werden und Maßnahmen eingeleitet werden.

Aufbau und Interpretation der Kapazitätsflexibilitätsmatrix:

Die KFM bildet die funktionale Flexibilität der Mitarbeiter ab (Mehrfachqualifikation). Die numerische Flexibilität [Eber06] kann durch Skalierungsfaktoren abgebildet werden (siehe Abschnitt 6.1.3 und Abschnitt 6.2.2). Folgende Tabelle zeigt exemplarisch den Aufbau der Kapazitätsflexibilitätsmatrix (KFM):

KFM				
	KG1	KG2	KG3	min
KG1	500	50	30	420
KG2	50	800	50	700
KG3	50	50	700	600
max	600	900	780	2000

Normalkapazität
 KFM: Kapazitätsflexibilitätsmatrix
 KG: Kapazitätsgruppe
 min: Untere Grenze der Kapazitätsflexibilität
 max: Obere Grenze der Kapazitätsflexibilität

Tabelle 12 Aufbau der Kapazitätsflexibilitätsmatrix (KFM).

Die Kapazitätsflexibilitätsmatrix bildet das reguläre Kapazitätsangebot einer Kapazitätsgruppe, die möglichen Kapazitätsverschiebungen auf andere Kapazitätsgruppen und die mögliche Kapazitätserweiterung ab. Die Zeilen und Spalten beschreiben die Kapazitätsgruppen und die Diagonale das reguläre Kapazitätsangebot der Kapazitätsgruppe. Die übrigen Zellen beschreiben

das Ausmaß der Kapazitätsflexibilität und quantifizieren die Kapazität, die in andere Kapazitätsgruppen verschoben werden kann. Die Kapazitätsgruppen in den Zeilen stellen die Quellen und die Kapazitätsgruppen in den Spalten die Senken dar. Die Zeile *max* am unteren Ende der KFM enthält die Kapazität bei maximaler Kapazitätserweiterung durch Akquirierung von Mitarbeitern aus anderen Kapazitätsgruppen. Die Spalte *min* enthält das Kapazitätsangebot bei maximaler Verschiebung von Mitarbeitern in andere Kapazitätsgruppen. Die Zelle rechts unten summiert die verfügbare Kapazität aller Kapazitätsgruppen auf. Folgendes Beispiel zeigt eine komplexere Situation der Mehrfachqualifizierung:

		KFM											
		MR	FR	BO	DR	SC	MS	SS	GH	SB	LA	OT	min
Manuelle Reparatur	MR	40	12	16	4								8
Fräsen	FR	6	30	24	21								0
Bohren	BO	4	12	40	20								4
Drehen	DR	14	42	35	70	7							0
Schleifen	SC					60	12	18	18				12
Montageschleifen	MS					6	55	6					44
Schaufelschleifen	SS					6	6	60	6				42
Gehäuseschleifen	GH					6	3	6	30				15
Schlussbefund	SB									40	12		28
Labor	LA										50		50
Oberflächentechnik	OT										8	80	72
max		64	96	115	115	85	76	90	54	40	70	80	555

Tabelle 13 Beispiel einer KFM der Teileinstandsetzung.

Für das Fräsen in der Tabelle 13 steht u. a. mehr als 100 % Potenzial für Kapazitätsverschiebung zur Verfügung. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass nicht nur zwei, sondern auch drei oder mehr Qualifizierungen für Mitarbeiter vorhanden sein können. Dies stellt den Steuerer vor ein Optimierungsproblem: Bei Disposition der Mitarbeiter auf eine Kapazitätsgruppe stehen sie für eine andere nicht mehr zur Verfügung. Dieses Optimierungsproblem ist Gegenstand der Ausführungen in Abschnitt 6.2.

Prüfung der Kapazitätsflexibilitätsmatrix auf Flexibilitätsdefizit durch Abgleich mit der Belastungsplanung:

Die Gegenüberstellung der Belastungsplanung mit der KFM ermöglicht es, ein mögliches Flexibilitätsdefizit der Kapazitätsgruppen zu erkennen. Abbildung 27 zeigt die Konfidenzintervalle der Belastungsplanung und den Planwert für alle Kapazitätsgruppen in einer Zeitperiode und stellt sie der Kapazitätsflexibilitätsmatrix gegenüber:

Belastungsplanung				
	KG1	KG2	KG3	Sum
Abw-	458	615	517	1590
\bar{x}	566	723	625	1914
Abw+	674	831	733	2238

KFM				
	KG1	KG2	KG3	min
KG1	500	50	30	420
KG2	50	800	50	700
KG3	50	50	700	600
max	600	900	780	2000

-85

-74

+86

Abbildung 27 Gegenüberstellung der Belastungsplanung und der Kapazitätsflexibilität in der KFM für eine Zeitperiode.

Folgende Prüfungen beschreiben den Kapazitätsabgleich mit der Kapazitätsflexibilitätsmatrix:

- Abgleich der Gesamtstunden: Das Beispiel zeigt einen Stundenbedarf von 1914 Stunden und ein Angebot von 2000 Stunden. Insgesamt reichen die Kapazitäten also aus.
- Abgleich der unteren Grenzen: Die untere Grenze der KFM (Spalte *min*) markiert den Wert, auf den die Kapazitätsgruppe durch Kapazitätsverschiebung reduziert werden kann. Weniger Belastung führt u. U. zu Produktivitätsverlusten, da Mitarbeiter nicht ausgelastet und nicht mehr versetzt werden können. Im obigen Beispiel zeigen die Kapazitätsgruppen KG2 und KG3 ein Defizit auf. KG2 kann nur auf 700 Stunden reduziert werden, wohingegen die Belastung auf 615 Stunden fallen könnte. KG3 kann auf 600 Stunden reduziert werden, wohingegen die Belastung auf 517 Stunden fallen könnte.
- Abgleich der oberen Grenzen: Analog zur unteren Grenze zeigt die Zeile *max* in der KFM das maximal mögliche Kapazitätsangebot durch Akquirierung von Mitarbeitern aus anderen Bereichen. Höhere Belastungen führen zu längeren Durchlaufzeiten aufgrund höherer Bestände in den Kapazitätsgruppen. KG1 kann maximal 600 Stunden zur Verfügung stellen, wohingegen die Belastungsplanung eine maximale Belastung von 674 Stunden ausweist.

Die Belastungsplanung zeigt die benötigte Flexibilität aufgrund der vorhandenen Unsicherheit und der Planungsprämissen der Produktionsplanung und -steuerung. Die KFM zeigt die vorhandene Flexibilität auf den Kapazitätsgruppen und bildet die möglichen Verschiebungen unter

den Kapazitätsgruppen ab. Der Soll-Ist-Abgleich zeigt Handlungsfelder für Maßnahmen zur Absicherung des Produktionsprogramms auf.

6.1.3 Umgang mit Flexibilitätsdefiziten

Die Interpretation des Kapazitätsabgleichs und die Ableitung der Maßnahmen sind die letzten Prozessschritte der Kapazitätsplanung unter Unsicherheit. Das Ergebnis des Kapazitätsabgleichs zeigt potenzielle Flexibilitätsdefizite auf und ermöglicht es der Planung, Maßnahmen zur Anpassung der Kapazitätsflexibilität zu ergreifen. Aufgrund der geringen Möglichkeiten der Belastungsflexibilität (vgl. Abschnitt 4.1) behandelt dieser Abschnitt diesbezüglich keine Maßnahmen. Nach Abschnitt 3.3 existieren drei Möglichkeiten zum Umgang mit Unsicherheit, die auf Instandhaltungsproduzenten übertragen werden können:

Informationsbeschaffung zur Reduzierung der Unsicherheit:

Die Informationsbeschaffung kann Unsicherheit reduzieren und somit die Konfidenzintervalle der Belastung verkleinern. Experteneinschätzungen, weitere Untersuchungen am Instandhaltungsobjekt oder Rückfragen beim Kunden können mehr Informationen zum Instandhaltungsereignis liefern. Neue Informationen ermöglichen der Planung die Bildung und Nutzung besserer Klassen mit geringerer Unsicherheit der Auftragszeiten.

Anpassung der Kapazitätsflexibilität:

Die Erhöhung oder Verringerung der Kapazitätsflexibilität erzeugt mehr oder weniger Potenzial zur Abstimmung der Kapazitäten und Verschiebung der Mitarbeiter in andere Kapazitätsgruppen. Dieser Abschnitt beschreibt sowohl die Anpassung der Arbeitszeit bei gleichbleibender Mitarbeiterqualifikation, als auch eine Methode zur Anpassung der Mitarbeiterqualifikation an das vorhandene Produktionsprogramm.

Meist benötigen die Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazitätsflexibilität einen beträchtlichen zeitlichen Vorlauf (Einstellung, Entlassung, Mehrfachqualifizierung) und eignen sich daher nicht für kurzfristiges Flexibilitätsdefizit. Die Veränderung der Arbeitszeit ist meist kurzfristig möglich, jedoch in Unternehmen oft mit Auflagen verbunden, die das Ausmaß der Veränderung begrenzen. Die Gleitzeit der Mitarbeiter ist eingeschränkt, muss vorab kommuniziert und in bestimmten Zeiträumen wieder ausgeglichen werden. Die Mehrarbeit am Wochenende muss meist vom Betriebsrat genehmigt werden und ist ebenfalls auf wenige Tage im Jahr begrenzt.

Der langfristige Abgleich der KFM mit der Belastungsplanung zeigt die erwarteten Veränderungen und den kumulierten Verlauf der Arbeitszeit über einen längeren Zeitraum. Maßnahmen können somit langfristig geplant, mit dem Betriebsrat abgestimmt und der Belegschaft kommuniziert werden.

Die Anpassung der Mitarbeiterqualifizierung verändert die Möglichkeiten der Verschiebungen von Kapazitäten unter den Kapazitätsgruppen und hat großen Einfluss auf die Entstehung von Unterlast- und Überlastsituationen. Kapazitätsgruppen in Unterlastsituationen können durch eine Erhöhung der Kapazitätsflexibilität in andere Kapazitätsgruppen verschoben und somit ausgelastet werden. Analog können Überlastsituationen durch größere Kapazitätsflexibilität durch andere Kapazitätsgruppen ausgeglichen werden. Diese Arbeit schlägt folgende Vorgehensweise zur Anpassung der Kapazitätsflexibilität vor:

- 1) Ermittlung der benötigten Mitarbeiterverschiebungen bei vollständiger Mehrfachqualifikation: Jede Zeitperiode erfordert unterschiedliche Mitarbeiterverschiebungen. Die tatsächlich benötigten Mitarbeiterverschiebungen über den Planungszeitraum bei vollständiger Flexibilität der Kapazitäten zeigen den Bedarf an Mehrfachqualifikation. Die benötigten Verschiebungen zeigen sowohl, welche Kapazitätsgruppen in den unterschiedlichen Kalenderwochen Mitarbeiter abgeben und wohin, als auch, wie viele Mitarbeiter sie aufnehmen und woher.
- 2) Ermittlung der Grenzen der KFM durch die Konfidenzintervalle der Belastungsplanung: Die Belastungsplanung ermittelt je Zeitperiode und Kapazitätsgruppe Konfidenzintervalle der geplanten Belastungen. Diese Intervalle zeigen je Kalenderwoche und Kapazitätsgruppe die maximale prozentuale Abweichung der Belastungen nach unten und nach oben auf. Diese prozentuale Abweichung definiert die untere bzw. die obere Grenze der KFM.
- 3) Anpassung der KFM nach den neuen Grenzen unter Berücksichtigung der benötigten geplanten Mitarbeiterverschiebungen: Die neuen Grenzen aus Punkt 2) und die tatsächlich benötigten Mitarbeiterverschiebungen aus Punkt 1) ergeben neue Rahmenbedingungen zur Anpassung der KFM. Meist beeinflussen weitere Kriterien eine Anpassung der KFM, wie technische Machbarkeit, Lohngruppen und persönliche Eignung der Mitarbeiter. Somit ist meist nur die heuristische Anpassung der KFM unter den neuen Rahmenbedingungen möglich.

Diese Schritte ergeben eine neue KFM und Maßnahmen zur Anpassung der Qualifizierung der Mitarbeiter. Durch die Nachvollziehbarkeit der Datengrundlagen, die Quantifizierung der Konsequenzen für die Planerfüllung und die Möglichkeit der Analyse von alternativen KFM können hohe Kosten der Qualifizierung von Mitarbeitern bewertet und nachgehalten werden. Abschnitt 7.3.3 führt diese Schritte anhand der Belastungsrechnung und KFM für eine Fallstudie durch und zeigt eine Verbesserung der Planerfüllung bei Anpassung der KFM ohne Erweiterung der durchschnittlichen Anzahl an Qualifizierungen pro Mitarbeiter.

Absicherung des Flexibilitätsdefizits:

Wenn das ermittelte Flexibilitätsdefizit nicht mit Maßnahmen der Informationsbeschaffung oder durch Anpassung der Kapazitätsflexibilität aufgelöst werden kann, kann es abgesichert werden. Notfallpläne und Prioritäten greifen bei Eintritt des Defizits, um negative Konsequenzen zu vermeiden. Bei mittel- bis langfristigem Flexibilitätsdefizit können auch spätere Planungszeitpunkte abgewartet werden, bevor u. U. doch weitere Anpassungsmaßnahmen bestimmt werden.

6.2 Kapazitätssteuerung unter Unsicherheit

Aufgaben der Kapazitätssteuerung sind die Einleitung von Maßnahmen zur Anpassung des Kapazitätsangebotes an die Belastung der Kapazitätsgruppen und der effiziente Einsatz der Kapazitätsflexibilität (Abschnitt 2.3 und [Lödd08]). Im Gegensatz zur Kapazitätsplanung entscheidet die Kapazitätssteuerung kurzfristig und auf Grundlage der aktuellen tatsächlichen Situation der Belastungen und Kapazitäten. Dieser Abschnitt erläutert zwei Möglichkeiten zur Konfiguration der Kapazitätsteuerung in der Instandhaltungsproduktion: die Implementierung einer Rückstandsregelung und die Nutzung der Kapazitätsflexibilitätsmatrix zur kurzzyklischen Bestimmung des Mitarbeiterereinsatzes. Beide Möglichkeiten schließen sich gegenseitig nicht aus und können bei gemeinsamer Implementierung eine wirksame Kapazitätssteuerung bilden.

6.2.1 Implementierung einer Rückstandsregelung für die Instandhaltungsproduktion

Abschnitt 2.3 beschreibt die Rückstandsregelung mit den Aufgaben der Rückstandsmessung und der Auswahl der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung. Diese Arbeit beschreibt keine konkrete Ausprägung einer Rückstandsregelung, sondern weist auf drei Besonderheiten der Instandhaltungsproduktion hin, die in einer Rückstandsregelung Beachtung finden müssen:

Große Auftragszeiten erfordern es, Rückstände kontinuierlich zu messen.

Die Auftragszeiten der Instandhaltungsproduktion sind meist sehr groß. Der Arbeitsplan der Demontage einer Industriegasturbine umfasst z. B. Arbeitsvorgänge von bis zu 500 Minuten. Arbeitsvorgänge der Qualitätssicherung übersteigen oft die Arbeitszeit eines Tages und beschäftigen mehrere Mitarbeiter. Die Rückstandsmessung muss daher auf begonnene Arbeiten erweitert werden, um keine falschen Rückstände auszuweisen.

Hohe Unsicherheit mit groben Planungsgrößen erhöht die Gefahr von Rückständen.

Die Rückstandsmessung kann mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden und zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt werden. Eine grobe Klassifizierung der Auftragszeiten in der Planung erschwert den Vergleich der tatsächlichen Abarbeitung mit dem groben Planwert und verhindert eine kurzzyklische Messung der Rückstände. Andererseits vergrößern hohe Unsicherheiten der Auftragszeiten die Gefahr von großen Belastungsveränderungen auf den Arbeitssystemen und erfordern somit diese kurzzyklische Messung. Die kontinuierliche Verfeinerung der groben Klassen in der kurzfristigen Planung ist daher notwendig, um den Anforderungen hoher Unsicherheit gerecht zu werden und zeitnah Rückstände auszugleichen.

Große Schwankungen in der mittleren Belastung der Arbeitssysteme müssen mit berücksichtigt werden.

Die Instandhaltungsproduktion ist nicht nur von hohen Unsicherheiten geprägt, sondern auch von hohen Belastungsschwankungen (siehe Abschnitt 1.1). Der Variationskoeffizient der Belastungen je Kalenderwoche beträgt ca. 40 bis 50 % (Daten aus der Fallstudie in Abbildung 30) über einen Planungszeitraum von 21 Wochen. Eine sehr große Belastung in einer Kalenderwoche und eine sehr geringe Belastung in der Folgewoche können aufeinandertreffen und die

Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität beeinflussen. Mehrarbeit in der einen Woche könnte Produktivitätsverlust in der Folgewoche bedeuten, wohingegen keine Mehrarbeit u. U. Terminverzüge zur Folge hätte. Die Berücksichtigung der kurzfristigen geplanten Belastungsschwankungen kann die Bewertung der Maßnahmen der Rückstandsregelung bereichern.

6.2.2 Kurzyklische Bestimmung des Mitarbeiterereinsatzes durch die Kapazitätsflexibilitätsmatrix

Die Rückstandsregelung orientiert sich an der tatsächlich geleisteten Arbeit der Fertigung. Eine weitere Möglichkeit der Kapazitätssteuerung besteht darin, die tatsächlich anstehenden Fertigungsaufträge zu berücksichtigen, also vor Abarbeitung in der Fertigung. Die Maßnahmen der Kapazitätssteuerung erfordern es, die tatsächliche Belastungs- und Kapazitätssituation zu ermitteln (Abschnitt 2.3). Der frühzeitige und kurzyklische Abgleich der Belastungsplanung mit der KFM ermöglicht es, die aktuellsten Informationen zu verarbeiten, um die Kapazitäten an die tatsächlichen Belastungen anzupassen.

Neben dieser Anpassung muss die Kapazitätssteuerung die Mitarbeiterdisposition vornehmen. Bei hoher Mehrfachqualifizierung der Mitarbeiter ergibt sich hier ein lineares Optimierungsproblem (vgl. zur linearen Optimierung [Zimm08]): Bestimme den Mitarbeiterereinsatz so, dass die Mitarbeiterverschiebungen und die Veränderung der Arbeitszeit minimal sind, der Arbeitsvorrat abgearbeitet wird und die Kapazitätsrestriktionen eingehalten werden.

Die Zielfunktion (ZF) dieses Modells maximiert den Anteil der Mitarbeiter auf den originären Arbeitsplätzen bei gleichzeitiger Minimierung der Veränderung der Arbeitszeit. Der Faktor α ermöglicht es, Arbeitszeitveränderungen mehr ($\alpha > 1$) oder weniger ($\alpha < 1$) zu bestrafen. Ein hoher Wert von α ermöglicht es Unternehmen, zunächst alle Möglichkeiten der Mehrfachqualifikation auszuschöpfen, bevor Arbeitszeiten von Mitarbeitern verändert werden.

$$\text{ZF: } \quad \text{maximiere } Z = \sum_{i=1}^k \text{ME}(i,i) - (\sum_{i=1}^k \Delta \text{AZF}(i) * \alpha) \quad (6.1)$$

Die Disposition der Mitarbeiterkapazität und die Arbeitszeit der Kapazitätsgruppen beschreiben die Variablen (VA) in diesem Modell. Der Mitarbeiterereinsatz (ME) beschreibt die Kapazitätsverschiebung von der Kapazitätsgruppe i in der Kapazitätsgruppe j :

$$\text{VA1: } \quad \text{ME}(i,j) \in \mathbb{R} \quad (6.2)$$

Der Arbeitszeitfaktor (AZF) definiert die Arbeitszeit der Mitarbeiter einer Kapazitätsgruppe i . Ein Arbeitszeitfaktor von 120 % erhöht z. B. die Arbeitszeit der Kapazitätsgruppe um 20 %. In diesem Modell sind die Werte des AZF in einem Wertebereich von 0,7 bis 1,3 definiert und ermöglichen es somit, die Kapazität der Kapazitätsgruppe auf 70 % zu reduzieren und auf 130 % zu erhöhen.

$$\text{VA2: } \text{AZF}(i) \in [0,7, \dots, 1,3] \quad (6.3)$$

Vier Randbedingungen (RB) gelten für das Optimierungsmodell. RB1 gibt vor, dass die vorhandene Kapazität der Kapazitätsgruppe nicht überschritten werden darf:

$$\text{RB1: } \sum_{j=1}^k \text{ME}(i,j) \leq \text{KFM}(i,i) \quad (6.4)$$

RB2 stellt sicher, dass das durch die Mitarbeiterdisposition entstehende Kapazitätsangebot ($\text{ME}(i,j)$) der Belastung (B) der Kapazitätsgruppe entspricht:

$$\text{RB2: } \sum_{i=1}^k \text{ME}(i,j) = B(j) \quad (6.5)$$

RB3 definiert, dass die Verschiebung der Mitarbeiter ($\text{ME}(i,j)$) nicht größer sein darf, als die mögliche Kapazitätsflexibilität in der Kapazitätsflexibilitätsmatrix (KFM):

$$\text{RB3: } \text{ME}(i,j) \leq \text{KFM}(i,j) \quad (6.6)$$

RB4 beschreibt die Nichtnegativität der Werte des Mitarbeiterereinsatzes:

$$\text{RB4: } \text{ME}(i,j) \geq 0 ; \quad (6.7)$$

Abbildung 28 stellt die oben beschriebenen Elemente des Optimierungsmodells dar und zeigt ein Beispiel zur Optimierung der Mitarbeiterdisposition.

Mitarbeitereinsatz				
Belastung		B(j)		$\sum B(j)$
	KG(i)	AZF	KG(j)	Summe
		AZF(i)	ME(i,j)	$\sum ME(j)$
Kapazität		$\sum ME(i)$		

a) theoretisches Modell der Matrix zur Optimierung des Mitarbeitereinsatzes

Belastung		21	33	23	77	
	KG1	AZF	KG1	KG2	KG3	Summe
		KG1	1,0	20	2	
KG2	0,8		26	6		32
KG3	1,2	1	5	17		23
Kapazität		21	33	23	77	

b) Beispiel einer Matrix zur Optimierung des Mitarbeitereinsatzes

B: Belastung in [h] ME: Mitarbeitereinsatz in [h]
 KG: Kapazitätsgruppe AZF: Arbeitszeitfaktor

Abbildung 28 Matrix zum Mitarbeitereinsatz: a) zeigt das theoretische Modell und b) zeigt ein Beispiel.

Die Ermittlung des Flexibilitätsdefizits in der Kapazitätsabstimmung (Abschnitt 6.1.2) und das Optimierungsmodell in diesem Abschnitt ermöglichen die enge Zusammenarbeit der Planung und Steuerung. Die Planung prüft vorrangig Grenzen der Flexibilität mit den Unsicherheiten der Belastungsplanung. Die Steuerung definiert den optimalen Mitarbeitereinsatz, um die Machbarkeit des Produktionsprogrammes sicherzustellen. Die Ergebnisse beider Vorgänge ergeben ein Gesamtbild zur Kapazitätssituation des Produktionsprogrammes. Die Validierung des Optimierungsmodells erfolgt in Abschnitt 7.3.2 im Rahmen der Ermittlung der benötigten Kapazitätsflexibilität. Außerdem findet es im Abschnitt 7.4 zur Bestimmung der Mitarbeiterdisposition und Arbeitszeit Anwendung.

7 Übertragung auf Ausprägungen der Instandhaltungsproduktion

Um die Zusammenhänge und Abläufe in dieser Arbeit zu veranschaulichen und exemplarisch zu validieren, führt dieses Kapitel drei Fallstudien durch. Unterschiedliche Rahmenbedingungen der Fallstudien zeigen die notwendige Vielseitigkeit und Variabilität der vorgestellten Methodik im Umgang mit Unsicherheit.

Abschnitt 7.1 beschreibt die Rahmenbedingungen der Fallstudien und stellt Besonderheiten heraus, die in die Interpretation der Ergebnisse einfließen.

Abschnitt 7.2 führt die Effektberechnung nach Abschnitt 5.2 durch und liefert die Effekte der Informationen auf die Unsicherheit der Auftragszeiten. Die Ergebnisse ermöglichen die Interpretation der Effekte aller Fallstudien und Ableitung der Planungsperioden.

Abschnitt 7.3 erstellt für die Kapazitätsgruppen die Belastungsrechnung mit asymmetrischen Konfidenzintervallen nach Abschnitt 6.1.1. Die tatsächlichen Belastungen der Fallstudie ermöglichen die Validierung der Belastungsplanung. Der Kapazitätsabgleich beschreibt das entstehende Flexibilitätsdefizit der Kapazitätsgruppen und ermittelt auf Grundlage des linearen Optimierungsmodells aus Abschnitt 6.2.2 die Mitarbeiterverschiebungen und Arbeitszeitveränderungen. Die Anpassung der Kapazitätsflexibilität aufgrund der Belastungsplanung nimmt dieser Abschnitt anhand der Daten der Fallstudie vor und validiert somit die Vorgehensweise aus Abschnitt 6.1.3.

Abschnitt 7.4 ermittelt die benötigte Mitarbeiterdisposition auf Wochentiefe und bestimmt exemplarisch die Anpassung der Arbeitszeit für eine Woche der Fallstudie.

7.1 Rahmenbedingungen der Fallstudien

Dieser Abschnitt beschreibt die Rahmenbedingungen der Fallstudien, die zur Definition der Effektberechnung und zum Verständnis der Interpretation wichtig sind. Drei Fallstudien dienen dieser Arbeit als Beispiele der Instandhaltungsproduktion: die Instandhaltung von Industriegasturbinen, die Instandhaltung von Flugzeugtriebwerken regionaler Luftfahrtunternehmen und die Instandhaltung von Flugzeugtriebwerken privater und gewerblicher Kunden.

Fallstudie 1 – Instandhaltung von Industriegasturbinen (IGT):

Ein Dienstleister für Industriegasturbinen hatte im Zeitraum von 30 Monaten 192 Instandhaltungsereignisse in drei Produktvarianten von 85 Kunden. Drei Ursachen für die Instandhaltung und neun Leistungsausprägungen wurden für die Produkte definiert. Die Produkte unterteilen sich in durchschnittlich 40 Baugruppen, bestehen voll zerlegt aus ca. 3000 Bauteile und verursachen Auftragszeiten von 300 h bis 3000 h. Die Durchlaufzeit der Projekte betrug 40 bis 200 Kalendertage.

Die Produkte werden bereits seit vielen Jahren produziert und weisen eine ausgereifte Technik, eine gute Ersatzteilversorgung und etablierte Reparaturverfahren auf. Die Kunden des Dienstleisters sind weltweit vertreten und nutzen die Industriegasturbinen zur Energieerzeugung auf Ölplattformen, als Schiffsantriebe oder als Pumpen für Pipelines oder Förderstationen. Die Preissensibilität der Kunden ist gering, da die Stillstandszeiten der Produktions- oder Förderanlagen deutlich höhere Kosten verursachen als die Instandhaltung. Termintreue ist dem Kunden somit wichtig, wobei vereinbarte, auch längere Durchlaufzeiten durch die Bereitstellung von Ersatzprodukten aufgefangen werden können.

Industriegasturbinen orientieren sich an den Regularien für Flugzeugtriebwerke, da die Bauteile und die Konstruktion größtenteils identisch sind. Somit gelten für Industriegasturbinen oft die hohen Standards der Luftfahrt für Sicherheit und Nachverfolgbarkeit der Arbeiten an den technischen Geräten. Durch die komplexe Technik und die speziellen Einsatzgebiete der Industriegasturbinen ist die Zahl der Hersteller begrenzt. Auch Reparaturen und Ersatzteilversorgung beschränken sich auf wenige Anbieter, wobei die Nähe zu den Luftfahrtantrieben Möglichkeiten zur Nutzung weiterer Dienstleister eröffnet.

Der Dienstleister nutzt zurzeit wenige Maßnahmen zur Beschaffung von Informationen vor dem Auftragsstart. Neben den Produkt- und Kundeninformationen werden nur der Grund der Instandhaltung und die technischen Dokumente des Auftrags zur Ermittlung des Leistungsumfanges genutzt. Der Leistungsumfang wird zunächst sehr grob aus der Ursache der Instandhaltung abgeleitet und erst nach Zerlegung in Baugruppen genauer beschrieben. Maschinen mit gleicher Ursache der Instandhaltung weisen eine sehr große Streuung der Auftragszeiten auf.

Fallstudie 2 – Instandhaltung von Flugzeugtriebwerken regionaler Luftfahrtunternehmen (FRL):

Der Dienstleister hatte im Zeitraum von 30 Monaten 262 Instandhaltungsereignisse in drei Produktvarianten von 34 Kunden. Drei Ursachen für die Instandhaltung und 16 Leistungsausprägungen wurden für die Produkte definiert. Die Produkte unterteilen sich in durchschnittlich 15 Baugruppen, bestehen voll zerlegt aus ca. 3000 Bauteile und verursachen Auftragszeiten von 100 h bis 3500 h. Die Durchlaufzeit der Projekte betrug 25 bis 100 Kalendertage.

Die drei Produktvarianten befinden sich in unterschiedlichen Phasen im Lebenszyklus eines Flugzeugtriebwerks. PR01 ist ein etabliertes Produkt mit weltweiter Verbreitung und gefestigten Leistungsumfängen. PR02 ist ein neueres Produkt mit Triebwerken, für die erste Überholungen beauftragt werden. PR03 ist ein sehr neues Produkt mit kleinen, unklaren Leistungsumfängen und sporadischen Instandhaltungsmaßnahmen.

Die Kunden des Dienstleisters schließen meist Verträge über mehrere Instandhaltungsereignisse mit Vertragsbedingungen zu festen Preisen, festgelegten Leistungsumfängen und ohne Bezug auf den tatsächlichen Schadensfall des Triebwerkes ab. Die Konkurrenz der Anbieter für Instandhaltungsmaßnahmen für diese Produkte ist groß, weshalb der Dienstleister eine große Bandbreite an Leistungsumfängen anbietet, um den Kundenwünschen gerecht zu werden. Die Informationen zu den Instandhaltungsereignissen sind umfangreich und detailliert. Meist besteht eine gute Kommunikation mit den Kunden, die vor Lieferung des Instandhaltungsobjektes Informationen wie Logbuch, Leistungskennzahlen des Triebwerks oder Pilotenberichte übergeben.

Fallstudie 3 – Instandhaltung von Flugzeugtriebwerken privater und gewerblicher Kunden (FPG):

Der Dienstleister hatte im Zeitraum von 30 Monaten 462 Instandhaltungsereignisse in vier Produktvarianten von 153 Kunden. Drei Ursachen für die Instandhaltung und 7 Leistungsausprägungen wurden für die Produkte definiert. Die Produkte unterteilen sich in durchschnittlich 15 Baugruppen, bestehen voll zerlegt aus ca. 3000 Bauteile und verursachen Auftragszeiten von 10 h bis 2000 h. Die Durchlaufzeit der Projekte betrug 20 bis 100 Kalendertage.

Alle Produkte des Dienstleisters sind auf dem Markt etabliert und haben gefestigte Leistungsumfänge. Die mittlere Auftragszeit der Produkte ist jedoch sehr unterschiedlich (PR01 ca. 200 h

und PR03 ca. 1000 h). Das Kundenspektrum ist sehr groß und auch von privaten Kunden geprägt. Insbesondere diese privaten Kunden weisen ein sehr unterschiedliches und unberechenbares Entscheidungsverhalten auf und verursachen Verzögerungen im Auftragsdurchlauf sowie Veränderungen des Leistungsumfangs. Vor dem Leistungsstart sind Informationen zum Instandhaltungsobjekt kaum vorhanden und oft lücken- und fehlerhaft. Aufgrund der geringen Anzahl von Instandhaltungsereignissen je Kunde existieren keine etablierten Kommunikationsprozesse zwischen den Kunden und dem Dienstleister. Aktuell führt der Dienstleister bei Auftragsstart wenige Untersuchungen zum konkreten Schadensfall durch und erweitert so im Laufe der Demontage den Leistungsumfang der Produkte.

7.2 Effektberechnung und Klassifizierung

Die Effektberechnung in diesem Abschnitt nutzt die Methode in Abschnitt 5.2 und stellt die Effekte der Informationen auf die Unsicherheit der Auftragszeiten dar. Die Ergebnisse der Effektberechnung fließen in die Klassifizierung der Planungsgröße ein und definieren die Planungszeitpunkte der Fallstudien.

7.2.1 Effektberechnung

Dieser Abschnitt nutzt eine einheitliche Einstellungstabelle (Tabelle 14) für alle Fallstudien. Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Fallstudien könnten durch individuelle Einstellungstabellen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse bei einheitlicher Faktoreinstellung zeigen jedoch ebenfalls die Unterschiede auf und ermöglichen die Abbildung der Vielseitigkeit der Methode in Auswertung und Interpretation.

Faktor		Faktoreinstellung		Beispiel
		-	+	
Produktdetail	PD	Gesamt Produkt	/ Gesamt Produkt	PR01, PR21, PR24
Arbeitssystem	AS	Kapazitätsgruppe	/ Kapazitätsgruppe	KGXX, KGMF, KGHH
Produkt	P	<i>nicht berücksichtigt</i>	/ Variante	PR01, PR21, PR24
Kunde	K	<i>nicht berücksichtigt</i>	/ Name	KD01, KD04, KD05
Vertrag	V	<i>nicht berücksichtigt</i>	/ Art	nach Zustand, Fixpreis
Ursache	U	<i>nicht berücksichtigt</i>	/ Ursache	Reparatur, Überholung
Leistungsumfang	L	<i>nicht berücksichtigt</i>	/ Produkt	WS01, WS02, WS03

Tabelle 14 Faktoreinstellung für die Effektberechnung der Fallstudien.

Die Faktorausprägung in Tabelle 14 zeigt eine konstante Detailtiefe der Versuche und summiert Belastungen auf Produkttiefe und auf Kapazitätsgruppe. Unterschiedliche Faktoreinstellungen in der Detailtiefe müssten in separaten Versuchen geplant werden (Abschnitt 5.2). Für den Faktor Produkt wird der Einfluss der Produktvariante untersucht und der Vernachlässigung des Faktors gegenübergestellt. Der Faktor Kunde unterscheidet den Einfluss der Kundennamen und den Einfluss bei Vernachlässigung des Faktors auf die Unsicherheit. Die Vertragsart repräsentiert die detaillierte Faktorausprägung des Faktors Vertrag. Ursache und Leistungsumfang unterscheiden wiederum jeweils den Effekt bei Vernachlässigung und den Effekt bei Berücksichtigung der Ursache der Instandhaltung bzw. des Leistungsumfangs des Produktes.

Tabelle 3 aus Abschnitt 5.2 beschreibt den Versuchsplan mit 5 Faktoren und dient allen Fallstudien als Grundlage der Versuchsdurchführung. Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Versuchsdurchführung:

Fallstudie 1 - IGT			Fallstudie 2 - FRL			Fallstudie 3 - FPG		
Basisunsicherheit: 93%			Basisunsicherheit: 67%			Basisunsicherheit: 97%		
Faktor	Effekt	Sign.	Faktor	Effekt	Sign.	Faktor	Effekt	Sign.
K	-9,5%	***	L	-7,0%	***	K	-16,5%	***
L	-7,7%	***	K	-6,6%	***	P	-10,7%	***
P	-5,2%	***	P	-3,4%	***	U	-7,5%	***
U	-3,5%	***	U	-1,7%	***	L	-5,9%	***
PV	-2,0%	*	PL	-1,2%	***	KL	-2,6%	***
VU	-1,1%	-	VL	-0,9%	**	PL	-0,8%	-
KV	-0,6%	-	KU	-0,3%	-	KU	-0,7%	-
VL	-0,4%	-	KL	-0,1%	-	V	-0,3%	-
PL	0,2%	-	PK	-0,1%	-	PU	0,0%	-
V	0,4%	-	KV	0,1%	-	KV	0,0%	-
PU	0,6%	-	PU	0,1%	-	VL	0,3%	-
KU	2,0%	*	VU	0,2%	-	VU	0,7%	-
UL	3,5%	***	PV	0,5%	-	PV	0,7%	-
KL	3,7%	***	V	0,6%	*	UL	7,5%	***
PK	3,8%	***	UL	1,5%	***	PK	8,7%	***

a) Fallstudie 1 - IGT

b) Fallstudie 2 - FRL

b) Fallstudie 2 - FRL

Sign.: Signifikanzbewertung

P: Produkt K: Kunde V: Vertrag U: Ursache L: Leistungsumfang

Tabelle 15 Effekte der Faktoren und Bewertung je Fallstudie.

Die Tabelle 15 fasst die Ergebnisse der Effektberechnung für alle Fallstudien zusammen und ordnet die Effekte jeweils aufsteigend an. Zur Ermittlung der Signifikanz werden alle Effekte mit der Zufallsstreuung verglichen. Faktoren mit geringen Effekten ergeben diese Zufallsstreuung. Die Zufallsstreuung ermöglicht die Bildung der Vertrauensintervalle nach Formel (5.4) und die Bewertung der Effekte (Abschnitt 5.2).

7.2.2 Interpretation der Ergebnisse und Klassifizierung

Anhand dieser Ergebnisse kann die Studie geeignete Einflussfaktoren für die Klassifizierung auswählen und die Klassen bilden:

Die Effekte in Fallstudie 1 legen die Faktoren P , K und L als Klassifizierungskriterien nahe. Der Faktor Ursache U hat ebenfalls einen großen Effekt auf die Reduzierung der Unsicherheit, löst aber bei Kombination mit dem Faktor L eine Verminderung der Einzeleffekte aus (Wechselwirkungseffekt UL mit $+3,5\%$) und wird somit wirkungslos. Die Effekte P , K und L lösen ebenfalls negative Wechselwirkungseffekte aus (PK : $3,8\%$ und PL : $3,7\%$). Somit ergibt sich der Gesamteffekt der Kombination aus P , K und L :

$$\text{Fallstudie 1: } E_K + E_L + E_P + (E_{PL} + E_{KL} + E_{PK}) = -\mathbf{14,7\%}$$

Analog zu den Ausführungen in Abschnitt 5.2 können auf Basis dieser Ergebnisse die Planungszeitpunkte festgelegt werden. Fallstudie 1 benötigt den Leistungsumfang zur Bildung der optimalen Klassen nach gegebener Faktoreinstellung. Der Leistungsumfang wird kurz vor Auftragsfreigabe ermittelt, wobei davor nur die Ursache der Instandhaltung verfügbar ist. Somit kann die Unsicherheit bzw. der Variationskoeffizient vor Auftragsfreigabe mit den Faktoren P , K und U um $9,6\%$ auf $83,4\%$ verringert werden. Bei Auftragsfreigabe reduziert die Klassifizierung mit den Faktoren P , K und L den Variationskoeffizienten um $14,7\%$ auf $78,3\%$.

In Fallstudie 2 gilt die gleiche Argumentation zur Auswahl der Faktoren wie in Fallstudie 1. Die Wechselwirkungseffekte sind allerdings hier nicht so negativ und unterstützen sogar die Reduzierung der Unsicherheit. Folgender Gesamteffekt ergibt sich für die Klassifizierung in Fallstudie 2:

$$\text{Fallstudie 2: } E_L + E_K + E_P + (E_{PL} + E_{KL} + E_{PK}) = -\mathbf{18,4\%}$$

Analog zur Fallstudie 1 sind die Planungszeitpunkte vor Auftragsfreigabe und bei Auftragsfreigabe. Vor Auftragsfreigabe reduziert die Faktorkombination P , K und U den Variationskoeffizienten um 12,0 % auf 55 %. Nach Auftragsfreigabe vermindert sich der Variationskoeffizient um 18,4 % auf 48,6 % mit der Faktorkombination P , K und L .

In Fallstudie 3 weisen wiederum die Faktoren K und P hohe Effekte auf die Unsicherheit auf. Die Ursache der Instandhaltung U hingegen liefert in dieser Fallstudie einen größeren Effekt als der Leistungsumfang L . Auffällig ist auch der deutliche Unterschied zwischen den wahren und den zufälligen Effekten. Die hohen Wechselwirkungseffekte PK und UL zeigen eine hohe Redundanz der betroffenen Faktoren auf und deuten auf Optimierungspotenzial bei der Faktorauswahl hin. Folgender Gesamteffekt ergibt sich aus der Nutzung der Faktoren P , K und U bzw. L :

$$\text{Fallstudie 3: } E_K + E_P + E_L + (E_{KL} + E_{PL} + E_{PK}) = -27,9 \%$$

$$E_K + E_P + E_U + (E_{KU} + E_{PU} + E_{PK}) = -26,8 \%$$

Im Gegensatz zu den Fallstudien 1 und 2 legen die Ergebnisse keinen weiteren Planungszeitpunkt zum Auftragsstart nahe, da sich dadurch der resultierende Variationskoeffizient nicht merklich verringern würde.

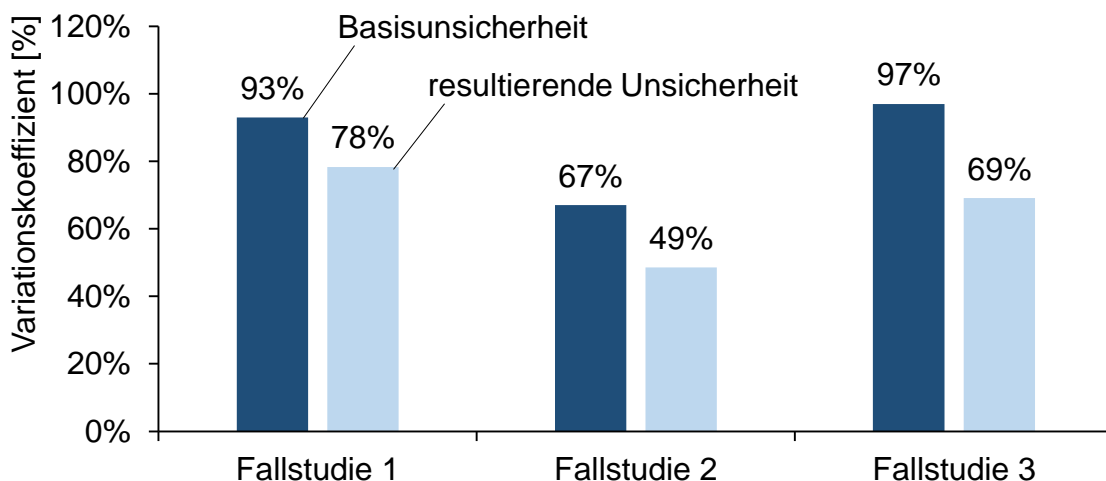


Abbildung 29 Basisunsicherheit und resultierende Unsicherheit für die Fallstudien.

Die Faktorkombination in der Einstellungstabelle (Tabelle 14) ermöglicht nur eine beschränkte Aussage zu Planungszeitpunkten. Die Durchführung der Effektberechnung mit einer detaillierten Faktoreinstellung auf der Basis der Informationen von Demontage und Befund erlaubt die Identifizierung weiterer geeigneter Planungszeitpunkte.

Tabelle 16 zeigt einen Auszug aus den insgesamt 169 Klassen der Fallstudie 1 mit den ermittelten Klassifizierungskriterien. Der Programmcode im Anhang auf Seite 141 ermittelt die Klassen und die resultierenden Parameter:

Klasse	Detailtiefe		Einflusskriterien			Parameter		
Nr.	PD	AS	P	K	L	\bar{x}	σ	s
	-		-	-	-	[h]	[h]	-
1	Gesamt	KG01	PR01	KD03	REP	71	9,4	-0,1
2	Gesamt	KG01	PR01	KD05	OVH	102	24,7	0,6
3	Gesamt	KG01	PR01	KD05	REP	92	52,1	1,1
4	Gesamt	KG01	PR01	KD01	OVH	80	32,2	-0,3
5	Gesamt	KG01	PR01	KD01	REP	96	32,2	1,8
6	Gesamt	KG02	PR01	KD03	REP	90	19,2	0,5
7	Gesamt	KG02	PR01	KD05	OVH	191	64,7	0,7
8	Gesamt	KG02	PR01	KD05	REP	98	61,6	0,2
9	Gesamt	KG02	PR01	KD01	OVH	151	31,8	-0,5
10	Gesamt	KG02	PR01	KD01	REP	125	42,4	-0,5
11	Gesamt	KG21	PR01	KD03	REP	148	34,9	-0,1
12	Gesamt	KG21	PR01	KD05	OVH	192	46,8	1,3
13	Gesamt	KG21	PR01	KD05	REP	119	68,7	0,6
14	Gesamt	KG21	PR01	KD01	OVH	167	63,2	-0,5
15	Gesamt	KG21	PR01	KD01	REP	147	43,6	-0,8
16	Gesamt	KG40	PR01	KD03	REP	83	93,9	0,0
17	Gesamt	KG40	PR01	KD05	OVH	318	143,2	-0,4
18	Gesamt	KG40	PR01	KD05	REP	167	144,5	1,1
19	Gesamt	KG40	PR01	KD01	OVH	289	103,3	-1,5
20	Gesamt	KG40	PR01	KD01	REP	186	106,8	0,3
21	Gesamt	KG41	PR01	KD03	REP	50	50,9	0,0
22	Gesamt	KG41	PR01	KD05	OVH	141	55,6	-0,6
23	Gesamt	KG41	PR01	KD05	REP	116	70,2	1,1
24	Gesamt	KG41	PR01	KD01	OVH	134	62,9	-0,9
25	Gesamt	KG41	PR01	KD01	REP	120	67,0	-0,1

PD: Produktdetail AS: Arbeitssystem

P: Produkt K: Kunde L: Leistungsumfang

REP: Repair OVH: Generalüberholung

Tabelle 16 Auszug aus den ermittelten Klassen der Fallstudie 1: Produkt *PR01* für alle Kunden und Leistungsumfänge *REP* und *OVH*.

Die Ergebnisse in Tabelle 16 zeigen für unterschiedliche Einflusskriterien die ermittelte Planauftragszeit (\bar{x}), Standardabweichung (σ) und Schiefe (s) der Klasse. Für Kapazitätsgruppe

KG40 zeigt sich ein deutlicher Kundeneinfluss auf die Planauftragszeiten. Für die Reparaturaufträge (REP) der KG40 erstreckt sich die Planauftragszeit von 83 Stunden (Klasse Nr. 16) bis 186 Stunden (Klasse Nr. 20). Für die Reparaturaufträge (REP) der KG41 erstreckt sich die Planauftragszeit von 50 Stunden (Klasse Nr. 21) bis 120 Stunden (Klasse Nr. 25). Diese Beispiele verdeutlichen, dass die Auswahl der richtigen Klassifizierungskriterien ausschlaggebend für die Definition einer Planauftragszeit mit möglichst geringer Unsicherheit ist.

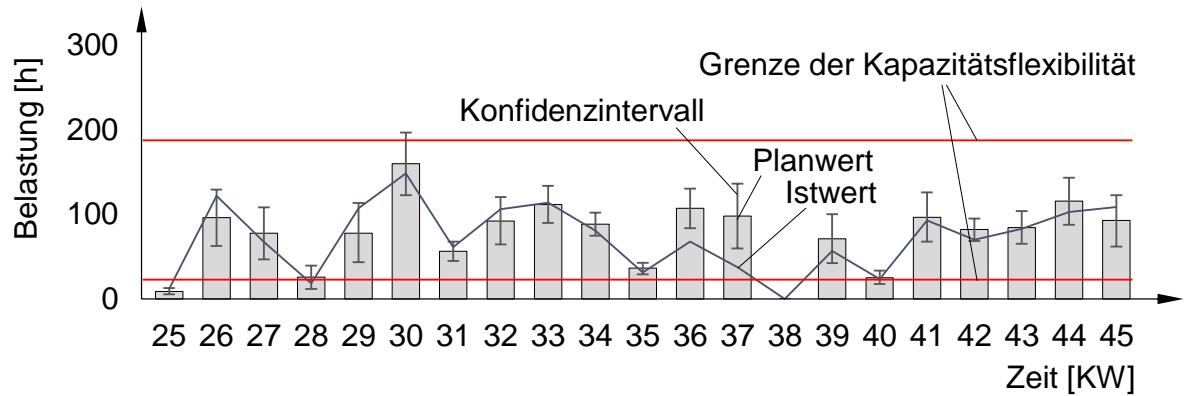
Mit der Übersicht in Tabelle 16 können Experten die Plausibilität der Ergebnisse überprüfen. Hohe Schiefe- und Streuungsparameter sind evtl. ein Hinweis auf weitere noch ungeprüfte Effekte auf die Auftragszeiten der IHE. Letztendlich liefern die Parameter der Klassen die Grundlage für die Kapazitätsplanung unter Unsicherheit.

7.3 Kapazitätsplanung

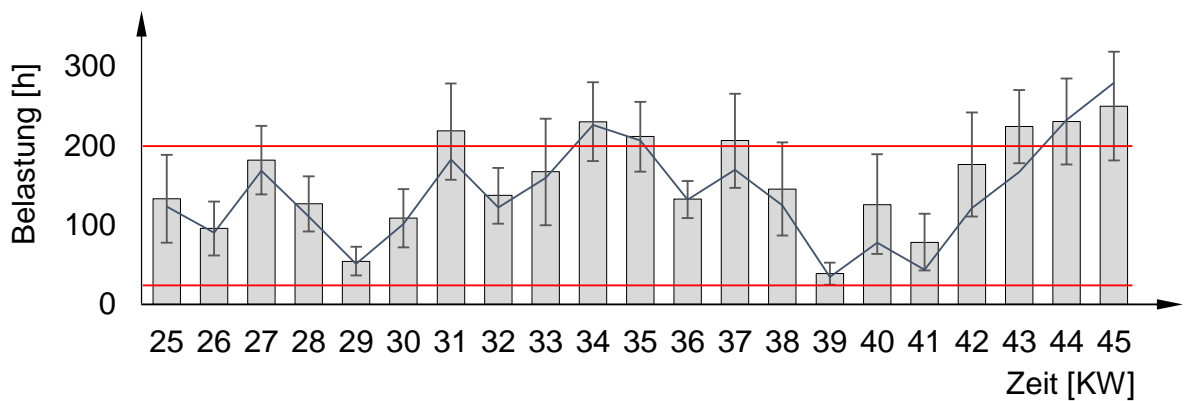
Dieser Abschnitt führt die Belastungsplanung und Kapazitätsabstimmung nach Abschnitt 6.1 durch und ermittelt das Flexibilitätsdefizit der Fallstudien.

7.3.1 Belastungsplanung

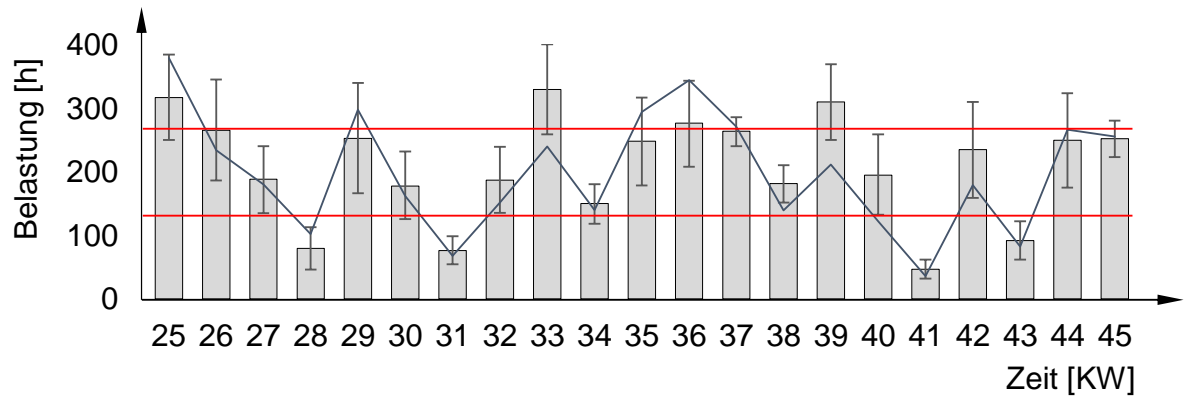
Die Belastungsrechnung verteilt die Belastungen der Klassen nach den realen Terminiindaten der IHE über einen Zeitraum von einem Jahr (Abschnitt 6.1.1). Die Faltungsregeln ermöglichen die unterschiedliche Aggregation der Ergebnisse auf Tage, Wochen und Monate. Die tatsächlichen Belastungen der Kapazitätsgruppen ermöglichen die Bewertung der Ergebnisse der Planung unter Unsicherheit. Abbildung 30 zeigt einen Auszug der Belastungsplanung der Fallstudie 1 mit asymmetrischen Konfidenzintervallen bei einem Konfidenzniveau von 80 % auf Wochen aggregiert. Die aktuellen Grenzen der Kapazitätsflexibilität je Kapazitätsgruppe sind in den Diagrammen mit roten Linien gekennzeichnet.



a) Belastungsplanung der Demontage Produkt



b) Belastungsplanung der Demontage Baugruppen



c) Belastungsplanung der Befundung

Abbildung 30 Auszug aus der Belastungsplanung der Fallstudie 1: Geplante und tatsächliche Belastung der Kapazitätsgruppen mit Konfidenzintervallen (80 % Konfidenzniveau) und Grenzen der Kapazitätsflexibilität.

Die tatsächliche Belastung liegt teilweise innerhalb und teilweise außerhalb der Konfidenzintervalle. Tabelle 17 zeigt für alle Fallstudien und Kapazitätsgruppen den prozentualen Anteil der Wochen, in denen die tatsächlichen Belastungen innerhalb der Konfidenzintervalle liegen:

IGT			FRL			PGL	
Demontage Produkt	KG01	86%	Demontage	KG03	86%	Demontage	76%
Demontage Baugruppe	KG02	84%					
Befund	KG21	82%	Befund	KG22	79%	Befund	76%
Montage Baugruppe	KG40	86%	Montage Rotor	KG43	88%		
			Montage Stator	KG44	85%	Montage Gruppe A	80%
Montage Produkt	KG41	80%	Montage Produkt	KG45	86%	Montage Gruppe B	83%
Gesamt		84%	Gesamt		83%	Gesamt	79%

Tabelle 17 Anteil der Wochen in der Planung, in denen die tatsächliche Belastung innerhalb des Konfidenzintervalls mit einem Konfidenzniveau von 80 % liegt.

Die Belastungsplanung der Fallstudie 1 – IGT und der Fallstudie 2 – FRL weist in nahezu allen KG eine Überschreitung der geplanten Güte von 80 % aus. Dieses Ergebnis ist auf die geringere Datenbasis zurückzuführen, die einigen Klassen zugrunde liegt (siehe Tabelle 15). Die Standardabweichung einer zu kleinen Stichprobe umfasst mehr als 67 % der zugrunde liegenden Stichproben. Da die Standardabweichung der Parameter zur Bestimmung der Verteilungsfunktion ist, überträgt sich dieser Fehler auch auf die Konfidenzintervalle. Die Fallstudie 3 – PGL greift auf mehr Datensätze je Klasse zurück und weist daher eine Planungsgüte von durchschnittlich 79 % auf und spiegelt somit genauer das gewünschte Konfidenzintervall von 80 % wider.

7.3.2 Kapazitätsabgleich

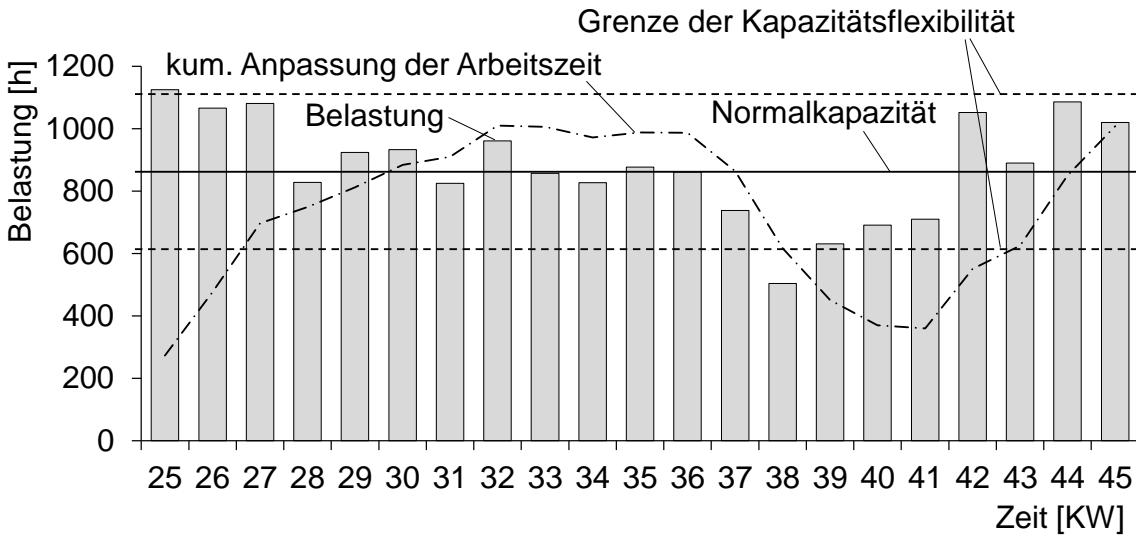
Abbildung 31 zeigt die Prüfung der Belastungsplanung auf ein mögliches Flexibilitätsdefizit in KW 32 mit der gegebenen KFM:

Belastungsplanung Kalenderwoche 32						
	KG01	KG02	KG21	KG40	KG41	Sum
min	90	100	259	157	118	724
\bar{x}	111	167	330	200	163	971
max	134	234	401	243	208	1220

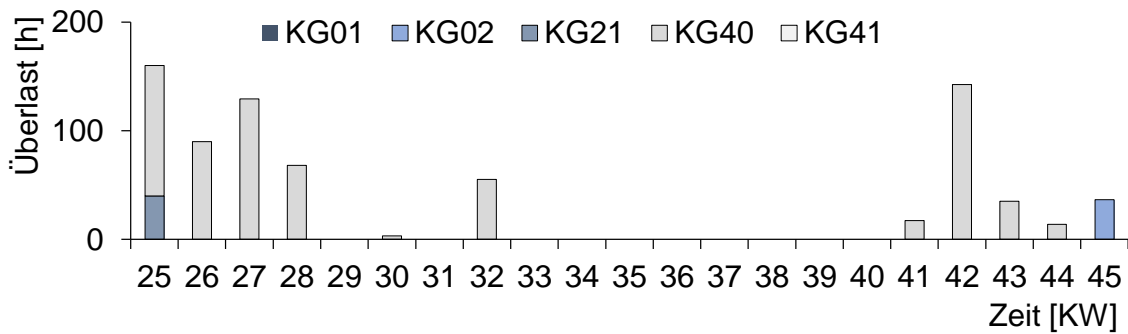
KFM Kalenderwoche 32						
	KG01	KG02	KG21	KG40	KG41	min
Demontage Produkt KG01	80	60	0	0	0	20
Demontage Baugruppe KG02	100	156	30	0	0	26
Befund KG21	10	30	210	0	0	170
Montage Baugruppe KG40	0	0	30	304	80	194
Montage Produkt KG41	0	0	60	70	111	0
max	190	246	330	374	191	861

Abbildung 31 Kapazitätsabstimmung mit Ermittlung des Flexibilitätsdefizits für Fallstudie 1 in KW 32.

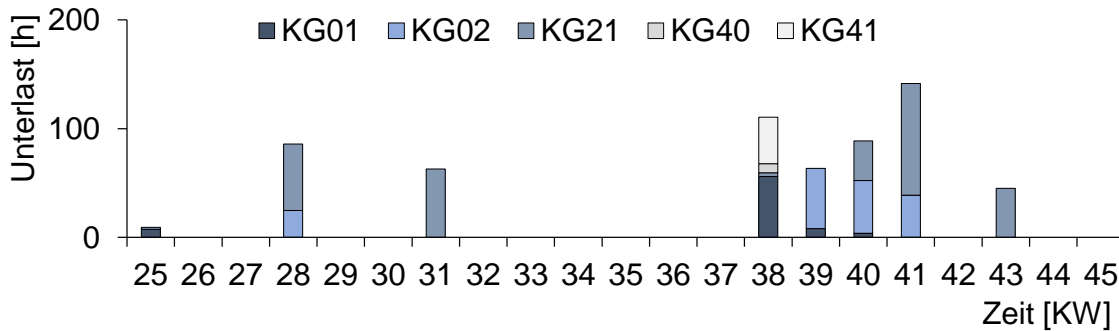
Die KFM zeigt die Standardkapazität und die Kapazitätsflexibilität der Kapazitätsgruppen. Der Abgleich der Gesamtkapazität mit der Gesamtbelastung zeigt ein Kapazitätsdefizit von 110 Stunden. Der Vergleich der oberen und unteren Grenzen des Konfidenzintervalls der Belastungsplanung mit der KFM ergibt das Flexibilitätsdefizit (FD). Die Abbildung 31 zeigt z. B. für die KG21 ein FD von 71 Stunden in der Kapazitätserweiterung und für KG40 ein FD in der Kapazitätsverminderung von 37 Stunden auf. Dies bedeutet, dass bei Eintreten der Belastungen nahe den Grenzen des Konfidenzintervalls die Kapazitätsflexibilität nicht ausreicht, um die Mitarbeiter zwischen den Kapazitätsgruppen zu verschieben. Eine Erweiterung bzw. Verringerung der Arbeitszeit ist erforderlich, um Terminverschiebungen oder Produktivitätsverluste zu vermeiden (siehe numerische Kapazitätsflexibilität in Abschnitt 6.1.3). Jedoch ist auch diese Maßnahme auf ein Maß begrenzt. In den aktuellen Fallstudien kann die Kapazität auf 130 % erhöht und auf 70 % reduziert werden. Folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Kapazitätsabstimmung mit Berücksichtigung der Kapazitätsflexibilität und Anwendung der Arbeitszeitveränderung:



a) Belastung und kumulierte Anpassung der Arbeitszeit nach Kapazitätsabstimmung



b) Überlast in Stunden je Kapazitätsgruppe nach Kapazitätsabstimmung



c) Unterlast in Stunden je Kapazitätsgruppe nach Kapazitätsabstimmung

Abbildung 32 Entwicklung der Arbeitszeitveränderung bei gegebener Belastung und Kapazitätsabstimmung (a), Überlast (b) und Unterlast (c) der Kapazitätsgruppen. Beispiel aus Fallstudie 1 – IGT für ausgewählte Wochen.

Abbildung 32a zeigt die Entwicklung der Arbeitszeitveränderungen anhand der Belastungen nach der Durchführung der Kapazitätsabstimmung mit gegebener Kapazitätsflexibilität. Das lineare Optimierungsmodell nach Abschnitt 6.2.2 bewertet für jede Planungsperiode die Mitarbeiterdisposition anhand der gültigen KFM und passt, wenn nötig, die Kapazität an. Abbildung

32b zeigt je Planungsperiode die Überlast, die trotz Anpassung der Kapazität (130 % der normalen Kapazität je Kapazitätsgruppe und Woche) und Verschiebung von Mitarbeitern im Rahmen der Kapazitätsflexibilität nicht gedeckt werden kann. Abbildung 32c zeigt analog die Unterlast je Planungsperiode, die trotz Reduzierung der Kapazität (70 % der normalen Kapazität je Kapazitätsgruppe) und Verschiebung von Mitarbeitern auf andere Kapazitätsgruppen nicht vermieden werden konnte. Überlast führt zu Durchlaufzeitverlängerungen und Unterlast zu Produktivitätsverlusten. Abbildung 32b und Abbildung 32c zeigen für Kalenderwoche 28 sogar beides, obwohl die Gesamtbelastung mit 828 Stunden beinahe der Normalkapazität von 861 Stunden entspricht: Unterlast für KG02 und KG21 als auch Überlast für KG40. Die Überbelastung der KG40 kann also nicht durch die freien Kapazitäten der KG02 oder KG21 kompensiert werden, da die Mehrfachqualifikation nicht vorhanden oder nicht ausreichend ist. Die Unterlast von ca. 100 Stunden in KW38 für KG01, KG02, KG40 und KG41 ist allerdings nachvollziehbar, da die Gesamtbelastung von 504 Stunden deutlich unter die Minimalkapazität von 603 Stunden fällt. Das folgende Kapitel zeigt auf, wie die Kapazitätsflexibilität angepasst werden kann, um die Unterlast und die Überlast der Planungsperiode zu verringern.

7.3.3 Umgang mit Flexibilitätsdefiziten

Abschnitt 6.1.3 beschreibt eine Vorgehensweise zur Verbesserung der Machbarkeit des Produktionsprogrammes durch Anpassung der Kapazitätsflexibilität in drei Stufen: Ermittlung der maximalen Mitarbeiterverschiebungen bei vollständiger Mehrfachqualifikation, Ermittlung der Grenzen der KFM durch die Konfidenzintervalle der Belastungsplanung und Anpassung der KFM nach den neuen Grenzen unter Berücksichtigung der benötigten Mitarbeiterverschiebungen.

1) **Ermittlung der maximalen Mitarbeiterverschiebungen bei vollständiger Mehrfachqualifikation:**

Für alle Wochen der Belastungsrechnung bestimmt das lineare Optimierungsmodell die benötigten Mitarbeiterverschiebungen bei vollständiger Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter. Die Matrix in Abbildung 33 zeigt die maximal genutzten Mitarbeiterverschiebungen im untersuchten Zeitraum:

Genutzte Mitarbeiterverschiebungen bei maximaler Kapazitätsflexibilität							
		KG01	KG02	KG21	KG40	KG41	min
Demontage Produkt	KG01	80	53	34	24	78	0
Demontage Baugruppe	KG02	42	156	97	64	32	0
Befund	KG21	33	121	210	98	52	0
Montage Baugruppe	KG40	43	33	76	304	113	40
Montage Produkt	KG41	34	49	32	104	111	0
max		232	412	449	594	386	861

Abw+: obere Grenze der Kapazitätsflexibilität

KG: Kapazitätsgruppe

Abw-: untere Grenze der Kapazitätsflexibilität

Abbildung 33 Ermittlung der maximalen Mitarbeiterverschiebungen bei vollständiger Kapazitätsflexibilität für Fallstudie 1.

Die Ergebnisse in Abbildung 33 zeigen, dass bei vollständiger Mitarbeiterflexibilität Kapazitätsverschiebungen in alle Kapazitätsgruppen stattfinden. Für jede Kapazitätsgruppe können jedoch einzelne Kapazitätsgruppen identifiziert werden, die häufiger als andere das Ziel von Mitarbeiterverschiebungen sind. KG01 verschiebt z. B. vorrangig in die KG02 und KG41. Die KG40 verschiebt vorrangig Kapazität in die KG21 und KG41. Würde die Kapazitätsflexibilitätsmatrix die Ergebnisse aus Abbildung 33 abbilden, würden keine Überlast- oder Unterlastsituationen auftreten. Die Umsetzung einer so umfangreichen Qualifizierung ist jedoch unrealistisch, da nahezu alle Mitarbeiter für alle Kapazitätsgruppen qualifiziert werden müssten.

2) Ermittlung der Grenzen der KFM durch die Konfidenzintervalle der Belastungsplanung:

Abbildung 30 zeigt die Belastungsplanung unter Unsicherheit mit den resultierenden Konfidenzintervallen. Für jede Kapazitätsgruppe und Periode kann die Planbelastung, die untere und die obere Grenze des Konfidenzintervalls ermittelt werden. Je größer die Spanne zwischen Planbelastung und oberer bzw. unterer Grenze, desto größer ist die Anforderung an die Kapazitätsflexibilität der Kapazitätsgruppe. Für jede Kapazitätsgruppe und Zeitperiode werden diese Spannen ermittelt, indem das Verhältnis der oberen Grenze und der Planauftragszeit bzw. der unteren Grenze und der Planauftragszeit berechnet wird.

KW	Plan- belastung	untere Grenze Konfidenzintervall		obere Grenze Konfidenzintervall	
	[Stunden]	[Stunden]	[%]	[Stunden]	[%]
26	50	40	80%	80	160%
27	100	50	50%	150	150%
28	120	100	83%	180	150%
29	90	80	89%	100	111%
30	80	30	38%	100	125%

Tabelle 18 Beispiel zur Berechnung der maximal benötigten Kapazitätsflexibilität für eine Kapazitätsgruppe.

Tabelle 18 zeigt beispielhaft die Berechnung für eine Kapazitätsgruppe über die Kalenderwochen 26 bis 30. Die berechneten Konfidenzintervalle zeigen, dass die Belastung in diesem Zeitraum auf bis zu 38 % der Planbelastung fallen kann und auf bis zu 160 % der Planbelastung steigen kann. Die bereitgestellte Flexibilität soll dieses maximale Verhältnis nicht überschreiten. Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse für die Kapazitätsgruppen der Fallstudie 1:

Kapazitätsgruppe		Untere Grenze	Obere Grenze
Demontage Produkt	KG01	0%	154%
Demontage Baugruppe	KG02	50%	150%
Befund	KG21	58%	142%
Montage Baugruppe	KG40	70%	133%
Montage Produkt	KG41	36%	164%

Tabelle 19 Maximal auftretende Kapazitätsverschiebungen im Verhältnis zur Planbelastung je Planungszeitpunkt der Belastungsplanung in Fallstudie 1.

Die Werte in Tabelle 19 geben einen Hinweis auf die maximal benötigte Kapazitätsflexibilität der jeweiligen Kapazitätsgruppen. KG01 benötigt demnach eine Mehrfachqualifikation aller Mitarbeiter der Kapazitätsgruppe, da die Belastungen komplett entfallen könnten und die Mitarbeiter somit in andere Kapazitätsgruppen verschoben werden müssen. KG41 benötigt eine Kapazitätserweiterung um bis zu 164 % und fordert somit von den anderen Kapazitätsgruppen eine erhöhte Mehrfachqualifikation.

3) Anpassung der KFM nach den neuen Grenzen unter Berücksichtigung der benötigten Mitarbeiterverschiebungen:

Die häufig genutzten Mitarbeiterverschiebungen aus 1) und die benötigte Flexibilität aufgrund der Belastungsrechnung aus 2) ermöglichen die Anpassung der ursprünglichen KFM:

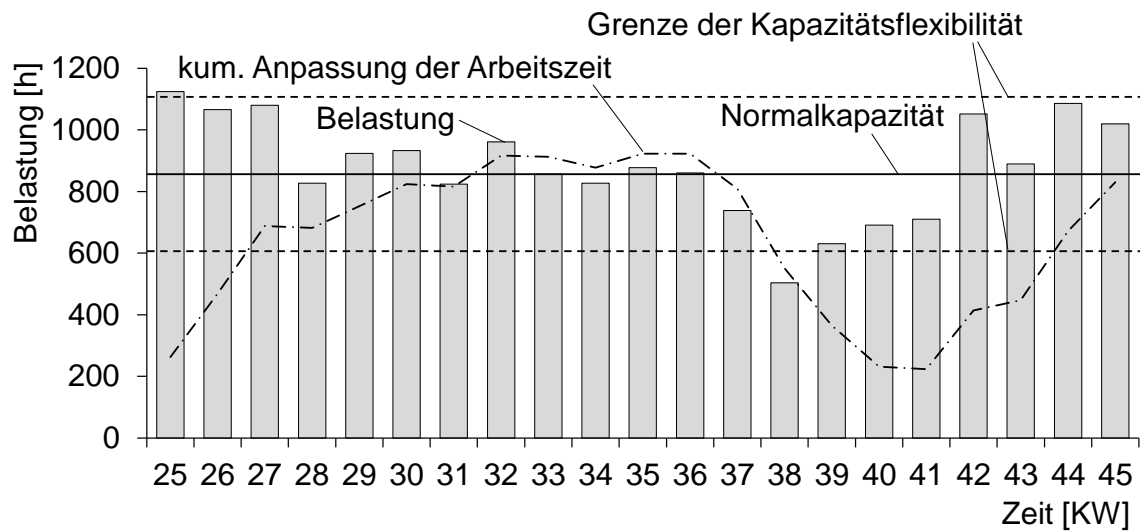
ursprüngliche KFM								
		KG01	KG02	KG21	KG40	KG41	min [h]	min [%]
Demontage Produkt	KG01	80	60				20	25%
Demontage Baugruppe	KG02	100	156	30			26	17%
Befund	KG21	10	30	210			170	81%
Montage Baugruppe	KG40			30	304	80	194	64%
Montage Produkt	KG41			60	70	111	0	0%
max [h]		190	246	330	374	191	861	
max [%]		238%	158%	157%	123%	172%		

Anpassung der KFM nach den neuen Grenzen unter Berücksichtigung der benötigten geplanten Mitarbeiterverschiebungen.

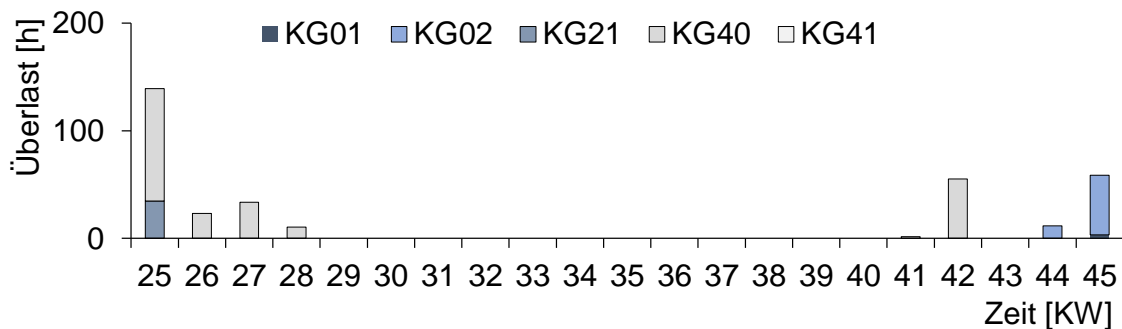
angepasste KFM								
		KG01	KG02	KG21	KG40	KG41	min [h]	min [%]
Demontage Produkt	KG01	80	58			22	0	0%
Demontage Baugruppe	KG02	43	156	35			78	50%
Befund	KG21		20	210	69		121	58%
Montage Baugruppe	KG40			13	304	79	212	70%
Montage Produkt	KG41			40	31	111	40	36%
max [h]		123	234	298	404	212	861	
max [%]		154%	150%	142%	133%	191%		

Abbildung 34 Anpassung der ursprünglichen KFM nach neuen Grenzen und tatsächlicher Mitarbeiterverschiebung für Fallstudie 1 – IGT.

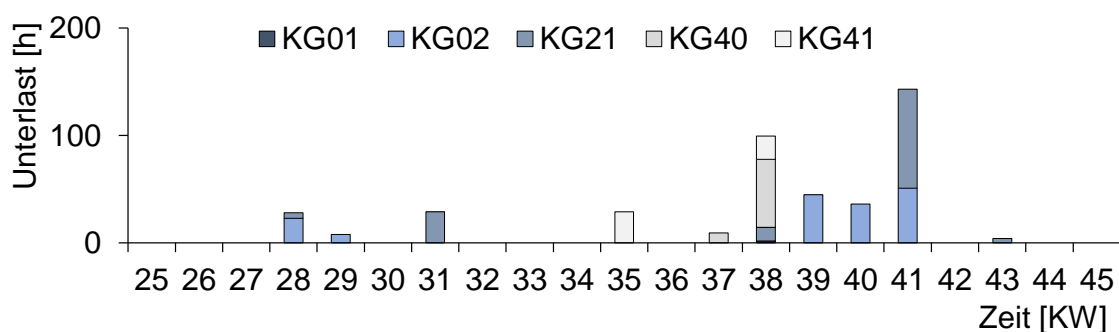
Abbildung 34 zeigt die ursprüngliche KFM der Fallstudie 1 und die angepasste KFM. Die Aufteilung der Mehrfachqualifikation wurde heuristisch anhand der maximal genutzten Mitarbeiterverschiebungen nach 1) und der ermittelten Grenzen der auftretenden Konfidenzintervalle nach 2) vorgenommen. Je Kapazitätsgruppe wurde die Mehrfachqualifizierung auf die Kapazitätsgruppen beschränkt, die häufig Ziel von Mitarbeiterverschiebungen nach 1) waren. Die Flexibilitätsgrenzen nach 2) wurden dabei bestmöglich berücksichtigt. Die angepasste KFM kann die auftretenden Unterlast- und Überlastsituation deutlich besser regulieren:



a) Belastung und kumulierte Anpassung der Arbeitszeit nach Kapazitätsabstimmung



b) Überlast in Stunden je Kapazitätsgruppe nach Kapazitätsabstimmung



c) Unterlast in Stunden je Kapazitätsgruppe nach Kapazitätsabstimmung

Abbildung 35 Entwicklung der Arbeitszeitveränderung (a), Überlast (b) und Unterlast (c) bei angepasster Kapazitätsflexibilität für Fallstudie 1 – IGT.

Abbildung 35 zeigt erneut die Entwicklung der Arbeitszeitveränderungen, jedoch mit angepasster Kapazitätsflexibilität. Über die betrachteten Planungsperioden konnte die Unterlast in Summe von 607 auf 430 Stunden und die Überlast von 752 auf 334 Stunden reduziert werden. Arbeitszeitveränderungen fanden grundsätzlich weniger Anwendung als im Ausgangszustand (830 Stunden kumuliert anstelle von 1008 Stunden kumuliert, vgl. Abbildung 34). Der direkte

Vergleich zur ursprünglichen KFM zeigt insbesondere eine Veränderung der beiden Kapazitätsgruppen KG21 und KG40.

Kapazits- gruppe	kumulierte Überlast		delta [h]
	mit ursprünglicher KFM [h]	mit angepasster KFM [h]	
KG01	0	3	3
KG02	36	67	31
KG21	40	35	-5
KG40	676	229	-447
KG41	0	0	0

a) Gegenüberstellung der kumulierten Überlast.

Kapazits- gruppe	kumulierte Unterlast		delta [h]
	mit ursprünglicher KFM [h]	mit angepasster KFM [h]	
KG01	75	2	-73
KG02	170	162	-7
KG21	311	143	-169
KG40	8	72	64
KG41	43	51	8

b) Gegenüberstellung der kumulierten Unterlast.

Tabelle 20 Gegenüberstellung der kumulierten Unterlast (a) und kumulierten Überlast (b) der Kapazitätsgruppen mit ursprünglicher KFM und angepasster KFM.

KG21 war ursprünglich in vielen Kalenderwochen unterlastet. KG40 hingegen oft überlastet. Die angepasste KFM ermöglicht der KG21 ca. 30 % der Kapazität in die KF40 zu verschieben und verringert somit in der Kapazitätsabstimmung beide Defizite deutlich.

Trotz besserer Ergebnisse in der Kapazitätsabstimmung zeigt die angepasste KFM nicht grundsätzlich mehr Qualifizierungsbedarf. Die ursprüngliche KFM weist durchschnittlich 1,5 Qualifizierungen je Mitarbeiter aus: KG02 weist z. B. eine Normkapazität von 156 Stunden auf und kann 130 Stunden auf andere Kapazitätsgruppen verschieben. Somit haben die Mitarbeiter im Durchschnitt 1,8 Qualifizierungen (286 Stunden / 156 Stunden). Die angepasste KFM weist ebenfalls durchschnittlich 1,5 Qualifizierungen je Mitarbeiter aus und stellt somit keine höheren Anforderungen an die Qualifizierung der Mitarbeiter.

Zusammenfassend zeigt die Fallstudie, dass durch die in Abschnitt 6.1.3 vorgestellten Schritte die Kapazitätsflexibilität angepasst werden kann, um die Machbarkeit des Produktionsprogramms zu verbessern.

7.4 Kapazitätssteuerung und Einsatz der Mehrfachqualifikation

Abschnitt 6.2.2 beschreibt ein Optimierungsmodell, um Mitarbeiter anhand der Belastungen und der gegebenen Mehrfachqualifikation auf die Kapazitätsgruppen zu verteilen. Dieser Abschnitt nutzt das Optimierungsmodell, um den Mitarbeiterereinsatz kurzfristig an die auftretenden Belastungen anzupassen. Folgende Abbildung zeigt die kurzzyklische Bestimmung des Mitarbeiterereinsatzes und ermittelt den benötigten Arbeitszeitfaktor:

KFM Kalenderwoche 32							
		KG01	KG02	KG21	KG40	KG41	min
Demontage Produkt	KG01	80	60				20
Demontage Baugruppe	KG02	100	156	30			26
Befund	KG21	10	30	210			170
Montage Baugruppe	KG40			30	304	80	194
Montage Produkt	KG41			60	70	111	0
max		190	246	330	374	191	861

a) Kapazitätsflexibilitätsmatrix

Geplanter Mitarbeiterereinsatz Kalenderwoche 32								
Geplante Belastung			111	167	330	200	163	971
		AZF	KG01	KG02	KG21	KG40	KG41	Summe
Demontage Produkt	KG01	1,1	87	0	0	0	0	87
Demontage Baugruppe	KG02	1,2	24	130	27	0	0	181
Befund	KG21	1,2	0	37	220	0	0	257
Montage Baugruppe	KG40	1,1	0	0	33	200	89	322
Montage Produkt	KG41	1,1	0	0	50	0	74	124
Kapazität			111	167	330	200	163	971
./. Belastung			-111	-167	-330	-200	-163	-971
= Delta			0	0	0	0	0	0

b) Mitarbeiterereinsatz, ermittelt mit dem linearen Optimierungsmodell

max: obere Grenze der Kapazitätsflexibilität

KG: Kapazitätsgruppe

min: untere Grenze der Kapazitätsflexibilität

AZF: Arbeitszeitfaktor

Abbildung 36 Lineare Optimierung des Mitarbeiterereinsatzes und der Arbeitszeit in KW 32 für Fallstudie 1 - IGT (siehe b) unter Berücksichtigung der KFM (siehe a).

Abbildung 36 zeigt das Ergebnis des linearen Optimierungsmodells aus Abschnitt 6.2.2 für eine Kalenderwoche und stellt in der Matrix Mitarbeiterereinsatz (Abbildung 36b) die Arbeitszeit und die Mitarbeiterdisposition dar. Die in Abbildung 36a abgebildete KFM bildet den Rahmen zur Disposition der Mitarbeiter und Anpassung der Arbeitszeit. In den Zeilen und Spalten der unteren Matrix zum geplanten Mitarbeiterereinsatz werden die disponierten Kapazitäten für die Kapazitätsgruppen (KG) angezeigt. Für jede KG je Zeile zeigen die Werte der Matrix die Mitarbeiterverschiebungen in andere KG an. Der Arbeitszeitfaktor (AZF) definiert die Arbeitszeit und die Spalte *Summe* zeigt die Anwesenheit der Kapazitätsgruppe. Je höher der Faktor α (vgl. Formel (6.1)), desto negativer wirkt sich die Arbeitszeitveränderung in der Zielfunktion aus. Meist entstehen geringe oder keine Kosten, Mitarbeiter anderen Kapazitätsgruppen zuzuordnen. Ein hoher Wert des Faktors α bevorzugt die Ausschöpfung der Kapazitätsflexibilität, bevor die Arbeitszeit der Mitarbeiter angepasst wird. Sind anderenfalls die Kapazitätsgruppen z. B. geografisch weit voneinander getrennt und es entstehen hohe Reisekosten bei der Versetzung der Mitarbeiter, eignet sich ein geringer Wert des Faktors α .

Insgesamt konnte das Optimierungsmodell eine Lösung für die gegebene Situation finden, da die geplante Belastung mit der Kapazität übereinstimmt. Die Zeile *Delta* subtrahiert dafür die geplante Belastung je Kapazitätsgruppe von der desponierten Kapazität der Mitarbeiterereinsatzplanung. Das Beispiel zeigt auch, dass die Mehrfachqualifizierung allein nicht ausreicht und deshalb für einige Kapazitätsgruppen Mehrarbeit berücksichtigt wurde. Die geplanten Belastungen erfordern durch die hohe Gesamtlast eine größere Anwesenheit der Mitarbeiter in den Kapazitätsgruppen (10 % bzw. 20 % mehr Arbeitszeit in der Kalenderwoche).

Die tatsächlichen Belastungen weichen jedoch von den geplanten Belastungen ab und fallen geringer aus. Anstelle von 971 Stunden fallen nur 857 Stunden in Summe für die Kapazitätsgruppen an. Die Mitarbeiterdisposition mit den tatsächlichen Belastungen zeigt nun eine Lösung ohne Mehrarbeit:

Tatsächlicher Mitarbeiterinsatz Kalenderwoche 32								
Tatsächliche Belastung			114	159	240	211	133	857
		AZF	KG01	KG02	KG21	KG40	KG41	Anw.
Demontage Produkt	KG01	1,0	80	0	0	0	0	80
Demontage Baugruppe	KG02	1,0	27	129	0	0	0	156
Befund	KG21	1,0	7	30	169	0	0	206
Montage Baugruppe	KG40	1,0	0	0	13	211	80	304
Montage Produkt	KG41	1,0	0	0	58	0	53	111
Kapazität			114	159	240	211	133	857
./. Belastung			-114	-159	-240	-211	-133	-857
= Delta			0	0	0	0	0	0

Abbildung 37 Mitarbeiterinsatz nach tatsächlichen Belastungen in KW 32 für Fallstudie 1 – IGT unter Berücksichtigung der KFM.

Abbildung 37 zeigt die Mitarbeiterdisposition mit den tatsächlichen Belastungen der Kapazitätsgruppen in der untersuchten Kalenderwoche. Die Belastungsplanung und Kapazitätssteuerung anhand neuer Informationen zu Auftragszeiten kurzzyklisch zu aktualisieren, ermöglicht der Steuerung die Planeinhaltung sicherzustellen. Zum anderen ermöglicht die Methode der Steuerung, die Kapazitäten an die tatsächlichen Belastungen anzupassen. Das Ergebnis zeigt die benötigte Mehrarbeit und die Kapazitätsverschiebungen auf. Beide Maßnahmen tragen dazu bei, den Plan einzuhalten und können kurzfristig umgesetzt werden.

8 Schlussbetrachtung und Ausblick

Dieser Abschnitt bewertet die Ergebnisse der Arbeit anhand der Anforderungen in Abschnitt 4.1 und diskutiert weiteren Forschungsbedarf.

A1 – Die PPS muss die Unsicherheit der Aufträge und die Ursachen dieser Unsicherheit für alle Beteiligten transparent darstellen.

Kapitel 5 beschreibt die Klassifizierung der Planungsgrößen und die Messung der Unsicherheit anhand von Klassen, Verteilungen und Parametern für die Auftragszeit eines Instandhaltungsobjektes. Die Anpassung der Klassifizierung an die Rahmenbedingungen des Instandhalters ermöglicht die Berücksichtigung individueller Unsicherheiten unterschiedlicher Dienstleister. Möglich ist auch eine Betrachtung der Unsicherheit aus den Blickwinkeln unterschiedlicher Abteilungen. Die Übertragung der Methoden dieser Arbeit auf weitere Planungsgrößen im Unternehmen erweitert die Bewertung von Kundenaufträgen um die Unsicherheit des Umsatzes, der Kosten, der Durchlaufzeit und der Arbeitsbelastung. Die Bestimmung der Unsicherheit und die Berücksichtigung in den frühen Phasen des Auftragsdurchlaufs ermöglichen die rechtzeitige Diskussion im Unternehmen und bieten einen zusätzlichen Entscheidungsfaktor zur Vertragsgestaltung und Produktionsplanung.

Potenzial für weitere Forschung besteht in einer Bewertungshilfe für die Bevorratung von Ersatzteilen zur Absicherung langer Durchlaufzeiten oder des Ausfalls der Bauteile. Die Methode zur Klassifizierung und Messung der Unsicherheit kann eine Grundlage zur Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit oder Schadensfallhöhe von Bauteilen sein und somit die Entscheidung zur Bevorratung von Bauteilen unterstützen. Das Unternehmen identifiziert so kritische Bauteile, die z. B. häufig ausfallen und lange Wiederbeschaffungszeiten aufweisen oder durch häufig wechselnde Schadensfälle Auftragszeit und Durchlaufzeit der vertraglichen Anforderungen überschreiten.

A2 – Die Planungsgrößen der PPS spiegeln die Unsicherheit wider und orientieren sich an den verfügbaren Informationen des Unternehmens.

Die Informationsverfügbarkeit bestimmt die Unsicherheit und ist der entscheidende Faktor der Klassifizierung der Planungsgröße im Unternehmen. Abschnitt 5.2 führt das theoretische Modell zur Berechnung der Effekte von Informationen auf die Unsicherheit aus und liefert eine Methode für die Klassifizierung der Planungsgröße unter Unsicherheit. Abschnitt 7.2 zeigt die

Validität der Methode und führt sie exemplarisch an einer großen und vielseitigen Datenbasis realer Instandhaltungsereignisse aus. Unternehmen ist es somit möglich, diejenigen Informationen zu identifizieren, die den größtmöglichen Nutzen für die Bestimmung der Auftragszeiten aufweisen.

Die Bewertung der Aufwände der Informationsbeschaffung ist jedoch nicht einfach. Es fehlt ein geeignetes Modell zur gemeinsamen Bewertung der Aufwände im Sinne einer Kosten-Nutzen-Analyse. Die Berücksichtigung der Kosten zusätzlicher Maßnahmen der Informationsbeschaffung würde dem Unternehmen fundierte und nachvollziehbare Entscheidungen zum Umgang mit Informationen ermöglichen.

A3 – Die Methoden der Kapazitätsplanung berücksichtigen die Unsicherheit der Aufträge in der Belastungsplanung.

Kapitel 6 beschreibt die Erweiterung der Kapazitätsplanung und -steuerung um die Unsicherheit der Auftragszeiten. Die Faltungsregeln ermöglichen der Planung die Bestimmung der resultierenden Belastung je Zeitperiode und erzeugen ein Konfidenzintervall mit variablem Konfidenzniveau. Das Unternehmen ist somit in der Lage, die Unsicherheit der Planungsgrößen auf Zeitperioden zu übertragen und Grenzen der Belastungen mit Eintrittswahrscheinlichkeiten zu belegen.

Klärungsbedarf besteht in der Untersuchung möglicher negativer Auswirkungen häufiger Planungsanpassungen auf die Fertigung. Die Maßnahmen der Informationsbeschaffung und neue oder veränderte Informationen aus dem Auftragsdurchlauf verändern kontinuierlich die Informationsverfügbarkeit. Die vorher aufgestellte Planung bei geringerer Informationsverfügbarkeit muss überprüft und evtl. korrigiert werden. Die revolvierende Planung unter Unsicherheit verändert bei neuen Informationen den zuvor gültigen Plan und passt ihn an die aktuelle Informationsverfügbarkeit an. Die ständige Veränderung gültiger Produktionspläne erhöht jedoch die Nervosität der Fertigung. Unklar ist auch die gemeinsame Verarbeitung unterschiedlicher Planungsgrößen. Die Klassen der Planung werden immer genauer aufgrund der stetig wachsenden Informationsmenge zu den Instandhaltungsereignissen. Die kurzfristige Planung muss somit Klassen auf groben Aggregationsstufen gemeinsam mit Klassen niedriger Aggregationsstufen verarbeiten und evtl. konkrete Fertigungsaufträge parallel verplanen. Diese Komplexität stellt erhöhte Anforderungen an das Planungssystem und an die Verständlichkeit und Transparenz der Planungsergebnisse.

A4 – Die Kapazitätsplanung definiert die benötigte Kapazitätsflexibilität und berücksichtigt diese im Kapazitätsabgleich.

Die Kapazitätsflexibilitätsmatrix ermöglicht es der Planung, das Flexibilitätsdefizit zu bestimmen, indem die Konfidenzintervalle der Belastungsplanung mit der vorhandenen Kapazitätsflexibilität abgeglichen werden. Die Grenzen der Konfidenzintervalle ermöglichen es der Kapazitätsplanung und -steuerung, die Kapazitätsflexibilität auf die vorhandenen Unsicherheiten einzustellen. Die Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität, wie Mehrfachqualifikation und Anpassung der Arbeitszeit, können somit auf das benötigte Maß eingestellt und die Kosten kontrolliert werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Nutzung der Mehrfachqualifikation im Rahmen des Kapazitätsabgleichs. Mehrfachqualifikation erzeugt u. U. ein großes Ausmaß an Kapazitätsflexibilität für einzelne Arbeitssysteme. Die Nutzung dieser Flexibilität für ein Arbeitssystem verändert auch immer die Kapazitätsflexibilität für ein anderes. Der Optimierungsalgorithmus zur Mitarbeiterdisposition berücksichtigt diese Wechselwirkung für eine Zeitperiode. Die Integration dieser Wechselwirkung in die Kapazitätsabstimmung ergänzt die Einschätzung der Machbarkeit des Produktionsprogramms und zeigt weitere Handlungsfelder auf. Eickemeyer [Eick13] beschreibt bereits eine Methode zur Optimierung der Kapazitätsplanung durch ein mathematisches Modell. Die Zusammenführung der Methoden beider Arbeiten ermöglicht die Optimierung der Kapazitätsplanung unter definierten Rahmenbedingungen der Kapazitätsflexibilität.

A5 – Die Methoden der Kapazitätssteuerung nutzen die Mehrfachqualifikation und die Anpassung der Arbeitszeit im Rahmen der definierten Kapazitätsflexibilität, um die schwankenden Belastungen auszugleichen.

Die Arbeit stellt den hohen Stellenwert der Kapazitätsflexibilität in der Instandhaltungsproduktion heraus und bietet für die Kapazitätssteuerung eine Vorgehensweise zur Nutzung der Belastungsplanung unter Unsicherheit. Die Kapazitätsflexibilitätsmatrix ermöglicht in Kombination mit der Belastungsplanung die Konfiguration des Mitarbeiterereinsatzes im Rahmen der Mehrfachqualifikation und die Ermittlung der Arbeitszeit.

Ein großes Feld für weiteren Forschungsbedarf bieten die weiteren Aufgaben der Produktionssteuerung. Die Auftragsfreigabe bestimmt durch ihre Verfahren den Bestand und damit auch die Durchlaufzeit der Fertigung. Unter Unsicherheit von Durchlaufzeit und Arbeitsbelastung

können die Verfahren Bestände nicht eindeutig bestimmen. Bei Freigabe von Aufträgen könnten auch die Unsicherheiten der bereits freigegebenen Aufträge berücksichtigt werden. Je nach Zielsetzung kann damit die Durchlaufzeit oder die Produktivität abgesichert werden. Zudem beeinflussen größere Verschiebungen von Kapazitäten im Rahmen der Kapazitätssteuerung Plan- und Grenzbestände der Arbeitssysteme und müssen in den Freigabeverfahren berücksichtigt werden. Eickemeyer [Eick12] führt unterschiedliche Wechselwirkungen der Anpassung von Kapazitäten auf und versucht, diese in einem Modell abzubilden. Die Kombination dieser Erkenntnisse mit der Methode in dieser Arbeit ermöglicht den ganzheitlichen Einsatz aller Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität.

9 Anhang

Dieses Kapitel zeigt die Programmcodes für das Statistikprogramm R zur Anpassung der Verteilungen an die empirischen Daten und zur Versuchsdurchführung der DoE.

9.1 R- Programmcode zur Anpassung der speziellen Verteilungen an die Stichproben

Folgender Programmcode des Statistikprogramms R passt die Parameter der ausgewählten speziellen Verteilungen an die empirische Datenbasis an und erzeugt eine grafische Gegenüberstellung der Ergebnisse. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.3.2 ausgewertet.

```
#1. Laden der Pakete:  
library(fBasics)  
library(vcd)  
library(MASS)  
library(sn)  
  
#2. Datenimport, Prüfung und Auswahl der zu analysierenden Klassen:  
setwd("SPEICHERORT")  
daten <- read.table("EMPIRISCHE_DATEN.csv", sep=";", header=T, dec=",")  
attach(daten)  
Profile <- levels(daten[,SPALTE_MIT_KLASSEN])  
  
N = #Stichprobenmenge#  
AUSPRÄGUNG = # Spalte mit Ausprägung#  
  
#3. Anpassung der speziellen Verteilungen auf die Stichprobenmengen:  
for ( i in 1:N ) {                               #Schleife über die Stichprobenmengen  
k = Klassen[i]                                   #Klassenauswahl  
x <- daten[grep(k, daten$Klassen), AUSPRÄGUNG]  
                                                #Datenauswahl je Stichprobe  
mean.x = mean(x)                                #Analytisch ermittelter Mittelwert  
sigma2.x = sqrt(var(x))                         #Analytisch ermittelte Standardabweichung  
skew.x = skewness(x)                            #Analytisch ermittelte Schiefe
```

```

kurt.x = kurtosis(x)                                #Analytisch ermittelte Wölbung

jpeg(filename = paste(dat, ".jpg"), width = 1200, height = 800, units = "px", pointsize = 15,
quality = 300)                                     #Ausgabeformat
par( mfrow=c(3,3))                                 #Auswertungsformat

#3.1 Anpassung der Normalverteilung
norm = fitdistr(x, "normal")                        #Schätzung der Parameter
x.norm<-rnorm(n=2000,m=norm$estimate[1],sd=norm$estimate[2])
                                                    #Definition der Verteilung
plot(density(x), main="Normalverteilung") #Zeichnung der empirischen PDF
lines(density(x.norm),col=2)                      #Zeichnung der angepassten PDF

#3.2 Anpassung der schiefen Normalverteilung
sn = fitdistr(x,densfun=dsn, start= list(location = mean.x, scale = sigma2.x, shape = skew.x))
                                                    #Schätzung der Parameter
x.snorm<- rsn(n= 2000,location=sn$estimate[1], scale=sn$estimate[2],
shape=sn$estimate[3])                             #Definition der Verteilung
plot(density(x), main="Schiefe Normalverteilung") #Zeichnung der empirischen PDF
lines(density(x.snorm),col=2)                     #Zeichnung der angepassten PDF

#3.3 Anpassung der Weibull Verteilung
#Weibull-Schätzer (siehe [Ricc05]):
mu = mean(log(x))
sigma2 = var(log(x))
shape.guess = 1.2 / sqrt(sigma2)
scale.guess = exp(mu + (0.572 / shape.guess))
thres.guess = 1

weib = fitdistr(x,densfun=dweibull,start=list(scale=scale.guess,shape=shape.guess))
                                                    #Schätzung der Parameter
x.wei<-rweibull(n=20000,scale=weib$estimate[1], shape=weib$estimate[2])
                                                    #Definition der Verteilung
plot(density(x), main="Weibull Verteilung")      #Zeichnung der empirischen PDF

```

```
lines(density(x.wei),col=2) #Zeichnung der angepassten PDF
```

#3.4 Anpassung der Gamma Verteilung

```
gam = fitdistr(x,"gamma") #Schätzung der Parameter
```

```
x.gam<-rgamma(2000,rate=gam$estimate[2],shape=gam$estimate[1])
```

```
#Definition der Verteilung
```

```
plot(density(x), main="Gamma Verteilung") #Zeichnung der empirischen PDF
```

```
lines(density(x.gam),col=2) #Zeichnung der angepassten PDF
```

#3.5 Anpassung der F Verteilung

```
F = fitdistr(x,"F", start=list(df1=1,df2=1,ncp=1)) #Schätzung der Parameter
```

```
x.F <- rf(2000,df1=F$estimate[1],df2=F$estimate[2],ncp=F$estimate[3])
```

```
#Definition der Verteilung
```

```
plot(density(x), main="F Verteilung") #Zeichnung der empirischen PDF
```

```
lines(density(x.F),col=2) #Zeichnung der angepassten PDF
```

#3.6 Anpassung der Lognormal Verteilung

```
log = fitdistr(x,"lognormal") #Schätzung der Parameter
```

```
x.log <- rlnorm(2000,meanlog=log$estimate[1], sdlog=log$estimate[2])
```

```
#Definition der Verteilung
```

```
plot(density(x), main="LogNormal Verteilung") #Zeichnung der empirischen PDF
```

```
lines(density(x.log),col=2) #Zeichnung der angepassten PDF
```

#3.7 Anpassung der Logistischen Verteilung

```
logis = fitdistr(x,"logistic") #Schätzung der Parameter
```

```
x.logis <- rlogis(2000,location=logis$estimate[1], scale=logis$estimate[2])
```

```
#Definition der Verteilung
```

```
plot(density(x),main="Logistische Verteilung") #Zeichnung der empirischen PDF
```

```
lines(density(x.logis),col=2) #Zeichnung der angepassten PDF
```

#3.8 Anpassung der Poisson Verteilung

```
pois = fitdistr(x,"poisson") #Schätzung der Parameter
```

```
x.pois <- rpois(2000,lambda=pois$estimate[1]) #Definition der Verteilung
```

```
plot(density(x), main="Poisson Verteilung") #Zeichnung der empirischen PDF
```

<i>lines(density(x.pois),col=2)</i>	<i>#Zeichnung der angepassten PDF</i>
<i>dev.off()</i>	<i>#Ausgabe für die emp. Stichprobe</i>
<i>}</i>	<i>#Ende der Anpassung</i>

9.2 R- Programmcode zur Versuchsdurchführung der DoE

Folgender Programmcode in R führt den Versuchsplan in Tabelle 3 aus und berechnet je Versuch das Versuchsmerkmal:

```
#1. Laden der benötigten Pakete:  
library(fBasics)  
library(vcd)  
library(MASS)  
  
#2. Datenimport:  
setwd("SPEICHERORT")  
daten <- read.table("DATEINAME.txt", sep=";", header=T, dec=",")  
attach(daten)  
df <- NULL  
df <- data.frame(Exp=numeric(0), Profil= character(), Mittel=numeric(0),  
  STAB=numeric(0),STAB_MITTEL=numeric(0), Schiefe=numeric(0),  
  Anzahl=numeric(0))  
  
EXPERIMENTE = #Anzahl Experimente#  
StartVERSUCH = #Spalte der Klassenbezeichnung des 1. Versuchs#  
AUSPRÄGUNG= #Spaltennummer mit Ausprägungen#  
  
#3. Durchführung der Experimente:  
for (exp in 1: EXPERIMENTE) { # Schleife über die Anzahl der Experimente  
  KLASSEN <- levels(daten[,StartVERSUCH+exp])  
  for ( i in 1:length(KLASSEN) ) {  
    k = KLASSEN[i]  
    x <- daten[grep(k,daten[,StartVERSUCH +exp]),AUSPRÄGUNG]  
    if (length(x) >2 & mean(x) > 1) {  
      df <- rbind(df, data.frame(Exp=exp, Profil=p, Mittel=mean(x), STAB=sd(x),  
        STAB_MITTEL=(sd(x)/mean(x)), Schiefe=skewness(x) , Anzahl=length(x)))  
    }#Berechnung statistischer Größen  
  }#Ende Auswertung Klassen  
}  
}#Ende der Experimente
```

#4. Berechnung des Beschreibungsmodells:

```
BM <- NULL
```

```
BM <- data.frame(Exp=numeric(0), Klasse=character(), STAB_Mittel=numeric(0), Anzahl  
= numeric(0),Größe_Klasse_mittel=numeric(0), min=numeric(0), max=numeric(0))
```

```
for (exp in 1:EXPERIMENTE) { # Anzahl der Experimente
```

```
  x <- subset(df[,5],df$Exp == exp) #Stab_mittel der Profile
```

```
  y <- subset(df[,7],df$Exp == exp) #Datengrundlage der Profile
```

```
  BM <- rbind(BM, data.frame(Exp=exp, Klasse="", STAB_Mittel=mean(x),
```

```
  Anzahl=length(x),Größe_Klasse_mittel=mean(y), min=min(x), max=max(x)))
```

```
}
```

#5. Ausgabe des Beschreibungsmodells:

```
write.table(BM, file = "BM.csv", append = FALSE, quote = TRUE, sep = ";",
```

```
  eol = "\n", na = "NA", dec = ",", row.names = FALSE,
```

```
  col.names = TRUE, qmethod = c("escape", "double"),
```

```
  fileEncoding = "")
```

```
#Ende
```


9.3 R- Programmcode zur Bestimmung der Klassen

#1. Laden der Pakete:

```
library(fBasics)
```

```
library(vcd)
```

```
library(MASS)
```

#2. Datenimport und Auslesen der Profile:

```
setwd("SPEICHERORT")
```

```
daten <- read.table("DATEINAME.txt", sep=";", header=T, dec=",")
```

```
attach(daten)
```

```
KLASSENSPALTE=#Spaltennummer mit Klassenbezeichnung#
```

```
AUSPRÄGUNG= #Spaltennummer mit Ausprägungen#
```

```
Klassen <- levels(daten[,KLASSENSPALTE])
```

```
df <- NULL
```

```
df <- data.frame(Klasse= character(), Mittel=numeric(0), STAB=numeric(0),
```

```
Schiefe=numeric(0), Anzahl=numeric(0)) #Ergebnisvektor definieren
```

#3. Berechnung der Profilausprägung:

```
for ( i in 1:length(Klassen) ) { #Schleife über alle Klassen
```

```
  klasse = Klassen[i]
```

```
  x <- daten[grep(klasse, daten[,KLASSENSPALTE]), AUSPRÄGUNG]
```

```
  df <- rbind(df, data.frame(Klasse=klasse, Mittel=mean(x), STAB=sd(x),
```

```
  Schiefe=skewness(x), Anzahl=length(x))) # Ergebnisse in die Ergebnismatrix
```

```
}
```

#4. Ausgabe der Ergebnisse in eine Datei:

```
write.table(df, file = "Klassen.csv", append = FALSE, quote = TRUE, sep = ";",
```

```
  eol = "\n", na = "NA", dec = ",", row.names = FALSE,
```

```
  col.names = TRUE, qmethod = c("escape", "double"),
```

```
  fileEncoding = "")
```

10 Literatur

- [DIN312] DIN 31051 Grundlagen der Instandhaltung.
- [DIN10] DIN EN 13306 Maintenance - Maintenance terminology.
- [Acko78] Ackoff, R. L.: The art of problem solving: accompanied by Ackoff's fables: Wiley. New York 1978.
- [Anto14] Antony, J.: Design of Experiments for Engineers and Scientists: Elsevier. Burlington 2014.
- [Arno08] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik: Springer. Berlin, Heidelberg 2008.
- [Ashb56] Ashby, W. R.: An introduction to cybernetics: Wiley. New York 1956.
- [Aytu05] Aytug, H.; Lawley, M. A.; McKay, K.; Mohan, S.; Uzsoy, R.: Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions. In: European Journal of Operational Research 161 (2005) 1, S. 86–110.
- [Bamb02] Bamberg, G.; Coenenberg, A. G.: Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre: Vahlen. München 2002.
- [Bark06] Barkawi, K.; Baader, A.; Montanus, S.: Erfolgreich mit After Sales Services Geschäftsstrategien für Servicemanagement und Ersatzteillogistik: Springer. Berlin, Heidelberg 2006.
- [Bene12] Benesch, T.: Schlüsselkonzepte zur Statistik. Die wichtigsten Methoden, Verteilungen, Tests anschaulich erklärt: Springer. Berlin 2012.
- [Brug08] Brugnach, M.; Pahl-Wostl, C.; Lindenschmidt, K. E.; Janssen, J. A. E. B.; Filatova, T.; Mouton, A.; Holtz, G.; van der Keur, P.; Gaber, N.: Chapter Four Complexity and Uncertainty: Rethinking the Modelling Activity. In: A.J. Jakeman, A. E. Rizzoli and S. H. Chen, A. A. Voinov (Hrsg.): Developments in Integrated Environmental Assessment: Elsevier 2008.
- [Burk10] Burkert, E. M.; Lack, H.: "Gemeinsam InTakt" - Lean-Prinzipien auf die Instandhaltung übertragen. In: IPL - Magazin 04 (2010) 11, S. 5–6.
- [Burm01] Burmann, C.: Strategische Flexibilität und Strategiewechsel in turbulenten Märkten: Neuere theoretische Ansätze zur Unternehmensflexibilität. In: DBW Die Betriebswirtschaft (2001) 2, S. 169.
- [Burm06] Burmeister, R.; Exler, F.; Hanreich, K.; Petrick, T. DE102006043292 A1 Wartungsplanungsverfahren, Anmeldetag: 14. Sept. 2006,
- [Chry96] Chryssolouris, G.: Flexibility and its measurement. In: CIRP Annals-Manufacturing Technology 45 (1996) 2, S. 581–587.

- [Cors06] Corsten, H.; Gössinger, R.: Output-Flexibilität in der Dienstleistungsproduktion. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft 76 (2006) 1, S. 29–53.
- [Deli14] Delignette-Muller, M. L.; Dutang, C.; Pouillot, R.; Denis, J. B.: Package Rfitdistrplus in R. In: fitdistrplus: Help to fit of a parametric distribution to non-censored or censored data (2014).
- [Dorm13] Dormann, C. F.: Parametrische Statistik. Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R: Springer Spektrum. Berlin [u.a.] 2013.
- [Dunc72] Duncan, R. B.: Characteristics of Organizational Environments and Perceived Environmental Uncertainty. In: Administrative Science Quarterly 17 (1972) 3, S. 313–327.
- [Eber06] Ebert, D.: Dispensation von Humanressourcen eine flexibilitätsorientierte Betrachtung: Dt. Univ.-Verl. Wiesbaden 2006.
- [Ecks06] Eckstein, P. P.: Repetitorium Statistik: deskriptive Statistik, Stochastik, induktive Statistik ; mit Klausuraufgaben und Lösungen: Gabler. Wiesbaden 2006.
- [Ecks14] Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. Eine realdatenbasierte Einführung mit SPSS: Springer Gabler. Wiesbaden 2014.
- [Eick14] Eickemeyer, S. C.: Kapazitätsplanung und -abstimmung für die Regeneration komplexer Investitionsgüter: TEWISS. Garbsen 2014.
- [Eick11] Eickemeyer S.C; Doroudian S; Schafer S; Nyhuis P: Ein generisches Prozessmodell für die Regeneration komplexer Investitionsgüter. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 11, S. 861–865.
- [Eick13] Eickemeyer S.C; Witte T; Mische V; Busch J: Modell zur bedarfsgerechten Kapazitätsplanung: Mathematisches Optimierungsmodell zur bedarfsgerechten Kapazitätsplanung von Dienstleistungen bei zeitabhängigen Nachfrageverhalten der Kunden. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 9, S. 634–638.
- [Eick12] Eickemeyer, S., C.; Busch, J.; Heinke, Y.; Goßmann, D.: Verfügbarkeitsoptimierung in der Kapazitätsplanung. Eine Methode zur Optimierung von Verfügbarkeiten und deren Berücksichtigung in der Kapazitätsplanung bei der Regeneration komplexer Investitionsgüter. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 12, S. 903–907.
- [Eick12] Eickemeyer, S., C.; Herde, F.: Regeneration komplexer Investitionsgüter. Potenziale für Kapazitätsplanung und -steuerung sowie Auftragsannahme. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 10, S. 761–765.

- [Eick13] Eickemeyer, S., C.; Kruse, S.; Hübner, M.; Schäfer, S.: Mathematische Modelle zur bedarfsgerechten Kapazitätsplanung. Validierung am Beispiel eines Regenerationsdienstleisters. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 7-8, S. 552–555.
- [Elli11] Ellis, S. C.; Shockley, J.; Henry, R. M.: Making Sense of Supply Disruption Risk Research: A Conceptual Framework Grounded in Enactment Theory. In: Journal of Supply Chain Management 47 (2011) 2, S. 65–96.
- [Exle98] Exler, F.; Petrick, T.: Modernes Durchlaufzeitmanagement in einem Instandhaltungsunternehmen. In: DLRG (Hrsg.): Jahrbuch 1998 Band 1: DLRG Bonn 1998.
- [Feit08] Feitelson, G.: Workload modeling for computer systems performance evaluation. In: Book Draft, Version 0.18 (2008).
- [Fisc66] Fischer, R. A.: The Design of Experiments: Hafner Pub. Co. New York 1966.
- [Garn62] Garner, W. R.: Uncertainty and structure as psychological concepts: Wiley. New York 1962.
- [Gaul03] Gaulke, M.: Erfolgreiche Projekte durch systematisches Risikomanagement. In: IM Die Fachzeitschrift für Information Management & Consulting (2003) 04, S. 12–16.
- [Gebh09] Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit: Gabler. Wiesbaden 2009.
- [Gerw93] Gerwin, D.: Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective. In: Management Science 39 (1993) 4, S. 395–410.
- [Gral97] Grall, P. E.; Exler, F.; Lindemeier, H.; Petrick, T.; Westwood, F.; Dressendörfer, V.: Modern Aspects of Economical Civil Transport Revenue Engine Maintenance: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V: Dt. Ges. für Luft- und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth Bonn 1997.
- [Gude10] Gudehus, T.: Logistik. Grundlagen - Strategien - Anwendungen: Springer. Berlin [u.a.] 2010.
- [Helf11] Helfrich, C.: Auftragsdurchsteuerung. In: Koether, R. (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. München 2011.
- [Tout08] Helge Toutenburg; Christian Heumann; M Schomaker; M Wißmann: Deskriptive Statistik: Springer. Berlin 2008.
- [Herd13] Herde, F.: Rahmenbedingungen der industriellen Regeneration von zivilen Flugzeugtriebwerken: Books on Demand. Norderstedt 2013.

- [Hess12] Hesse, S.: Montagegerechte Produktgestaltung. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis: Springer Vieweg Berlin 2012.
- [Hofm13] Hoffmann, P.; Schiele, H.; Krabbendam, K.: Uncertainty, supply risk management and their impact on performance. In: Journal of Purchasing and Supply Management 19 (2013) 3, S. 199–211.
- [Hofm12] Hofmann, E.; Maucher, D.; Hornstein, J.; den Ouden, R.: Investitionsgütereinkauf: Springer. Berlin, Heidelberg 2012.
- [Jako13] Jakoby, W.: Projektmanagement für Ingenieure: Springer Fachmedien. Wiesbaden 2013.
- [Kell14] Kellenbrink, C.: Ressourcenbeschränkte Projektplanung für flexible Projekte: Springer Gabler. Wiesbaden 2014.
- [Kinn04] Kinnison, H. A.: Aviation maintenance management: McGraw-Hill. New York 2004.
- [Klep13] Kleppmann, W.: Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG 2013.
- [Knig21] Knight, F. H.: Risk, uncertainty and profit: Houghton Mifflin Company. Boston, New York 1921.
- [Kopp15] Koppold, N.; Lödding, H.: Bestimmung der Arbeitsumfänge in der Instandhaltungsproduktion. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 12, S. 795–798.
- [Kylä02] Kyläheiko, K.; Sandström, J.; Virkkunen, V.: Dynamic capability view in terms of real options. In: International Journal of Production Economics 80 (2002) 1, S. 65–83.
- [Lang11] Langer, G.: Unternehmen und Nachhaltigkeit: Analyse und Weiterentwicklung aus der Perspektive der wissensbasierten Theorie der Unternehmung. Wiesbaden.
- [Lawr97] Lawrence, S. R.; Sewell, E. C.: Heuristic, optimal, static, and dynamic schedules when processing times are uncertain. In: Journal of Operations Management 15 (1997) 1, S. 71–82.
- [Lödd08] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Springer. Berlin, Heidelberg 2008.
- [Luh03] Luh, P. B.; Feng, W.: From manufacturing scheduling to supply chain coordination: The control of complexity and uncertainty. In: Journal of Systems Science and Systems Engineering 12 (2003) 3, S. 279–297.

-
- [Luhm00] Luhmann, N.: Organisation und Entscheidung: Westdt. Opladen, Wiesbaden 2000.
- [Maun02] Maune, G.: Möglichkeiten des Komplexitätsmanagements für Automobilhersteller aus Basis IT-gestützter durchgängiger Systeme: Shaker. Aachen 2002.
- [McLa01] McLaughlin, M. P.: A compendium of common probability distributions: Michael P. McLaughlin. McLean 2001.
- [Mers11] Merschmann, U.; Thonemann, U. W.: Supply chain flexibility, uncertainty and firm performance: An empirical analysis of German manufacturing firms. In: International Journal of Production Economics 130 (2011) 1, S. 43–53.
- [Mile74] Miles, W. E.; Snow, C. C.; Pfeffer, J.: Organization-Environment: Concepts and Issues. In: Industrial Relations 13 (1974) 3, S. 244–264.
- [Mont08] Montgomery, D. C.: Design and Analysis of Experiments: John Wiley & Sons. New York 2008.
- [Nett14] Netthorn, C.; Siemon, F.; Schoeneberg, Prof Dr Klaus-Peter: Komplexität im Wissensmanagement. In: Schoeneberg, K.-P. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014.
- [Nyhu08] Nyhuis, P.: Produktionskennlinien - Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik: Springer Berlin, Heidelberg 2008.
- [Nyhu12] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Springer. Berlin, Heidelberg 2012.
- [Olbr05] Olbrich, R.; Battenfeld, D.: Variantenvielfalt und Komplexität - kostenorientierte vs. marktorientierte Sicht. In: der markt 44 (2005) 3-4, S. 161–173.
- [Page04] Pagell, M.; Krause, D. R.: Re-exploring the relationship between flexibility and the external environment. In: Journal of Operations Management 21 (2004) 6, S. 629–649.
- [Pata04] Patankar, M. S.; James C, T.: Risk management and error reduction in aviation maintenance: Ashgate. Aldershot, Hampshire, England, Burlington, VT 2004.
- [Pfef03] Pfeffer, J.; Salancik, G. R.: The external control of organizations: A resource dependence perspective: Stanford Business Books. Stanford 2003.
- [Pinn07] Pinnells, E.; Pinnells, J.: Risikomanagement in Projekten internationale Wagnisse identifizieren und minimieren: Gabler. Wiesbaden 2007.
- [Remé14] Reményi, C.; Staudacher, S.: Systematic simulation based approach for the identification and implementation of a scheduling rule in the aircraft engine

- maintenance. In: International Journal of Production Economics 147, Part A (2014), S. 94–107.
- [Ricc05] Ricci, V.: Fitting distributions with r. In: Contributed Documentation available on CRAN (2005).
- [Rupp01] Rupp, O.: Instandhaltungskosten bei zivilen Strahltriebwerken. In: Hüttl, T.; Workshop Maintenance von Flugzeugen und Triebwerken, Institut für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.): Maintenance von Flugzeugen und Triebwerken: Tagungsband des DGLR Workshops "Maintenance von Flugzeugen und Triebwerken", am 5. und 6. Juli 2001: DGLR Bonn 2001.
- [Schä10] Schäfer, T.: Statistik [Lehrbuch]: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden 2010.
- [Scha82] Schanz, G.: Organisationsgestaltung: Struktur und Verhalten: Vahlen. München 1982.
- [Sche10] Schenk, M.: Instandhaltung technischer Systeme Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs: Springer. Heidelberg, New York 2010.
- [Schm11] Schmidt, K. D.: Maß und Wahrscheinlichkeit: Springer. Berlin, Heidelberg 2011.
- [Schn03] Schneeweiss, C.: Distributed decision making - a unified approach. In: European Journal of Operational Research 150 (2003) 2, S. 237–252.
- [Schn03] Schneider, K.; Schreiner, P.: Ein methodischer Ansatz zur Messung der Kundenintegration in der Dienstleistungserbringung. In: IM Die Fachzeitschrift für Information Management & Consulting (2003) 3, S. 51–57.
- [Scho14] Schoeneberg, Prof Dr Klaus-Peter: Komplexität – Einführung in die Komplexitätsforschung und Herausforderungen für die Praxis. In: Schoeneberg, K.-P. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014.
- [Scho03] Scholl, A.; Klein, R.; Häselbarth, L.: Planung im Spannungsfeld zwischen Informationsdynamik und zeitlichen Interdependenzen: Univ., Wirtschaftswiss. Fakultät. Jena 2003.
- [Schu11] Schuh, G.; Kampker, A. (Hrsg.): Strategie und Management produzierender Unternehmen: Springer. Berlin, Heidelberg 2011.
- [Schu12] Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 2: Springer. Berlin, Heidelberg 2012.

- [Segu00] Seguro, J. V.; Lambert, T. W.: Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 85 (2000) 1, S. 75–84.
- [Shor95] Shore, H.: Fitting a distribution by the first two moments (partial and complete). In: *Computational Statistics & Data Analysis* 19 (1995) 5, S. 563–577.
- [Sieb10] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung*: Springer. Berlin, Heidelberg 2010.
- [Spee93] Speel, M.: *Logistikgerechte Überholung von Flugzeugbauteilen*: VDI-Verlag. Düsseldorf 1993.
- [Stas04] Staszewski, W.; Boller, C.; Tomlinson, G. R.: *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*: John Wiley & Sons. Chichester 2004.
- [Steio7] Steinrücke, M.: *Termin-, Kapazitäts- und Materialflussplanung bei auftragsorientierter Werkstattfertigung*: Deutscher Universitätsverlag. Wiesbaden 2007.
- [Stel07] Steland, A.: *Basiswissen Statistik: Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik*: Springer. Berlin, Heidelberg, New York 2007.
- [Stru12] Strunz, M.: *Instandhaltung*: Springer. Berlin, Heidelberg 2012.
- [Tout08] Toutenburg, H.; Heumann, C.: *Deskriptive Statistik*: Springer. Berlin 2008.
- [Vogt69] Vogt, H.: Zur Parameter- und Prozentpunktschätzung von Lebensdauerverteilungen bei kleinem Stichprobenumfang. In: *Metrika* 14 (1969) 1, S. 117–131.
- [Weng13] Wengert, H.; Schittenhelm, F. A.: *Corporate Risk Management*: Springer. Berlin, Heidelberg 2013.
- [Dude14] Werner Scholze-Stubenrecht: *Duden - Die deutsche Rechtschreibung. Das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Regeln*: Bibliographisches Institut. Berlin 2014.
- [Wien03] Wiendahl, H.; Nofen, D.; Lickefett, M.; Holtsch, P.: Maßanzug PPS?: – Anforderungen und Trends im Maschinen- und Anlagenbau Hans-Externe Anforderungen und interne PPS-Zielgewichtung. In: *FB/IE* (2003) 4, S. 148–152.
- [Wien12] Wiendahl, H.-H.: *Auftragsmanagement der industriellen Produktion*: Springer. Berlin, Heidelberg 2012.
- [Wien11] Wiendahl, H.-P.; Begemann, C.; Cieminski, G.; Fischer, A.; Vogel, M.: Kapazitätsterminierung und Kapazitätsflexibilität. In: Koether, R. (Hrsg.):

Taschenbuch der Logistik: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. München 2011.

- [Wien02] Wiendahl, H.-P.; Worbs, J.; Peters, K.: Turbulente Zeiten - Nichtlineare Dynamik in der Produktionslogistik. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2002) 12, S. 633–637.
- [Wolt99] Woltering, A.: Betriebliche Entscheidungsunterstützungssysteme auf der Basis erfahrungsbasierter IV-Methoden: Einordnung, Potentiale, die JANUS-Shell und Perspektiven: Shaker. Aachen 1999.
- [Zimm08] Zimmermann, H.-J.: Operations research: Methoden und Modelle ; für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker: Vieweg. Wiesbaden 2008.

Lebenslauf

Name: Koppold

Vorname: Nico

Staatsangehörigkeit: deutsch

Geburtsdatum: 01.02.1982

Geburtsort, -land: Schrobenhausen, Deutschland

10.1988 - 09.1992 Grundschule in Kühbach

10.1992 - 10.2001 Gymnasium bei St. Stephan in Augsburg

11.2001 - 09.2002 Zivildienst Berliner Stadtmission

10.2002 - 09.2008 Studium an der TU Berlin
Abschluss: Diplom

10.2008 - 03.2010 Projektmanagement Logistik, Strukturplanung bei Volkswagen AG in
Wolfsburg

04.2010 - 01.2015 Produktionsplaner bei MTU Maintenance Berlin-Brandenburg

02.2012 - 05.2017 Externer Doktorand TU Hamburg - Harburg

01.2015 - 12.2016 Supply Chain Manager bei MTU Aero Engines in München

01.2017 - heute Leiter Bestandsmanagement und Business Support bei MTU Aero
Engines in München

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 Standzeitoptimierung von Zerspanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, 2010.

Band 13

Frömming, Hanno: Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt, 2011.

Band 14

Schweitzer, Thomas: Nutzungsgradsteigerung verketteter Produktionslinien, 2011.

Band 15

Wagner, Lars Arne: Szenariobasierte Planung und Steuerung mit Simulation im Schiffbau, 2011.

Band 16

Schäfer, Christoph: Einsatzmodell zur systematischen Nutzung von Virtueller Realität in der Unikatproduktion, 2012.

Band 17

Hartmann, Dirk: Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, 2012.

Band 18

Kuyumcu, Arif: Modellierung der Termintreue in der Produktion, 2013.

Band 19

Czumanski, Thomas: Handlungsorientierte Analyse der Arbeitsproduktivität in der Serienproduktion, 2013.

Band 20

Schütte, Christoph: Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage, 2014.

Band 21

Wandt, Robert: Modellgestützte Fertigungssteuerung in der Unikatfertigung am Beispiel des Schiffbaus, 2014.

Band 22

Eichenseer, Christiane: Beschichtung, thermomechanische Charakterisierung und Spannungsanalyse von Schneidkeramik, 2014.

Band 23

Heinig, Martin: Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten, 2015.

Band 24

Körkel, Gregor K.: Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der Großserie, 2015.

Band 25

Ramirez Martinez, Juan A.: Flexible Automated Assembly Systems for Large CFRP-Structures using Geometrical and Force Information, 2015.

Band 26

Dose, Frank: Methode zur wissensbasierten Prozessentwicklung - Ein Ansatz für die Berücksichtigung sich wandelnder Teilsysteme beim Bohren von Schichtverbunden, 2015.

Band 27

Trzyna, Daniel: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion, 2015.

Band 28

Griefahn, Dominik: 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: Technologiestützte 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.