

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**System zur operativen Produktionsplanung  
unter Berücksichtigung der Risikopräferenz**

**Jan Klöber-Koch**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 18.03.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 19.08.2021 angenommen.



## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV in Augsburg sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die wohlwollende Unterstützung dieser Arbeit sowie für die kontinuierliche Förderung meiner Tätigkeit am Institut. Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfram Volk, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim Lüth, dem Leiter des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik (MIMED), danke ich für die Übernahme des Korreferats bzw. des Prüfungsvorsitzes.

Für die wertvollen Hinweise und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. Julia Berger, Christoph Berger, Dr.-Ing. Julia Pielmeier, Dr.-Ing. Cedric Schultz und Dr.-Ing. Eric Unterberger bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen, die die Zeit am Institut zu einer ganz besonderen gemacht haben. Auch allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben, möchte ich herzlich danken.

Und schließlich, ohne dass es viele Worte braucht:

Maja und Holger,  
Sven,  
Annabelle,  
Doris, Clemens und Lukas.

Danke!

München, im September 2021

Jan Klöber-Koch



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Motivation der Arbeit.....	4
1.3 Zielsetzung .....	6
1.4 Aufbau der Arbeit .....	8
1.5 Forschungsmethodisches Vorgehen.....	9
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>13</b>
2.1 Übersicht .....	13
2.2 Produktionsplanung und -steuerung.....	13
2.2.1 Allgemeines .....	13
2.2.2 Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung .....	15
2.2.3 Grundlagen der Produktionsplanung.....	17
2.2.4 Grundlagen der Produktionssteuerung .....	19
2.2.5 Datengrundlage für die Produktionsplanung und -steuerung.....	20
2.3 Risikomanagement.....	22
2.3.1 Allgemeines .....	22
2.3.2 Definition des Risikos .....	22
2.3.3 Kategorisierung von Risiken .....	24

## **Inhaltsverzeichnis**

---

2.3.4	Risiken in der Produktion.....	26
2.3.5	Risikomanagement in Unternehmen .....	28
2.3.5.1	Allgemeines .....	28
2.3.5.2	Phasen des Risikomanagements .....	29
2.3.5.3	Werkzeuge des Risikomanagements .....	30
2.4	Entscheidungen unter Risiko .....	34
2.4.1	Allgemeines.....	34
2.4.2	Das Entscheidungsmodell .....	35
2.4.3	Risikopräferenz und -verhalten von Entscheidungsträgern .....	36
2.4.4	Testverfahren zur Quantifizierung der Risikopräferenz .....	38
2.5	Fazit.....	40
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Technik.....</b>	<b>41</b>
3.1	Übersicht.....	41
3.2	Ansätze des Risikomanagements in Industrieunternehmen .....	41
3.2.1	Allgemeines.....	41
3.2.2	Überbetriebliche Ansätze .....	42
3.2.3	Innerbetriebliche Ansätze.....	45
3.3	Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung .....	48
3.3.1	Allgemeines.....	48
3.3.2	Losgrößenrechnung.....	48
3.3.3	Reihenfolgeplanung .....	52
3.4	Ansätze zur Berücksichtigung der Risikopräferenz in Industrieunternehmen .....	56
3.5	Ableitung des Handlungsbedarfs .....	60

<b>4</b>	<b>System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz.....</b>	<b>63</b>
4.1	Übersicht .....	63
4.2	Anforderungen an eine risikoorientierte Produktionsplanung.....	63
4.2.1	Allgemeines .....	63
4.2.2	Allgemeine Anforderungen .....	64
4.2.3	Spezifische Anforderungen .....	65
4.3	Systemübersicht .....	66
<b>5</b>	<b>Risikogerechte Systemmodellierung.....</b>	<b>69</b>
5.1	Übersicht .....	69
5.2	Identifikation von Risiken im Produktionssystem.....	69
5.2.1	Allgemeines .....	69
5.2.2	Strukturierung der Wirkung von Produktionsrisiken .....	70
5.2.3	Ablauf der Risikoidentifikation.....	72
5.3	Risikogerechtes Produktionssystemmodell für die Produktionsplanung.	76
5.3.1	Allgemeines .....	76
5.3.2	Prozessmodell.....	78
5.3.3	Ressourcenmodell.....	79
5.3.4	Produktionssystemmodell.....	81
5.3.5	Auftragsmodell .....	82
5.4	Fazit.....	84
<b>6</b>	<b>Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken .....</b>	<b>85</b>
6.1	Übersicht .....	85
6.2	Modellierung von Risikofaktoren .....	85

6.3	Quantifizierung der Risikofaktoren .....	89
6.3.1	Allgemeines.....	89
6.3.2	Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Risikofaktoren ...	89
6.3.3	Bestimmung des Schadensausmaßes der Risikofaktoren .....	91
6.4	Kategorisierung von Produktionsrisiken .....	94
6.5	Abhängigkeiten der Risikofaktoren .....	95
6.6	Risikoaggregation .....	98
6.7	Risikodatenbank.....	101
6.8	Fazit.....	103
<b>7</b>	<b>Entscheidungstheoretisches Modell zur Ermittlung der Risikopräferenz.....</b>	<b>105</b>
7.1	Übersicht.....	105
7.2	Risikopräferenzklassen .....	105
7.3	Auswahl geeigneter Verfahren zur Risikopräferenzermittlung.....	106
7.3.1	Allgemeines.....	106
7.3.2	Bewertungskriterien .....	106
7.3.3	Bewertung der Verfahren.....	108
7.4	Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung .....	111
7.5	Fazit.....	116
<b>8</b>	<b>Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos .....</b>	<b>117</b>
8.1	Übersicht.....	117
8.2	Ablauf der Methode zur operativen Produktionsplanung.....	117
8.3	Automatisierte Einschränkung des Wertebereichs der Risikoträger .....	118

8.4	Parametrierung der Risikoträger .....	121
8.5	Berechnung des Produktionsplans unter Berücksichtigung der Risikopräferenz .....	125
8.6	Fazit.....	132
<b>9</b>	<b>Technische Umsetzung und Validierung.....</b>	<b>133</b>
9.1	Übersicht .....	133
9.2	Beschreibung des betrachteten Produktionssystems.....	133
9.3	Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz.....	136
9.3.1	Allgemeines .....	136
9.3.2	Risikoidentifikation und Systemmodellierung .....	137
9.3.3	Risikoquantifizierung und -präferenzermittlung .....	140
9.3.4	Operative Produktionsplanung .....	143
9.4	Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung.....	145
9.4.1	Allgemeines .....	145
9.4.2	Simulationsmodell und -szenarien .....	146
9.4.3	Ergebnisse der Simulation.....	148
9.5	Bewertung des Systems zur operativen Produktionsplanung .....	149
9.5.1	Allgemeines .....	149
9.5.2	Anforderungsbezogene Bewertung .....	149
9.5.3	Wirtschaftliche Bewertung.....	152
9.5.4	Leitfaden für die betriebliche Anwendung.....	154
9.6	Fazit.....	156

<b>10</b>	<b>Schlussbetrachtung</b> .....	<b>157</b>
10.1	Zusammenfassung .....	157
10.2	Ausblick .....	159
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>161</b>
<b>12</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>185</b>
12.1	Interaktionsmatrix .....	185
12.2	Beschreibung der verwendeten Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz .....	186
12.3	Detaillierte Beschreibung der Bestandteile der Tripel-Notation des betrachteten Planungsproblems .....	197
12.4	Anwendungsfall .....	200
<b>13</b>	<b>Studienarbeiten</b> .....	<b>201</b>

## Abkürzungsverzeichnis

BART	Balloon Analogue Risk Task
BDE	Betriebsdatenerfassung
CGA	Column-Generation-Algorithmus
CLP	Capacitated Lot-Sizing Problem
ConWIP	Constant Work in Progress
CP	Constraintprogrammierung
CSP	Constraint Satisfaction Problem
CVaR	Conditional Value at Risk
DSS	Decision Support System
ERP	Enterprise Resource Planning
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
HLL	Holt-Laury-Lotterie
LPT	Longest Processing Time
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MIP	Mixed Integer Programming
MPL	Multiple Price Lists
OEM	Original Equipment Manufacturer
p. a.	per annum (dt.: pro Jahr)
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PT	Personentag

## **Abkürzungsverzeichnis**

---

RMEA	Risk Mode and Effects Analysis
RNF	Risikonutzenfunktion
RNK	Risikonutzenklasse
RPK	Risikopräferenzklasse
RPZ	Risikoprioritätszahl
RRS	Risikoreferenzsituation
SEPT	Shortest Expected Processing Time
SPT	Shortest Processing Time
SWOT	Strengths Weaknesses Opportunities Threats
TV	Testverfahren
UML	Unified Modeling Language

## Verzeichnis der Formelzeichen

### Lateinische Buchstaben

$a_i$	Alternative $i$
$A$	Menge $A$ der möglichen Kombinationen von Maschinen und Aufträgen
$c_{ET,j}(\xi, \theta)$	Kosten für verspätete bzw. verfrühte Fertigstellung des Auftrags $j$ in den Szenarien $\xi$ und $\theta$
$cm_m$	Maschinenstundensatz je Maschine $m$
$cs_m$	Rüstkostensatz für Maschine $m$
$d(x, y)$	Distanz der Variablen $x$ und $y$
$E(x)$	Erwartungswert von $x$
$J$	Menge einzuplanender Aufträge
$jc_a$	Mögliche Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen in Menge $A$
$K^{Ges}$	Gesamtkosten der Fertigung
$K^B$	Bearbeitungskosten
$K^R$	Rüstkosten
$K^V$	Verszugskosten
$m$	Maschine $m$
$mc_a$	Mögliche Zuordnung von Maschinen $m$ zu Aufträgen in Tupel $A$
$M$	Anzahl zur Verfügung stehender Maschinen $M$
$M_{max}$	Maximale Anzahl zur Verfügung stehender Maschinen $M$
$N_{Sz}$	Anzahl der Szenarien

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$r_{SP}$	Spearman'scher Rangkorrelationskoeffizient
$rg(x_{(i)})$	Rang der Zufallszahl $x_{(i)}$
$\bar{r}_g$	Mittelwert des Rangs X
$RPK_{ges}$	Zusammengefasste Risikopräferenzklasse des Entscheiders
$p_i$	Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios i
$seq_m(\xi, \theta)$	Reihenfolge der Aufträge auf Maschine $m$ in Szenarien $\xi$ und $\theta$
$sv_m(\xi, \theta)$	Sequenzvariable $sv$ für Maschine $m$ in Abhängigkeit der Szenarien $\xi$ und $\theta$
$Sz_i$	Szenario $i$
$t$	Zeiteinheit
$T$	Zeiteinheiten der betrachteten Planungsperiode
$W_a$	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zufallsgröße in Szenario $a$
$x_{am}(\xi, \theta)$	Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen $m$
$x$	Wert der Zufallsgröße X
$X$	Zufallsgröße
$y$	Wert der Zufallsgröße Y
$y_j(\xi, \theta)$	Dauer des Auftrags $j$ in Szenarien $\xi$ und $\theta$
$Y$	Zufallsgröße

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	Maschinenumgebung
$\beta$	Auftragsbeschreibung
$\beta^c$	Zyklischer Servicegrad
$\beta_{ges}$	Gesamtgewichtungsfaktor der Testverfahren
$\beta_{HLL}$	Gewichtungsfaktor der Holt-Laury-Lotterie
$\beta_{RR}$	Gewichtungsfaktor des Risk Rulers
$\beta_{TV}$	Gewichtungsfaktor des Testverfahrens
$\gamma$	Optimierungskriterium
$\mu$	Erwartungswert
$\rho$	Risikoaversionsparameter
$\sigma$	Standardabweichung
$\tau$	Wahrscheinlichkeitsniveau
$\Phi_i$	Präferenzwert der Alternative i
$\theta$	Wartungsdauer
$\Theta$	Szenarien der Wartungsdauer
$\omega_{\theta}^m$	Wahrscheinlichkeit von Szenario $\theta$ auf Maschine m
$\omega_{\xi}^j$	Wahrscheinlichkeit von Szenario $\xi$ für Auftrag $j$
$\xi$	Werkzeugverfügbarkeit
$\Xi$	Szenarien der Werkzeugverfügbarkeit



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Das produzierende Gewerbe stellt einen der zentralen Wirtschaftsbereiche für den Standort Deutschland dar (ABELE & REINHART 2011). Im Jahr 2019 waren hierzu-lande etwa 8,37 Mio. Menschen in diesem Bereich beschäftigt und erwirtschafteten knapp ein Viertel des Bruttoinlandsprodukts (STATISTA GMBH 2020A, STATISTA GMBH 2020B). Zugleich sind Produktion und Produktionstechnik stark von den Entwicklungen des Weltmarkts abhängig. Dies macht besonders die Exportquote für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau im Jahr 2019 von rund 80 % deutlich (STATISTA GMBH 2020C).

Um ihre Marktstellung auch künftig behaupten zu können, müssen produzierende Unternehmen die immer neuen Herausforderungen der sich ständig verändernden Märkte erfolgreich bewältigen (GENC 2015, WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016). Vor allem die kontinuierlich fortschreitende Globalisierung und die damit einhergehende Intensivierung des Wettbewerbs haben den Wandel eines Verkäufermarkts hin zu einem Käufermarkt bewirkt (GENC 2015, REINHART & ZÜHLKE 2017). Dieser Käufermarkt verlangt es Unternehmen ab, stärker auf die Anforderungen ihrer Kunden an Produkt wie Unternehmen einzugehen (KURBEL 2016). Die Individualisierung von Produkten gehört dabei ebenso zum erwarteten Leistungsportfolio wie eine hohe Flexibilität des Unternehmens im Umgang mit kurzfristigen Änderungswünschen des Kunden. Die von Kunden gestellten Anforderungen beeinflussen die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) erheblich (NYHUIS & WIENDAHL 2012, KURBEL 2016, NYHUIS ET AL. 2017): Die logistischen Leistungsmerkmale Lieferzeit und Liefertreue sind in einem solchen Wettbewerbsumfeld entscheidende Erfolgsfaktoren (s. Abbildung 1-1).

Die Ausprägung dieser beiden Leistungsmerkmale wird maßgeblich durch die Ausgestaltung der PPS eines Unternehmens bestimmt (WIENDAHL 2010, SCHUH ET AL. 2012A). Für den Erfolg eines Unternehmens müssen somit Ansätze für die PPS entwickelt werden, die den veränderten Randbedingungen gerecht werden (SCHUH ET AL. 2013). Dies zeigt ebenfalls das Ergebnis einer 2016 durchgeführten Umfrage unter 170 Unternehmen des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus. In dieser gab die Hälfte der befragten Unternehmen an, dass sie davon ausgehen, dass ihre Systeme zur PPS zukünftigen Aufgaben nicht gewachsen sein werden (NYHUIS ET AL. 2016).

# 1 Einleitung

---

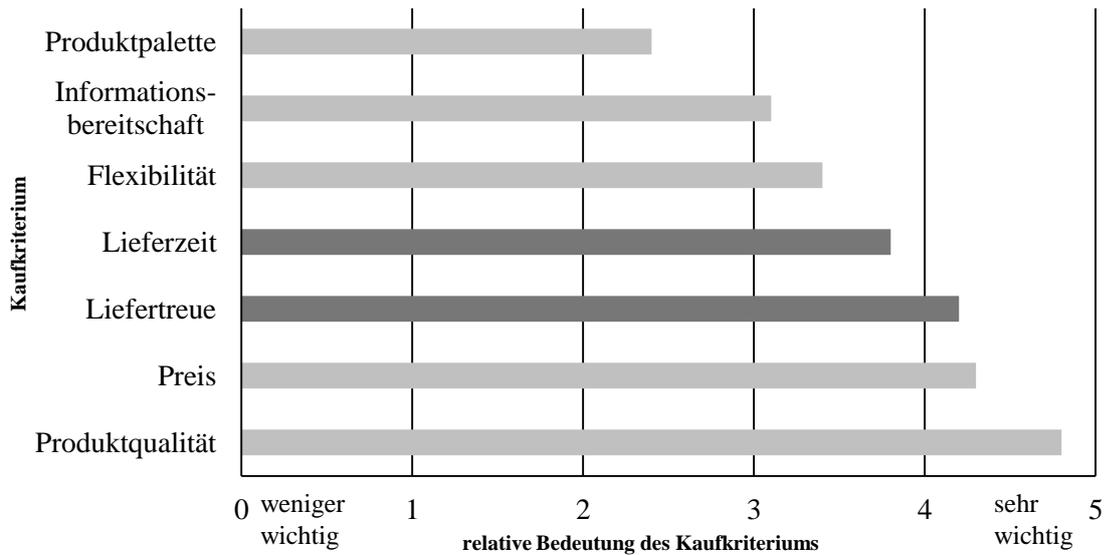


Abbildung 1-1: Kriterien für den Kauf von Produkten (in Anlehnung an NYHUIS & WIENDAHL 2012)

Die konkrete Ausgestaltung der PPS hängt von unternehmensindividuellen Faktoren ab (SCHUH ET AL. 2012A). Unabhängig von der individuellen Ausgestaltung werden die verschiedenen Phasen der PPS heute in der Regel automatisiert mit Hilfe einer Software durchlaufen (SCHUH ET AL. 2012A, KURBEL 2016). Im Rahmen der Bearbeitung der einzelnen Phasen sind verschiedene Entscheidungen zu treffen, wie etwa die Festlegung des Produktionsprogramms oder die Zuweisung von Aufträgen zu Ressourcen (WIENDAHL 2010). Das PPS-System unterstützt den Anwender durch die Generierung von Entscheidungsalternativen für die jeweilige Planungsphase, bspw. in Form von unterschiedlichen Maschinenbelegungsplänen. Die endgültige Auswahl einer Entscheidungsalternative obliegt der für die Planungsphase verantwortlichen Person (KURBEL 2016). Der Produktionsplaner trifft dabei die Entscheidung, welche der durch das PPS-System generierten Planungsalternativen in der aktuellen Situation zu bevorzugen ist (WIENDAHL ET AL. 2017). Die für Unternehmen erfolgskritischen Eigenschaften einer Planungsalternative sind neben der Güte der generierten Lösung besonders auch die Akzeptanz der von PPS-Systemen generierten Lösungen bei den Mitarbeitern (KURBEL 2016). Hier zeigt eine Studie aus dem Jahr 2019, dass die Mitarbeiter nur in 20 % der Unternehmen die Vorgaben der automatisch generierten Lösungen umsetzen. Im Umkehrschluss werden somit in 80 % der Unternehmen Vorgaben, die aus PPS-Systemen stammen, von den Mitarbeitern nur teilweise oder gar nicht berücksichtigt (LÖDDING 2020). Dieses Ergebnis deckt sich auch mit einer weiteren Aussage der

gleichen Studie, wonach 70 % der Studienteilnehmer sich eine bessere Informationsdarstellung und fast die Hälfte der Befragten die Personalisierbarkeit von PPS-Systemen wünschen würden (LÖDDING 2020).

Die exakte Planung unter Einbeziehung aller zur Verfügung stehender Daten wird als weiteres Merkmal zukünftig erfolgreicher PPS-Systeme angesehen (SCHUH ET AL. 2015). Ein realistischer Produktionsplan ist nach LÖDDING (2016) Grundlage für eine hohe logistische Zielerreichung. Sind Unternehmen nicht in der Lage, ihre logistischen Ziele zu erreichen, entstehen regelmäßig hohe Folgekosten (LÖDDING 2016). Dennoch werden heute häufig fehlerhafte Produktionspläne aufgrund veralteter Eingangsdaten generiert (BRAMBRING 2017). Dies ist insbesondere auch auf eine bisher nicht ausreichende Berücksichtigung von Risiken in der Produktionsplanung, wie bspw. den möglichen Ausfall einer Maschine, zurückzuführen (SCHUH ET AL. 2012A). Daneben sind auch die in der Planung verwendeten Informationen risikobehaftet, da es sich um Plandaten handelt, denen stets gewisse Unsicherheiten anhaften (BUSERT & FAY 2018, HENG ET AL. 2019). Noch einmal verdeutlichen lässt sich das Defizit in diesem Bereich bei genauerer Betrachtung der Planungszuverlässigkeit der operativen Planung eines mittelgroßen Unternehmens aus dem Maschinen- und Anlagenbau. Die Planungszuverlässigkeit sinkt in der Produktion bereits nach drei Tagen auf nur mehr 25 % ab (s. Abbildung 1-2). Somit wird nur noch jeder vierte Produktionsauftrag zu dem Zeitpunkt fertiggestellt, zu dem er ursprünglich eingeplant wurde (SCHUH ET AL. 2013).

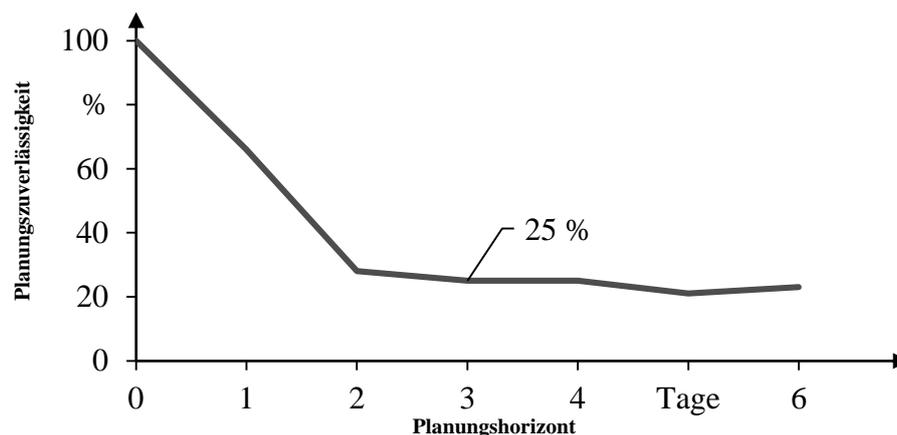


Abbildung 1-2: *Beispielhafte Planungszuverlässigkeit in einem Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus (in Anlehnung an SCHUH ET AL. 2013)*

### 1.2 Motivation der Arbeit

Im Rahmen der Produktionsplanung sind vielfältige Entscheidungen, etwa zur Bestimmung der Losgröße oder der Reihenfolge von Produktionsaufträgen, zu treffen (WIENDAHL 2010). Die zugrundeliegenden Daten sind aufgrund ihrer Eigenschaft als Plandaten immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet (SCHOLL 2001). Somit besteht keine Sicherheit bzgl. des Fertigstellungszeitpunkts eines Auftrags auf einer Maschine, sondern existiert vielmehr ein mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit behafteter Planwert für dessen Fertigstellung. Trotz der Allgegenwärtigkeit solcher Unsicherheiten werden diese bisher nicht ausreichend in der Produktionsplanung berücksichtigt (KLÖBER-KOCH ET AL. 2016, KLÖBER-KOCH ET AL. 2017A, PAPROCKA & SKOŁUD 2017, KARNER ET AL. 2019).

Das Ausmaß der einem Plan immanenten Unsicherheit wird maßgeblich durch den Planungszeitraum beeinflusst: Die einem Produktionsplan innewohnende Unsicherheit reduziert sich, je weniger weit der Zeitraum, auf den sich der Produktionsplan bezieht, in die Zukunft reicht (GEBHARD 2009). Nach SCHOLL (2001) kann sich eine Planung auf unterschiedliche Planungszeiträume beziehen, die sich in strategisch, taktisch und operativ unterteilen lassen. Dabei umfasst der strategische Planungszeitraum zwei bis zehn Jahre, der taktische mehrere Monate und der operative nur Tage bis hin zu wenigen Wochen. Die operative Produktionsplanung ist somit derjenige Zeitraum, in dem Produktionspläne erstellt werden können, die zwar gewisse Unsicherheiten beinhalten, deren Auswirkungen jedoch abschätzbar sind und somit im Rahmen der Planerstellung berücksichtigt werden können (GEBHARD 2009).

Eine Reduzierung der in den Plandaten enthaltenen Unsicherheiten kann durch eine Verbesserung der Datenqualität erreicht werden (MOSLER 2017). Obwohl durch die im Zuge der Digitalisierung stark zunehmende Generierung von Daten in der Produktion eine Vielzahl von Plandaten zur Verfügung steht, ist die Qualität der generierten Daten für die PPS nicht ausreichend. Eine Verbesserung der Datenqualität stellt sich gleichermaßen schwierig dar. Aufgrund des mit der Datenaufbereitung verbundenen hohen Aufwands sowie der hohen Komplexität in der Produktion ist eine wirtschaftliche Bereitstellung von fehlerfreien Plandaten nur sehr schwer zu realisieren. Dies führt dazu, dass Planungsparameter auf falschen Annahmen basieren und in der Folge kaum umsetzbare Produktionspläne generiert werden (LÖDDING 2016, NYHUIS ET AL. 2016, MOSLER 2017).

Die effektive Handhabung der in der Produktionsplanung bestehenden Unsicherheiten kann auch im Rahmen der Produktionssteuerung durch Reaktion auf bereits

eingetretene Unsicherheiten, also Störungen im Produktionsablauf, erreicht werden (KLETTI & SCHUMACHER 2011, LÖDDING 2016). Zur effektiven Reaktion auf Störungen ist eine echtzeitnahe Rückmeldung der Ist-Daten notwendig (LÖDDING 2016, MOSLER 2017). Eine lückenlose Rückmeldung aller relevanten Daten ist jedoch auch im Zuge der Digitalisierung noch mit einem sehr großen Aufwand verbunden. Zudem hat die Produktionssteuerung nur einen eng definierten Handlungsspielraum für die Reaktion auf Störungen zur Verfügung. Die Grenzen dieses Handlungsspielraums werden vor allem durch die Produktionsplanung festgelegt. Die Produktionssteuerung kann somit nur auf Störungen reagieren, für die im Rahmen der Produktionsplanung bereits Handlungsspielräume vorgesehen wurden. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten durch reaktive Maßnahmen während der Produktionssteuerung reicht somit nicht aus, sondern muss bereits in der Produktionsplanung erfolgen (LÖDDING 2016).

Neben der frühzeitigen Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung spielt auch die Akzeptanz der vom PPS-System generierten Handlungsalternativen durch den jeweiligen Entscheider, bspw. den Produktionsplaner, eine wichtige Rolle. Sind Handlungsvorschläge nicht nachvollziehbar oder entsprechen sie nicht der Präferenz des Entscheiders, wird das Ergebnis des Planungsprozesses mit einer höheren Wahrscheinlichkeit mangels Akzeptanz nicht umgesetzt. Dies hat zur Folge, dass Produktionspläne nicht eingehalten werden, sondern die vorgegebene Planung infolge manueller Änderungen durch den Produktionsplaner in Teilen obsolet wird. (HUBLEIN & BREIDBACH 2015, LÖDDING 2020)

Nach LAUX ET AL. (2018) können Entscheidungen, welche auf Basis von Informationen getroffen werden, die mit Unsicherheiten behaftet sind, als Entscheidungen unter Risiko klassifiziert werden. Im Zuge des Entscheidungsprozesses spielt hierbei die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers eine zentrale Rolle. Dabei handelt es sich um die grundsätzliche Einstellung des Entscheidungsträgers zu Risiken in bestimmten Entscheidungssituationen. Je nach Ausprägung der Risikopräferenz von Verantwortlichen können deren Entscheidungen bei sonst gleichen Randbedingungen vollkommen unterschiedlich ausfallen (MEYER 2000, LAUX ET AL. 2018). Bei Übertragung dieses Konzepts auf die Produktionsplanung können somit trotz identischer Planungsparameter unterschiedliche Entscheider bei bestehenden Unsicherheiten aufgrund ihrer unterschiedlichen Risikopräferenz vollkommen unterschiedliche Produktionspläne bevorzugen.

Die Berücksichtigung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers in der Produktionsplanung ist somit, gerade im Hinblick auf die Anforderungen an die Personalisierbarkeit von PPS-Systemen, zielführend. Dadurch kann eine erhöhte Akzeptanz der durch das PPS-System generierten Handlungsalternative erreicht werden als zentrale Voraussetzung für die Einhaltung von Produktionsplänen in der praktischen Umsetzung. Durch die frühzeitige Berücksichtigung von Risiken und der Risikopräferenz des jeweiligen Entscheiders in der Produktionsplanung können mithin Produktionspläne erstellt werden, die die Wahrscheinlichkeit der plangetreuen Umsetzung und damit zugleich die Wahrscheinlichkeit für die Erreichung der im Plan gesetzten Zielgrößen, wie etwa eine hohe Liefertreue, erhöhen.

### 1.3 Zielsetzung

Die dargestellte Ausgangssituation und Motivation zeigen den Bedarf nach einem System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz auf. Der Nutzen eines solchen Systems liegt in der automatisierten Generierung eines Produktionsplans, welcher die Erreichung der vom Unternehmen vorgegebenen Zielgrößen in gesteigertem Maße sicherstellt. Dies wird neben der Integration von im Produktionssystem vorhandenen Risiken in die Planung insbesondere durch die daran anknüpfende Berücksichtigung der individuellen Risikopräferenz des Entscheidungsträgers erreicht. Ein an der Risikopräferenz ausgerichteter Produktionsplan zeichnet sich durch eine erhöhte Akzeptanz beim Entscheidungsträger aus. Die Häufigkeit nachträglich vorgenommener manueller Anpassungen des Plans wird in der Folge reduziert. Hierdurch lässt sich zunächst die Planungseffizienz steigern. Zudem werden durch manuelle Umplanungen unbeabsichtigt induzierte negative Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen verhindert. Zentrale Voraussetzung für ein solches System ist die Kenntnis der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers und der vorherrschenden Risiken im Produktionssystem sowie deren Integration in die operative Produktionsplanung.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Entscheidungsprozess der für die Produktionsplanung verantwortlichen Person unter Beachtung der individuellen Risikopräferenz zu unterstützen. Gleichzeitig soll die Erfüllung der maßgeblichen Zielvorgaben wie die Erreichung der logistischen Zielgrößen weiterhin sichergestellt werden. Abbildung 1-3 können die dargestellte Zielsetzung sowie die damit verbundenen Teilziele dieser Arbeit entnommen werden.

Die *Risikoidentifikation und Systemmodellierung* dient als Basis für die darauf aufbauenden Systemelemente. Eine zentrale Frage hierbei ist, welche Risiken in einem Produktionssystem vorherrschen und wie deren Relevanz für die Produktionsplanung ermittelt werden kann. Die Festlegung eines geeigneten Vorgehens ist daher Grundlage für die Produktionssystemmodellierung, bei der eine Abbildung der identifizierten Risiken erfolgen muss.

Für die *Risikoanalyse* werden bereits bestehende Ansätze zur Quantifizierung von Risiken analysiert und adaptiert, um auch die Interdependenzen von Risiken berücksichtigen zu können. Darüber hinaus ist eine Risikodatenbank zu entwickeln, in welcher die relevanten Informationen abgelegt werden können.

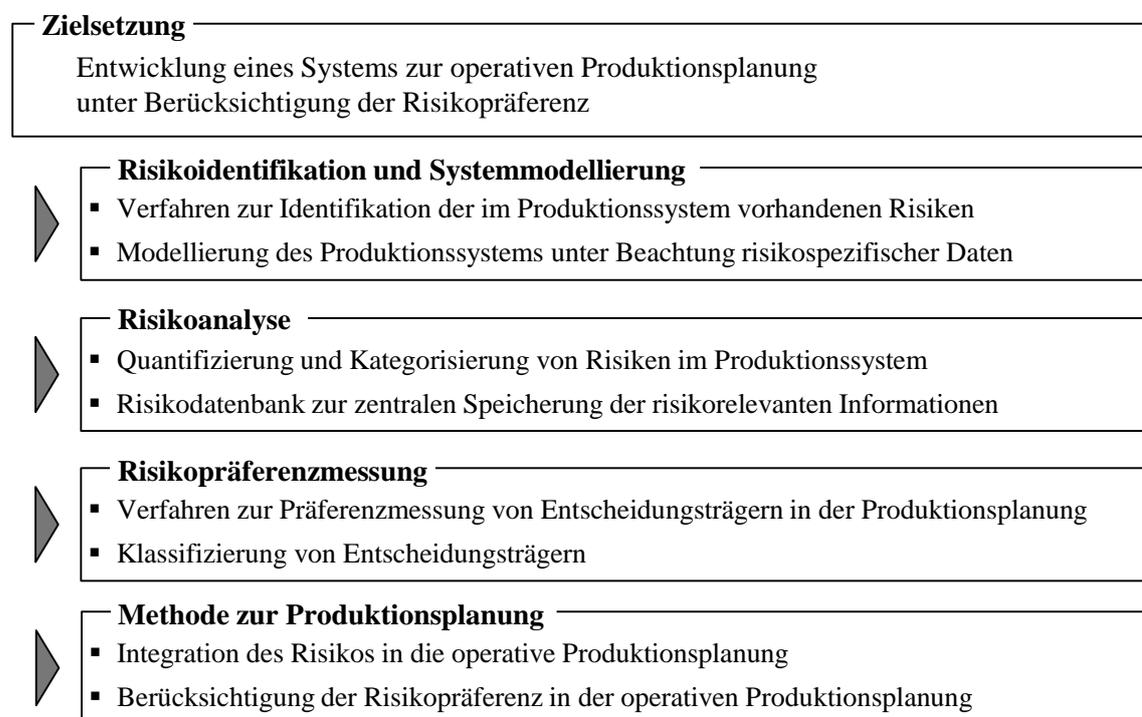


Abbildung 1-3: Zielsetzung und abgeleitete Teilziele der vorliegenden Arbeit

Zur *Risikopräferenzmessung* wird ein Vorgehen entwickelt, das die Messung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung ermöglicht. Dazu werden etablierte Verfahren aus anderen Wissenschaftsbereichen wie der Entscheidungstheorie analysiert und für den Anwendungsfall der Produktionsplanung angepasst.

Darauf aufbauend wird eine *Methode zur Produktionsplanung* entwickelt, welche neben den vorherrschenden Risiken auch die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers in den Planungsprozess integriert. Dazu müssen geeignete Produktionspla-

# 1 Einleitung

---

nungsparameter identifiziert werden, die je nach Risikopräferenz des Entscheidungsträgers geändert werden können. Außerdem ist eine Prognose der Auswirkungen der analysierten Risiken durchzuführen, um diese bereits bei der Plangerierung berücksichtigen zu können.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Um die im vorhergehenden Abschnitt erläuterte Zielstellung erfüllen zu können, untergliedert sich die vorliegende Arbeit in zehn Kapitel. Der strukturelle Aufbau der Arbeit kann Abbildung 1-4 entnommen werden.

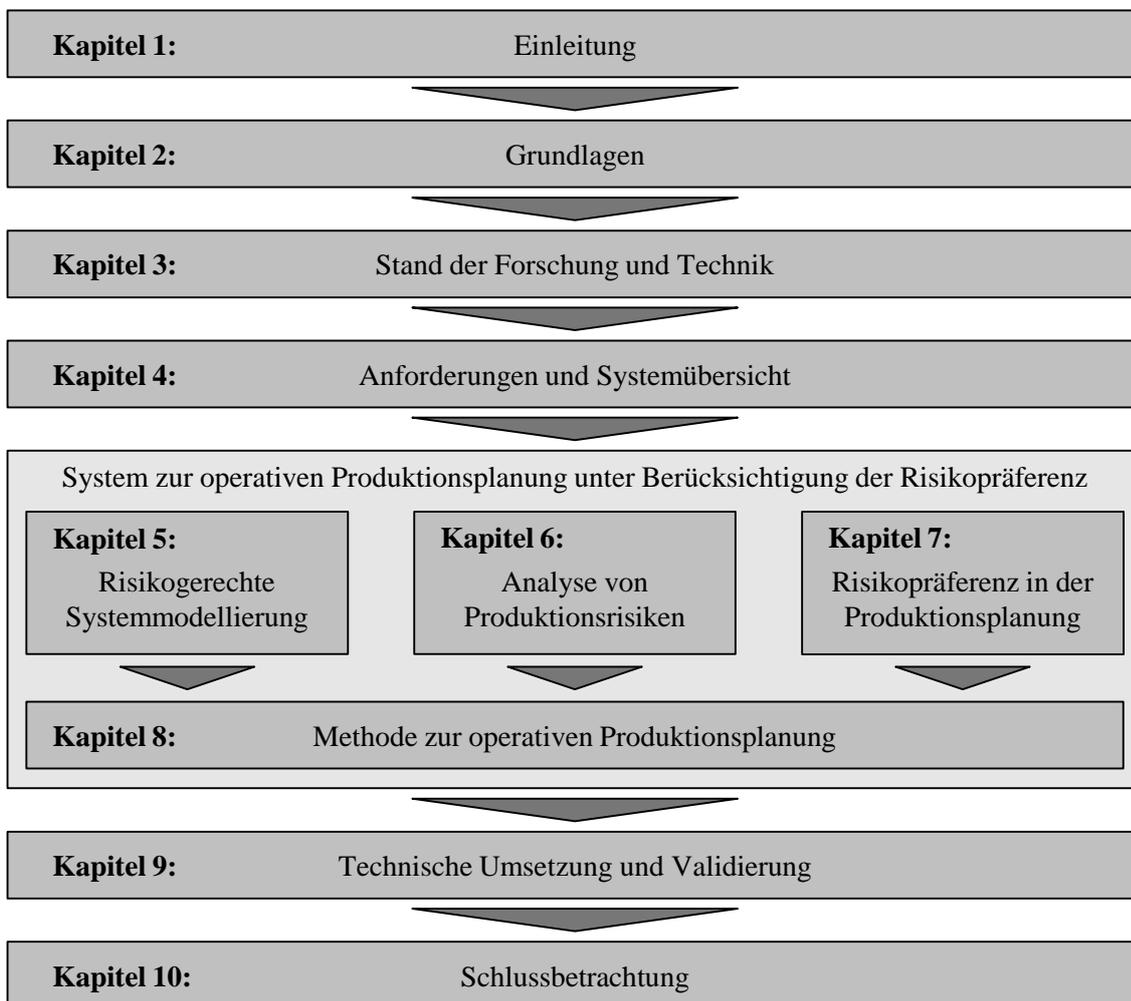


Abbildung 1-4: Aufbau der vorliegenden Arbeit

*Kapitel 1* stellt die Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung der Arbeit dar. Danach folgen der Aufbau der Arbeit sowie eine Einordnung des forschungsmethodischen Vorgehens. Anknüpfend daran werden in *Kapitel 2* die erforderlichen

theoretischen Grundlagen dargelegt. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der PPS, dem Risikomanagement und der Entscheidungstheorie. In *Kapitel 3* erfolgt die Analyse des Stands der Forschung und Technik, der sich im Hinblick auf die Zielstellung in Risikomanagement in Industrieunternehmen, Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung und die Berücksichtigung der Risikopräferenz in Industrieunternehmen unterteilen lässt. Daraus wird der Handlungsbedarf abgeleitet.

In *Kapitel 4* erfolgt die Formulierung der Anforderungen an ein System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz sowie die Darstellung dieses Systems mit seinen Elementen. Basierend darauf werden in *Kapitel 5* das Vorgehen zur Identifikation von Risiken und darauf aufbauend ein geeigneter Ansatz zur Modellierung des Produktionssystems entwickelt. Anschließend erfolgt in *Kapitel 6* die Entwicklung eines Vorgehens zur Analyse von Produktionsrisiken. In *Kapitel 7* wird ein Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz konzeptioniert. Abschließend wird in *Kapitel 8* die Methode zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz entwickelt. Besonderer Fokus wird dabei auf die Integration der Risikobewertung und der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers in die operative Produktionsplanung gelegt. Die technische Umsetzung des Systems und dessen Validierung erfolgen in *Kapitel 9*. Im abschließenden *Kapitel 10* erfolgt eine zusammenfassende Betrachtung der Arbeit sowie ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf zur weiteren Integration von Risiken in die Produktionsplanung.

## 1.5 Forschungsmethodisches Vorgehen

Die vorliegende Arbeit lässt sich dem Bereich der Ingenieurwissenschaften zuordnen und unterliegt damit den Anforderungen der Realwissenschaften. Das Ziel der Realwissenschaften ist nach ULRICH & HILL (1976) die „(...) *Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch (sinnlich) wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte.*“

Die zielgerichtete und effiziente Generierung wissenschaftlicher Erkenntnisse basiert auf der Anwendung einer Forschungsmethodik. Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse werden unter Anwendung der von BLESSING & CHAKRABARTI (2009) vorgestellten Vorgehensweise erarbeitet. Demnach besteht die Forschungsmethodik vor allem aus vier Phasen: *Klärung des Forschungsziels, Deskriptive Studie I, Präskriptive Studie, Deskriptive Studie II*. Die einzelnen Phasen werden

## 1 Einleitung

---

dabei grundsätzlich sequentiell durchlaufen. Jedoch ist eine iterative Anwendung der unterschiedlichen Phasen genauso möglich wie das nur teilweise Durchlaufen einzelner Phasen des methodischen Rahmenwerks. Abhängig von bestimmten Faktoren, bspw. dem für die Forschung vorgegebenen Zeitrahmen oder dem Stand der Erkenntnisse bei Forschungsbeginn, können die einzelnen Phasen unterschiedlich intensiv bearbeitet oder in bestimmten Konstellationen auch ganz übersprungen werden.

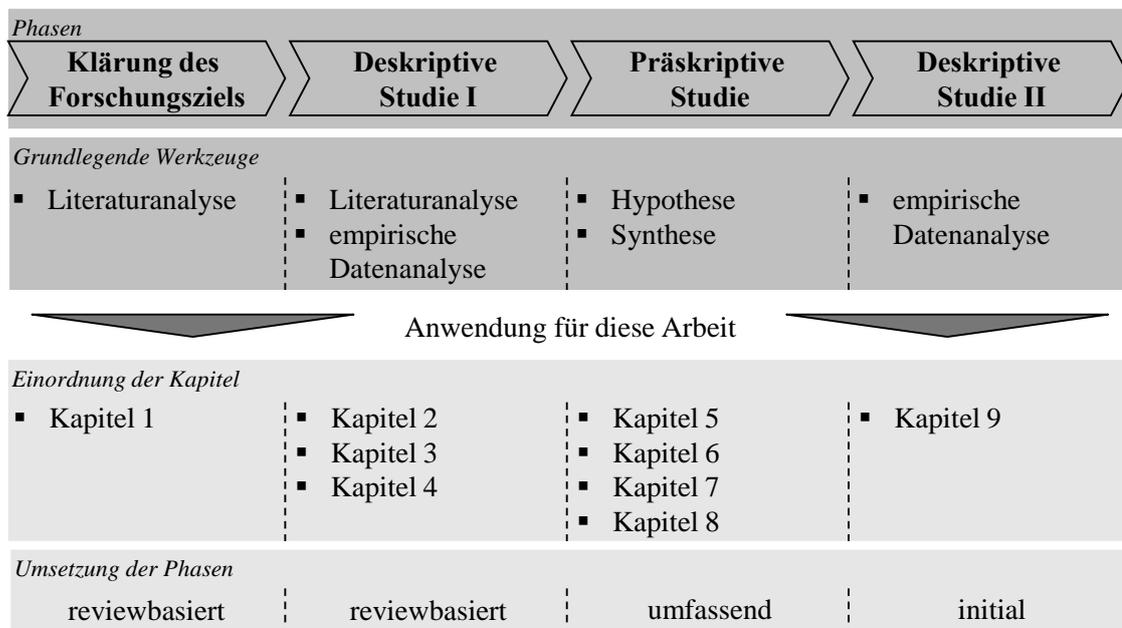
In der ersten Phase *Klärung des Forschungsziels* wird insbesondere eine erste Beschreibung des Forschungsziels sowie der aktuell zugrundeliegenden Ausgangssituation erarbeitet. Dazu wird vor allem auf die Durchführung einer Literaturrecherche zurückgegriffen. In der anschließenden Phase *Deskriptive Studie I* wird die Literaturrecherche zum aufgezeigten Forschungsziel noch einmal intensiviert, um das Verständnis für die Ausgangssituation und die thematischen Grundlagen zu vertiefen. Daneben kann auch eine Analyse erster Ergebnisse empirischer Studien durchgeführt werden. Ziel ist es, dabei mögliche Ansatzpunkte zur Verbesserung von Defiziten vorhandener Ansätze herauszuarbeiten und zu konkretisieren. Im Rahmen der *Präskriptiven Studie*, der dritten Phase des forschungsmethodischen Vorgehens, ist ein Ansatz zu entwickeln, der die in den vorhergehenden Phasen identifizierten Defizite adressiert und idealerweise vollständig behebt. Auf welche Werkzeuge der einzelne Forscher zur Entwicklung neuer Lösungsansätze zurückgreifen kann, hängt maßgeblich von seiner individuellen Erfahrung und Kreativität ab. Üblicherweise wird in dieser Phase mit der Aufstellung neuer Hypothesen oder einer Synthese von bereits vorhandenen Ansätzen gearbeitet. Die abschließende Phase *Deskriptive Studie II* dient der Absicherung der Funktionsfähigkeit des zuvor entwickelten Ansatzes durch empirische Datenanalyse. Dazu kann etwa eine Szenarioanalyse durchgeführt werden. (BLESSING & CHAKRABARTI 2009)

Aus der bisherigen Forschungspraxis haben BLESSING & CHAKRABARTI (2009) acht unterschiedliche Typen von Forschungsarbeiten abgeleitet, bei denen sich die Intensität der Bearbeitung der einzelnen Phasen ebenso wie die herangezogenen grundlegenden Werkzeuge der Bearbeitung jeweils nach den spezifischen Rahmenbedingungen des untersuchten Themas unterscheiden. Für die vorliegende Arbeit wurde das forschungsmethodische Vorgehen nach Typ 3 der Einordnung nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) zugrunde gelegt. Dabei wird in den ersten beiden Phasen reviewbasiert ausschließlich auf Grundlage von Literaturrecherchen vorgegangen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass in den für die vorliegende Arbeit relevanten Themengebieten bereits umfassende Vorarbeiten existieren. Anhand dieser lassen sich Defizite des aktuellen Forschungsstandes identifizieren,

## 1.5 Forschungsmethodisches Vorgehen

aus denen wiederum der konkrete Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet werden kann (vgl. Kapitel 1 bis 4). Aufbauend auf diesen rein reviewbasiert gewonnenen Erkenntnissen wird im Anschluss die dritte Phase umfassend durchlaufen. Da in dieser Phase der Ansatz zur Behebung des identifizierten Defizits grundlegend neu erarbeitet wird, ist hier eine intensive und möglichst erschöpfende Behandlung der für das zu entwickelnde System relevanten Themenbereiche erforderlich (vgl. Kapitel 5 bis 8). In der abschließenden vierten Phase wird eine erste Validierung des entwickelten Systems durchgeführt, um so die prinzipielle Funktionsfähigkeit zu belegen (vgl. Kapitel 9). Nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) entspricht dies einer initialen Bearbeitung dieser letzten Phase.

Neben einer Darstellung der unterschiedlichen Phasen kann der folgenden Abbildung 1-5 eine Einordnung dieser Arbeit in das forschungsmethodische Rahmenwerk nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) entnommen werden.



*Abbildung 1-5: Forschungsmethodisches Vorgehen dieser Arbeit nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009)*



## 2 Grundlagen

### 2.1 Übersicht

Im folgenden Kapitel werden, entsprechend der dargestellten Ausgangssituation und Motivation, die für diese Arbeit relevanten theoretischen Grundlagen erläutert. Hierfür werden in Abschnitt 2.2 wichtige Aspekte der PPS dargelegt, um im Anschluss in Kapitel 2.3 auf das Themengebiet des Risikomanagements eingehen zu können. In Kapitel 2.4 werden die Grundlagen der Entscheidungstheorie erläutert.

### 2.2 Produktionsplanung und -steuerung

#### 2.2.1 Allgemeines

Die PPS stellt das Bindeglied zwischen der Entwicklung und Fertigung bzw. Montage in einem Unternehmen dar. Das Ziel der PPS ist die Planung und Durchführung der zur Fertigung und Montage eines Produkts benötigten Aufgaben unter Beachtung terminlicher und wirtschaftlicher Restriktionen (EVERSHEIM 2002). Dabei sind auch unvermeidbare Störungen wie Maschinenausfälle oder Lieferverzögerungen zu berücksichtigen (WIENDAHL 2010). Die PPS untergliedert sich in die Produktionsplanung und die Produktionssteuerung: Die Produktionsplanung kann nach VDI (1992) als *„systematisches Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele“* definiert werden. Die Produktionssteuerung ist laut VDI (1992) das *„Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung der Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität und Kosten und Arbeitsbedingungen“*.

Den beiden Disziplinen der PPS können bestimmte Aufgaben zugeordnet werden, welche anhand des weit verbreiteten Aachener PPS-Modells erläutert werden (s. Abbildung 2-1). Nach diesem Modell kann zwischen Netzwerk-, Kern- und Querschnittsaufgaben der PPS unterschieden werden. Die Netzwerk- und Querschnittsaufgaben werden hier nicht weiter erläutert, da sie im Rahmen dieser Arbeit keine Relevanz haben. Die Kernaufgaben lassen sich in *Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung, Fremdbezugsplanung und -steuerung* und *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* unterteilen.

## 2 Grundlagen

Auf Basis real angefragter oder prognostizierter Kundenbedarfe wird in der *Produktionsprogrammplanung* der Bedarf an verkaufsfähigen Endprodukten für eine bestimmte Periode festgelegt (HACKSTEIN 1989). Ausgehend davon werden in der *Produktionsbedarfsplanung* die mittelfristig erforderlichen Ressourcen für die Realisierung des Produktionsprogramms bestimmt. Die Detaillierung des Produktionsprogramms unter Beachtung der Randbedingungen aus der Produktionsbedarfsplanung obliegt der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* (SCHUH ET AL. 2012A). Daraus wird wiederum im Rahmen der *Produktionsbedarfsplanung* anhand von Stücklisten und verfügbaren Lagerbeständen der Bedarf an Komponenten und sonstigen Ressourcen ermittelt. In der *Fremdbezugsplanung und -steuerung* wird auf Basis dieses Beschaffungsprogramms festgelegt, wann welche Teile und Komponenten in welcher Menge zu beschaffen sind. Anschließend erfolgt unter Berücksichtigung der verfügbaren Kapazitäten die zeitliche Einplanung der Herstellung bzw. Beschaffung dieser Ressourcen. Die Fertigungsaufträge müssen dann in der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* im Rahmen des bestehenden Entscheidungsspielraums detailliert und die Umsetzung realisiert und überwacht werden (LÖDDING 2016, SCHUH ET AL. 2012A). Die Datenverwaltung ist für die Speicherung und Aktualisierung aller für die PPS relevanten Daten zuständig (SCHUH ET AL. 2012A).

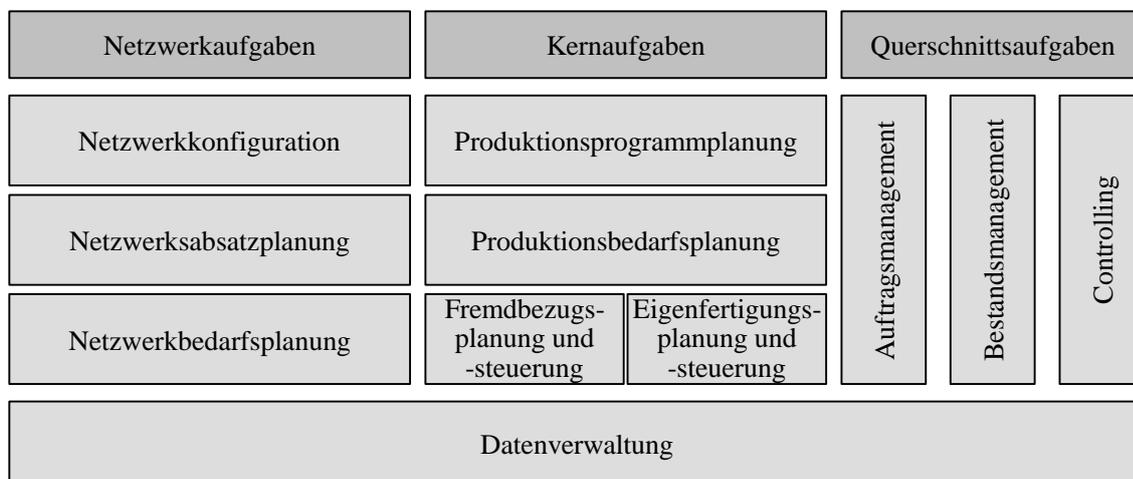


Abbildung 2-1: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells  
(SCHUH ET AL. 2012A)

Im Folgenden werden das Zielsystem der PPS (vgl. Abschnitt 2.2.2) sowie Grundlagen der Produktionsplanung (vgl. Abschnitt 2.2.3) und der Produktionssteuerung (vgl. Abschnitt 2.2.4) dargelegt. Abschließend werden aufgrund ihrer Relevanz Daten für die PPS thematisiert (vgl. Abschnitt 2.2.5).

### 2.2.2 Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung

Die PPS soll grundsätzlich eine hohe *Logistikleistung* bei gleichzeitig geringen *Logistikkosten* sicherstellen (vgl. Abbildung 2-2). Die *Logistikleistung* wird dabei unmittelbar vom Markt in Gestalt von Liefertreue und Lieferzeit wahrgenommen. Eine idealerweise hohe Liefertreue wird durch eine hohe Termintreue der Produktion erreicht. Die Lieferzeit sollte relativ gering sein, was durch eine kurze Durchlaufzeit der Aufträge realisiert werden kann. Demgegenüber stehen die *Logistikkosten*, welche gering zu halten sind. Sie bestehen einerseits aus den Kapitalbindungskosten, welche durch niedrige Bestände an Roh-, Halb- und Fertigmateriale in der Produktion reduziert werden können. Andererseits werden die Logistikkosten auch durch die Prozesskosten beeinflusst. Diese können durch eine hohe Auslastung reduziert werden. (NYHUIS 2008, WIENDAHL 2010)

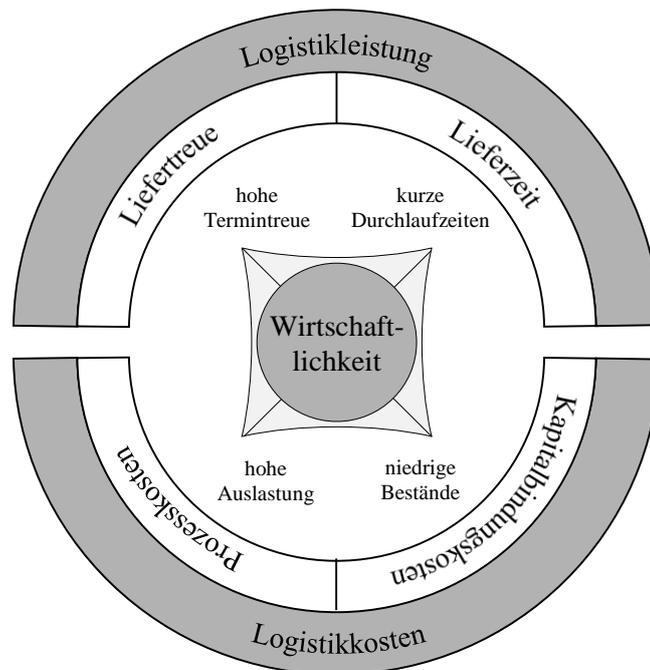


Abbildung 2-2: Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung  
(in Anlehnung an WIENDAHL 2010)

Die genannten Zielgrößen der PPS können nicht alle in gleichem Maße erfüllt werden, da sie teilweise in Konkurrenz zueinander stehen. Eine hohe Termintreue bedingt hohe Bestände, welche jedoch im Sinne der Reduktion der Logistikkosten zu vermeiden sind. Dieses Problem der Zielkonkurrenz wird gemeinhin als das „Dilemma der Ablaufplanung“ bezeichnet (HACKSTEIN 1989, ZÄPFEL 2001, NYHUIS 2008, WIENDAHL 2010).

## 2 Grundlagen

---

Nachfolgend werden die vier logistischen Zielgrößen detailliert beschrieben, da sie eine hohe Bedeutung für das Unternehmen haben und somit für das zu entwickelnde System zur operativen Produktionsplanung relevant sind (LÖDDING 2016).

Die Voraussetzung für eine kurze Lieferzeit sind geringe interne *Durchlaufzeiten*. Die Durchlaufzeit ist definiert als die Zeitspanne zwischen der Auftragsfreigabe und dem Bearbeitungsende des betrachteten Auftrags. Dabei sind auch zusätzlich anfallende Zeiten für das Rüsten von Maschinen sowie Transport oder Liegezeiten der Halbfabrikate und Produkte zwischen zwei Bearbeitungsschritten bzw. nach der Bearbeitung zu berücksichtigen (DOMSCHKE ET AL. 1997). Die Durchlaufzeit eines Auftrags besteht bis zu 90 % aus solchen nichtwertschöpfenden Zeitanteilen (WIENDAHL 2010). Sie hat maßgeblichen Einfluss auf die Flexibilität eines Unternehmens kurzfristig Änderungswünsche des Kunden in der Bestellung zu berücksichtigen (LÖDDING 2016).

Die *Terminstreue* ist definiert als der prozentuale Anteil pünktlich fertiggestellter Aufträge innerhalb eines zuvor festgelegten Terminintervalls (YU 2001, LÖDDING 2016). Sie wirkt direkt, ggf. abgeschwächt durch einen Lagerpuffer, auf die Liefer(termin)treue des Unternehmens, welche direkt vom Markt wahrgenommen und heutzutage als wichtigste logistische Zielgröße betrachtet wird (WIENDAHL 2010, SCHUH ET AL. 2013, LÖDDING 2016). Die Verfehlung der Terminstreue hat zudem eine weitere negative Auswirkung auf die Zielgrößen des Unternehmens: Die verfrühte Fertigstellung führt zum Aufbau von Beständen, was die Logistikkosten negativ beeinflusst.

Neben den extern wahrgenommenen Zielgrößen sind auch intern relevante Zielgrößen, zusammengefasst als Logistikkosten, für den Unternehmenserfolg entscheidend. Diese werden maßgeblich durch die Prozess- und Kapitalbindungskosten beeinflusst. Die Prozesskosten bestehen aus fixen und variablen Kostenanteilen. Fixe Kosten sind solche, welche auftragsunabhängig anfallen. Variable Prozesskosten sind von der *Auslastung* des Produktionssystems abhängig. Die Auslastung ist definiert als die mittlere Leistung im Verhältnis zur maximal möglichen Leistung einer Maschine oder eines Produktionssystems. Idealerweise wird ein Produktionssystem möglichst hoch ausgelastet. Die maximal mögliche Auslastung eines Produktionssystems wird durch den Durchsatzengpass bestimmt. Ist dieser maximal ausgelastet, kann die Leistung des Produktionssystems nicht weiter ge-

steigert werden solange keine Aufträge vorhanden sind, die nicht mit dem Durchsatzengpass bearbeitet werden müssen. Daneben wird die maximale Auslastung rein faktisch auch durch die Marktnachfrage begrenzt. (LÖDDING 2016)

Die Kapitalbindungskosten korrelieren in der Produktion vor allem mit den *Beständen* repräsentiert. Der Bestand eines Unternehmens kann in Fertigungs- und Lagerbestand unterschieden werden. Der Lagerbestand umfasst Fertigwaren, Halbfabrikate und Rohmaterialien. Der Fertigungsbestand umfasst, als Abgrenzung zum Lagerbestand, den freigegebenen, noch nicht fertiggestellten Arbeitsvorrat vor einer Maschine bzw. einem Arbeitssystem. Beide Arten von Beständen wirken sich direkt auf die Kapitalbindungskosten des Unternehmens aus, weshalb eine Reduktion des Bestands zur Reduktion der Kapitalbindungskosten angestrebt wird. Ferner kann der Bestand nicht nur als Ziel- sondern auch als Regelgröße verwendet werden, da er die Durchlaufzeit der Aufträge beeinflusst. (WIEN-DAHL 2010, LÖDDING 2016)

Die hier beschriebenen logistischen Zielgrößen müssen unter Berücksichtigung der Unternehmensstrategie am Markt optimal aufeinander abgestimmt werden. Die PPS hat für die Erreichung der logistischen Zielgrößen eine zentrale Stellung. Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der PPS zur optimalen Erfüllung der Zielgrößen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 2.2.3 Grundlagen der Produktionsplanung

Den Ausgangspunkt der Produktionsplanung stellt die *Produktionsprogrammplanung* dar. In enger Abstimmung zwischen Produktion und Vertrieb werden die zu erfüllenden Primärbedarfe, also die Anzahl der zu produzierenden verkaufsfähigen Produkte, für einen bestimmten Planungszeitraum festgelegt. Dabei findet eine grobe Abschätzung und Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Kapazitäten statt. Das Ergebnis ist ein Produktionsprogramm das für den folgenden Planungszeitraum die Menge der herzustellenden Produkte festlegt. Es dient als Grundlage für die nachfolgenden Planungsschritte. Aufgrund unterschiedlicher Interessen der mitwirkenden Bereiche Marketing und Produktion bleibt festzuhalten, dass das Produktionsprogramm immer auch einen Kompromiss zwischen Zielgrößen der Produktion und solchen des Marketings darstellt. (ZÄPFEL 2001, SCHUH ET AL. 2012A)

In der *Produktionsbedarfsplanung* werden aus dem Produktionsprogramm die zur Realisierung innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums benötigten Material- und

## 2 Grundlagen

---

Kapazitätsbedarfe bestimmt. Dafür werden aus den festgelegten Primärbedarfen die Sekundärbedarfe aller in den Produktionsprozess einfließenden Ressourcen, z. B. Material, Betriebsmittel, Personal, abgeleitet. Diese Bedarfe werden dem vorhandenen Kapazitätsangebot gegenübergestellt, um die tatsächliche Auslastung der Kapazitäten durch Aufträge ermitteln zu können. Das Ergebnis der Produktionsbedarfsplanung sind Fertigungsaufträge mit zugeordneten Planendterminen. Daneben wird auch ein Beschaffungsprogramm erzeugt, welches die in der betrachteten Periode einzukaufenden Materialien vorgibt. Das Beschaffungsprogramm wird in der *Fremdbezugsplanung und -steuerung* operativ umgesetzt. Es werden Angebote eingeholt, Lieferanten ausgewählt und Bestellungen freigegeben (WIENDAHL 2010, SCHUH ET AL. 2012A). Dieser Teil der PPS jedoch wird nachfolgend nicht weiter betrachtet, da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* liegt.

Der erste Schritt in der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* ist die Losgrößenrechnung. Diese legt wirtschaftliche Losgrößen für die unterschiedlichen Produkte und Bereiche der Produktion fest. Dabei haben sowohl die Bestände als auch die Rüstaufwände einen Einfluss auf die optimale Losgröße. Im Anschluss an die Losgrößenrechnung werden die Start- und Endtermine der Fertigungsaufträge für die einzelnen Bereiche bestimmt. Dabei gibt es eine zeitliche Flexibilität, die aus der Differenz des spätesten End- und des frühesten Startzeitpunkts eines Auftrags resultiert, sofern der Bearbeitungszeitraum kleiner als diese Zeitspanne ist. In der sich anschließenden Ressourcenfeinplanung werden die tatsächlich zur Verfügung stehenden Kapazitäten von Personal, Betriebs- und Hilfsmitteln berücksichtigt und dem Kapazitätsbedarf gegenübergestellt. Hierbei werden auch aktuelle Rückmeldungen aus der Produktion berücksichtigt und Über- bzw. Unterauslastungen aufgezeigt. Ermittelte suboptimale Belegungen sollten dann idealerweise durch eine Anpassung der Belegung oder des zur Verfügung stehenden Kapazitätsangebots eliminiert werden. Daran schließt sich die Reihenfolgeplanung an. In den vorangegangenen Schritten wurden für das vorgegebene Planungsintervall die Bearbeitungszeitpunkte festgelegt, jedoch keine Abarbeitungsreihenfolgen der Warteschlangen vor den Arbeitssystemen. Dieser Schritt erfolgt in der Reihenfolgeplanung. Die Reihenfolge wird meist durch Prioritätsregeln, z. B. kürzeste Bearbeitungszeit (BZ), frühester Endtermin, oder Kumulationsregeln, z. B. Rüstzeitoptimierung, festgelegt. (WIENDAHL 2010, SCHUH ET AL. 2012A)

Neben der Gliederung der Produktionsplanung nach bestimmten Aufgaben, lässt sich die Produktionsplanung auch zeitlich in verschiedene Phasen unterteilen.

Nach SCHOLL (2001) kann die Produktionsplanung in eine *strategische*, eine *taktische* und eine *operative* Phase unterschieden werden. Die inhaltliche und zeitliche Reichweite der drei Phasen nimmt von der strategischen über die taktische bis hin zur operativen ab.

Die *strategische* Planung hat einen Zeithorizont zwischen zwei und zehn Jahren. Hier werden langfristige Entscheidungen wie Branchenzugehörigkeit oder die Auswahl des Produktionsstandorts getroffen. In der mittelfristigen *taktischen* Planung, deren Planungszeitraum sich von mehreren Monaten bis hin zu zwei Jahren erstreckt, wird die Ausgestaltung der strategischen Vorgaben durchgeführt. Dazu zählt etwa die Ausstattung eines Unternehmens mit Investitionsgütern oder die Auswahl eines IT-Systems. In der *operativen* Produktionsplanung mit einem Entscheidungshorizont von Stunden bis hin zu wenigen Wochen wird eine Detailplanung durchgeführt.

Basierend auf dieser zeitlichen Einteilung der Planungsphasen können die beschriebenen Aufgaben der Produktionsplanung jeweils einem bestimmten Zeithorizont zugeordnet werden. Die *Produktionsprogrammplanung* erfüllt langfristige strategische Aufgaben, die *Produktionsbedarfsplanung* besitzt einen mittelfristigen Zeithorizont und die operative Produktionsplanung mit der *Losgrößenplanung*, der *Kapazitätsabstimmung* sowie der *Reihenfolgeplanung* einen kurzfristigen Zeithorizont.

### 2.2.4 Grundlagen der Produktionssteuerung

Im Rahmen der Produktionssteuerung werden die Vorgaben der Produktionsplanung in der Produktion umgesetzt. In einem ersten Schritt wird dafür die Verfügbarkeit der notwendigen Ressourcen, insbesondere der Materialien und Kapazitäten, unmittelbar vor der Freigabe des Auftrags überprüft. Aufgrund auftretender Störungen im Produktionsablauf, wie bspw. bei einem unerwarteten Maschinenausfall, muss die Ressourcenverfügbarkeit unmittelbar vor der jeweiligen Auftragsfreigabe sichergestellt werden. Ist die Ressourcenverfügbarkeit bestätigt, wird der betroffene Auftrag freigegeben und die Bereitstellung der benötigten Ressourcen veranlasst.

Die Auftragsfreigabe lässt sich dabei anhand von drei Merkmalen klassifizieren. Das *Kriterium* legt fest, anhand welcher Eigenschaft über die Freigabe des Auftrags entschieden wird (z. B. nach dem Planstarttermin). Der *Detaillierungsgrad* bestimmt die Ebene des Auftrags, die freigegeben wird. Dabei wird etwa darüber

entschieden, ob der Auftrag im Ganzen oder jeder einzelne Arbeitsvorgang für sich freigegeben wird. Die *Auslöselogik* schließlich bestimmt, nach welcher Struktur die Aufträge in der Produktion freigegeben werden (z. B. ereignisorientiert). Die Produktionssteuerung hat somit die Aufgabe der Durchsetzung des Produktionsplans im Produktionssystem (DANGELMAIER 2009, DYCKHOFF & SPENGLER 2010). Als eine zentrale Voraussetzung dafür werden realistisch umsetzbare Produktionspläne angesehen, welche Unsicherheiten in den Planungsdaten bereits berücksichtigen (LÖDDING 2016).

Im Anschluss an die Freigabe wird der Auftragsfortschritt in der Produktion kontinuierlich überwacht. Dadurch können der Abarbeitungsgrad der Aufträge gemessen und insbesondere ein Vergleich zwischen Ist- und Soll-Daten durchgeführt sowie im Bedarfsfall Maßnahmen eingeleitet werden. Die dafür notwendigen Daten können einerseits manuell durch den Werker oder automatisiert über Terminals zur Betriebsdatenerfassung (BDE) bzw. Maschinendatenerfassung (MDE) zurückgemeldet werden (DANGELMAIER 2009, WIENDAHL 2010, LÖDDING 2016). Diese Rückmeldung erfolgt auch heutzutage noch meist zum Ende einer Schicht bzw. eines Arbeitstages (NYHUIS ET AL. 2016). Erst nach dieser Rückmeldung stehen die Daten zur Verfügung, um sie zur Anpassung des Produktionsablaufs verwenden zu können (KLETTI & SCHUMACHER 2011).

### 2.2.5 Datengrundlage für die Produktionsplanung und -steuerung

Die für die PPS verwendeten Daten können in *Stamm-* und *Bewegungsdaten* unterschieden werden. *Stammdaten* verfügen über eine lange Gültigkeit und weisen eine geringe Änderungshäufigkeit auf (REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION 1991, SCHUH ET AL. 2012A). Typische Beispiele solcher Daten sind Materialstammdaten, Arbeitspläne oder auch Vorgabezeiten für Prozessschritte. Der Zugriff auf die Daten erfolgt wiederholt an verschiedenen Stellen des Planungsprozesses, weshalb eine hohe Aktualität und fortwährende Pflege dieser Daten von zentraler Bedeutung ist. In den Stammdaten sind auch für die PPS relevante Informationen enthalten. So wird die Verfügbarkeit von Ressourcen mittels Schichtplänen und die Anwesenheitsplanung des Bedienpersonals in den Stammdaten festgehalten. Der Materialstamm bietet ebenfalls PPS-relevante Daten wie die optimale Losgröße oder die geplante Durchlaufzeit eines Produkts (LOOS 1999, KURBEL & ENDRES 2005).

*Bewegungsdaten* hingegen verändern sich fortlaufend und zeichnen sich daher durch eine begrenzte Gültigkeit sowie ihren Zeitbezug aus. Da sich Bewegungsdaten immer auf Stammdaten beziehen, werden sie auch als abgeleitete Daten bezeichnet. Ein Fertigungsauftrag bspw. kann verschiedene Status von „geplant“ über „freigegeben“ bis zu „fertiggestellt“ annehmen. Der Fertigungsauftrag bezieht sich dabei auf einen festen Materialstamm mit einer bestimmten Menge und einem konkreten Bedarfszeitpunkt. (LOOS 1999)

Die in der PPS verwendeten Daten sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Diese Unsicherheit nimmt mit fortschreitender Planungsgenauigkeit ab, sodass die Unsicherheit zum Zeitpunkt der Durchführung der Produktionsaufgaben am geringsten, jedoch noch nicht vollkommen eliminiert ist (STADTLER 1988, ZÄPFEL 2001). Je nach zugrundeliegendem Planungshorizont treten unterschiedliche Arten von Unsicherheiten auf, die sich aus externen oder internen Quellen ergeben können. Bei langfristigen Planungen treten Unsicherheiten vor allem aufgrund externer Ursachen wie Konjunkturschwankungen oder Zollbeschränkungen auf. Bei mittelfristigen Planungen können neben externen Unsicherheitsquellen, wie der Nachfragehöhe für Fertigprodukte, auch interne Ursachen für Unsicherheiten verantwortlich sein, bspw. das Auftreten schwerwiegender Störungen der Produktionsfaktoren. Kurzfristige bzw. operative Planungsentscheidungen sind ebenfalls von internen sowie externen Unsicherheitsquellen betroffen. Der Zeitraum, auf den sich die Planung bezieht, ist jedoch kürzer, sodass hierzu bspw. der Ausfall von Maschinen, der krankheitsbedingte Ausfall von Personal oder unerwartete Kundennachfragen zu zählen sind. Solche mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit behafteten, zufälligen Ereignisse sollten idealerweise schon im Planungsprozess berücksichtigt werden, um auf Grundlage der mit Unsicherheit behafteten Daten ein optimales Planungsergebnis erzielen zu können. (SCHNEEWEIß 1997, PINEDO 2012)

Die vorhandenen Unsicherheiten sind daher abhängig von ihren möglichen Auswirkungen auf die Zielerreichung in unterschiedlichen Phasen der Produktionsplanung zu berücksichtigen. Unsicherheiten sind dabei in der Planungsphase zu betrachten, in welcher Produktionsplanungshorizont und Wirkungshorizont der Unsicherheit übereinstimmen. Langfristig wirkende Unsicherheiten wie der mögliche Ausfall eines Lieferanten sind demnach in der strategischen Produktionsplanung zu berücksichtigen. Mittelfristig wirkende Unsicherheiten werden in der taktischen Produktionsplanung relevant. Kurzfristig wirkende Unsicherheiten sind in die operative Produktionsplanung einzubeziehen. (HEIN 2007)

### 2.3 Risikomanagement

#### 2.3.1 Allgemeines

Die sich kontinuierlich wandelnden Rahmenbedingungen stellen produzierende Unternehmen vor immer neue Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt, um den unternehmerischen Erfolg langfristig sichern zu können. Die Zukunftsfähigkeit der Produktion eines Unternehmens sowie die Verwirklichung der Unternehmensziele in einem stark umkämpften Markt werden entscheidend durch interne Strategien zur Optimierung der Produktion beeinflusst.

Ein Baustein der Optimierung kann dabei ein Risikomanagementsystem sein, das die vorherrschenden Risiken identifiziert, analysiert, überwacht und bei Bedarf frühzeitig Gegenmaßnahmen einleitet. Dabei müssen sowohl externe als auch interne Risiken berücksichtigt werden (ERBEN & ROMEIKE 2003, DIEDERICHS 2012). Um interne Risiken, d. h. die innerhalb eines Unternehmens entstehen, handelt es sich insbesondere auch bei während der Produktion auftretenden Risiken. Sie sind durch die PPS zu berücksichtigen und müssen durch geeignete Maßnahmen reduziert oder eliminiert werden (SCHIMMELPFENG 2001).

Zunächst ist der in diesem Zusammenhang zentrale Begriff des Risikos näher zu beleuchten. Aufgrund der häufig domänenspezifisch ausgelegten Definitionen wird dazu im Folgenden detailliert auf den Risikobegriff eingegangen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Anschließend werden mögliche Klassifizierungen von Risiken vorgestellt (vgl. Abschnitt 2.3.3) und Risiken in der Produktion charakterisiert (vgl. Abschnitt 2.3.4). Darauf aufbauend werden die Phasen des Risikomanagements detailliert erläutert (vgl. Abschnitt 2.3.5).

#### 2.3.2 Definition des Risikos

In der Wissenschaft sowie in der Praxis besteht kein einheitliches Verständnis des Risikobegriffs. Vielmehr wird dieser in den verschiedenen Wissenschaftsbereichen aufgrund unterschiedlicher Betrachtungsschwerpunkte häufig bereichsspezifisch definiert (DAHMEN 2002, ROGLER 2002, DIEDERICHS 2012, RIMPAU 2011, KREBS 2012). Ausgangspunkt aller Überlegungen zum Thema Risiko ist die Erkenntnis, dass alle unternehmerischen Handlungen und Entscheidungen in die Zukunft gerichtet und somit stetes mit Unsicherheit hinsichtlich ihrer tatsächlichen Auswirkungen behaftet sind (HÖLSCHER 2002).

Im Bereich der Entscheidungstheorie hat sich ein informations- bzw. ursachenorientierter Risikobegriff herausgeprägt. Dort werden bestimmte Entscheidungssituationen betrachtet, für die verschiedene Handlungsalternativen zur Auswahl stehen. Jede der Handlungsalternativen hat den Eintritt von mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit behafteten Ergebnissen zur Folge. Bei einer Entscheidung unter Sicherheit steht vorab bereits das Ergebnis fest, das aus der Entscheidung für eine Handlungsalternative folgt. Eine Entscheidung unter Unsicherheit ist hingegen dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei unterschiedliche Zustände als Folge der Entscheidung für die Handlungsalternative eintreten können. Hierbei können wiederum zwei unterschiedliche Ausprägungen unterschieden werden, die Entscheidung unter Unsicherheit im engeren Sinne und die Entscheidung unter Risiko. Bei einer Entscheidung unter Unsicherheit im engeren Sinne kann der Entscheider keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit der Umweltzustände als Ergebnis der Entscheidung treffen. Lediglich eine Aussage hinsichtlich der Menge aller möglichen Umweltzustände ist möglich. Als Entscheidung unter Risiko werden wiederum solche Situationen bezeichnet, in denen der Entscheider eine Aussage über die möglichen Umweltzustände als Konsequenz der Entscheidung sowie über deren jeweilige Eintrittswahrscheinlichkeit treffen kann. (OEHLER & UNSER 2001, LAUX ET AL. 2018)

Neben diesem ursachen- bzw. informationsorientierten Risikobegriff ist auch die wirkungsbezogene Begriffsdefinition weit verbreitet. Hierbei wird Risiko als die Verfehlung der angestrebten Ziele betrachtet (DIEDERICHS 2012, DIN ISO 31000). Nach dieser recht allgemeinen Definition ist sowohl eine negative als auch eine positive Zielabweichung vom Risikobegriff erfasst. Als positive Abweichung von der Zielgröße kann ein Risiko daher auch als Chance bzw. als spekulatives Risiko verstanden werden. Die Berücksichtigung positiver Abweichungen erscheint im Unternehmenskontext zielführend, da prinzipiell auch eine Kompensationswirkung der positiven auf die negative Zielabweichung denkbar ist. Diese Interdependenz ist bei der Aggregation einzelner Risiken zu einem Gesamtrisiko zu berücksichtigen. Weiter verbreitet in Bezug auf den Risikobegriff ist jedoch die Auffassung, dass damit eine Verlustgefahr bzw. ein möglicher Schaden beschrieben wird. Diese Risikoauffassung wird auch als Risiko im engeren Sinne bzw. als reines Risiko bezeichnet. (SCHNORRENBERG & GOEBELS 1997, OEHLER & UNSER 2001, GLEIBNER & WOLFRUM 2001)

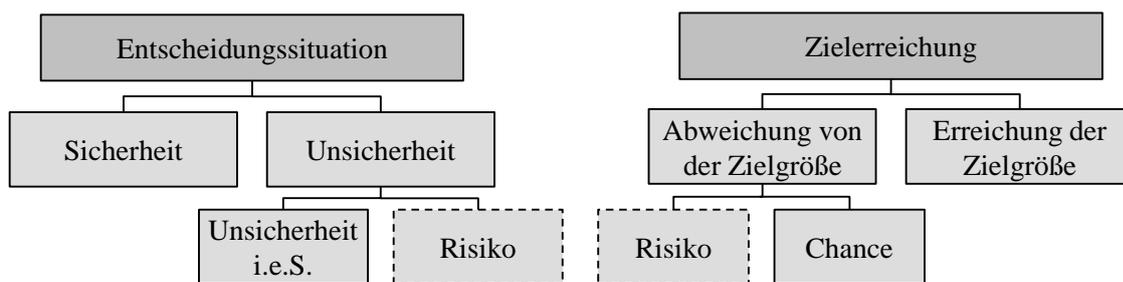
Weiterhin ist auch eine Kombination dieser beiden Reinformen der Risikodefinition gängig, wobei einerseits auf die Unsicherheit in Bezug auf die Eintrittswahrscheinlichkeit andererseits auf die Möglichkeit einer Zielverfehlung abgestellt

## 2 Grundlagen

---

wird (HÄRTERICH 1987, STEINMETZ 2007, RIMPAU 2011, BREDOW 2014). Auch der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Risikobegriff berücksichtigt zwei Dimensionen des Risikos: Zunächst wird die mögliche Abweichung von den betrachteten Zielgrößen der Planung bei der Realisierung der Planvorgaben in der Produktion berücksichtigt. Zusätzlich wird aber auch die einer Entscheidungssituation zugrundeliegende Unsicherheit berücksichtigt. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass nicht alle verfügbaren Informationen sicher sind, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zutreffen. Dem kombinierten Verständnis von Risiko folgend und den Betrachtungsfokus berücksichtigend wird in dieser Arbeit Risiko wie folgt definiert: *Unter Risiko wird die mögliche Abweichung vom Produktionsplan aufgrund der mit Unsicherheiten behafteten Planungsdaten verstanden.*

Eine zusammenfassende Interpretation des Risikobegriffs für diese Arbeit stellt Abbildung 2-3 dar.



### Legende

  : Risikointerpretation für diese Arbeit

Abbildung 2-3: Zusammenfassende Interpretation des Risikobegriffs  
(KREBS 2012)

Für ein wirksames Risikomanagement ist eine vorherige Systematisierung möglicher auftretender Risiken notwendig. Einen Überblick über eine solche Einordnung relevanter Risiken gibt der folgende Abschnitt.

### 2.3.3 Kategorisierung von Risiken

Häufig verbreitet ist die Unterscheidung in finanzwirtschaftliche und leistungswirtschaftliche Risiken auf einer stark aggregierten Ebene der Risikobetrachtung. *Finanzwirtschaftliche Risiken* wirken auf die Finanzprozesse eines Unternehmens. Darunter sind z. B. Zinsänderungs-, Aktienkurs- oder auch Währungsrisiken zu

verstehen. *Leistungswirtschaftliche Risiken* hingegen fokussieren den Leistungserstellungsprozess eines Unternehmens. Diese grobe Kategorisierung der Risiken ist für einen effektiven Risikomanagementprozess noch weiter zu detaillieren und ist stark von der Branche sowie der Struktur des Unternehmens selbst abhängig. (HÖLSCHER 2002, DIEDERICHS 2012)

Eine Aufzählung aller möglichen Kategorisierungsmerkmale ist nicht zielführend, weshalb hier zweckmäßig nur auf einige Merkmale eingegangen wird. Für einen umfangreicheren Überblick zur Kategorisierung von Risiken sei auf HÄRTERICH (1987), HEIN (2007), KÖNIG (2007), STEINMETZ (2007) oder DIEDERICHS (2012) verwiesen. Einen Überblick über die im Folgenden dargestellten Möglichkeiten der Risikokategorisierung gibt Abbildung 2-4, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht (ROGLER 2002, ROMEIKE 2003C, HEIN 2007).

Merkmal	Ausprägung		
Entstehungsort	extern		intern
Handlungsphase	Planung		Realisation
zeitlicher Bezug	strategisch		operativ
Funktionssicht	leistungswirtschaftlich		finanzwirtschaftlich
Verdichtungsgrad	aggregiert	kumulativ	singulär
Versicherbarkeit	versicherbar		nicht versicherbar
Akzeptanzniveau	vernachlässigbar	vertretbar	nicht hinnehmbar
Beeinflussbarkeit	vorhanden		nicht vorhanden

*Abbildung 2-4: Mögliche Risikokategorisierungsmerkmale (in Anlehnung an HEIN 2007, STEINMETZ 2007, DIEDERICHS 2012)*

Zunächst bietet sich eine Kategorisierung hinsichtlich der Ursache des Risikos an. Dabei kann z. B. unterschieden werden, wo der Entstehungsort des Risikos liegt oder in welcher Handlungsphase des Unternehmens das Risiko entstanden ist. Als Handlungsphase können bspw. die Planung oder die Produktion angesehen werden. Neben der Ursache kann ebenso die Wirkung des Risikos zur Kategorisierung herangezogen werden. Danach kann eine Einteilung etwa hinsichtlich des zeitlichen Horizonts oder der Höhe des Schadens erfolgen. In Anlehnung an den Risikomanagementprozess können Risiken ebenfalls hinsichtlich der Merkmalgruppe

## 2 Grundlagen

---

Steuerung unterschieden werden. Darunter können solche Merkmale zusammengefasst werden, die relevant für die Risikosteuerung sind. Die Versicherbarkeit oder das Akzeptanzniveau des jeweiligen Risikos sind Beispiele für Merkmale dieser Kategorie.

Im folgenden Abschnitt werden Produktionsrisiken spezifiziert, da solche Risiken in dieser Arbeit fokussiert betrachtet werden.

### 2.3.4 Risiken in der Produktion

Produktionsrisiken, also Risiken die in der Produktion auftreten, können anhand unterschiedlichster Merkmale charakterisiert werden. KÖNIG (2007) versteht unter Produktionsrisiken „(...) *alle Risiken (..), die innerhalb des betrachteten Produktionssystems entstehen bzw. direkt von Elementen ausgelöst werden, die sich innerhalb der Bilanzhülle des Produktionssystems befinden und in unmittelbarer Interaktion mit dem System stehen, also für dessen Funktionsweise von elementarer Bedeutung sind*“. Dieses Verständnis stellt den Entstehungsort der Risikoursache in den Fokus. Demnach handelt es sich um ein Produktionsrisiko, wenn der Entstehungsort des Risikos in der Produktion des Unternehmens liegt.

HÄRTERICH (1987) schlägt eine Einteilung der Produktionsrisiken anhand der Gefährdung der Produktionsziele vor. Diese Produktionsziele lassen sich unterscheiden in Input-, Kombinations- und Outputziele, angelehnt an die Strukturierung des Produktionsprozesses nach Input, Transformation/Produktion und Output (STEINMETZ 2007, HEINEN ET AL. 2008, DANGELMAIER 2009). Dieser Einteilung folgend können in der Produktion Input-, Kombinations- sowie Outputrisiken unterschieden werden (s. Abbildung 2-5).

*Inputrisiken* können in Arbeits-, Betriebsmittel-, Werkstoff- und Informationsrisiken unterteilt werden. Sie äußern sich darin, dass der jeweilige Input beschädigt ist oder nicht zur Verfügung steht. Beispiele hierfür sind ausgefallene Maschinen oder Transportmittel, nicht geliefertes Material, ein fehlendes Steuerungsprogramm für eine Maschine oder die krankheitsbedingte Abwesenheit von Mitarbeitern. (HÄRTERICH 1987, DIN ISO 31000)

Die Störanfälligkeit des Produktionsprozesses wird durch *Kombinationsrisiken* bedingt. Diese haben ihren Ursprung in der Produktionsprogramm- und Produktionsbedarfsplanung sowie in der Eigenfertigungsplanung und -steuerung. Sie lassen sich in Produktionsprogramm-, Produktionsverfahrens-, Losgrößen-, Betriebszeit-

und Standortrisiken unterscheiden und äußern sich als Störungen im Produktionsablauf. Ursachen für diese Risiken können z. B. die Komplexität der Produktionsprozesse oder Qualitätsmängel an Zwischenprodukten sein. Produktionsverfahrensrisiken ergeben sich meist aufgrund zwei unterschiedlicher Ursachen. Einerseits kann es durch den Einsatz eines bestimmten Herstellungsverfahrens zu Risiken kommen. Andererseits können durch den Aufbau des Produktionsablaufs, also bedingt durch die PPS, Risiken entstehen. (HÄRTERICH 1987, DIN ISO 31000)

*Outputrisiken* fokussieren die herzustellenden Produkte und lassen sich in Qualitäts- und Quantitätsrisiken unterscheiden. Sie beschreiben das Risiko, dass Produkte aufgrund von Beschädigung oder Mängeln nicht in der gewünschten Qualität oder Quantität hergestellt werden können. (HÄRTERICH 1987, DIN ISO 31000)

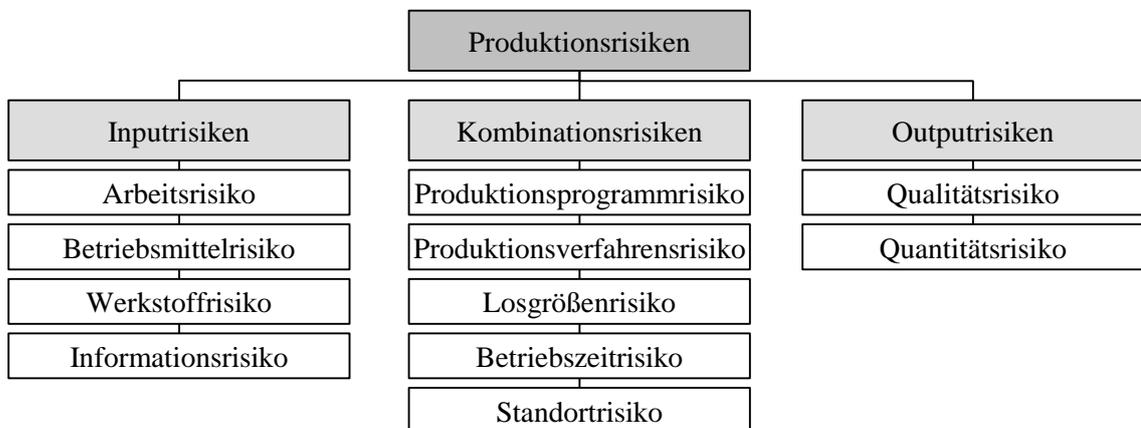


Abbildung 2-5: Risiken in der Produktion (HÄRTERICH 1987)

Neben der Kategorisierung in Input-, Kombinations- und Outputrisiken können Produktionsrisiken auch hinsichtlich ihrer zeitlichen Dimension unterschieden werden. Strategische Risiken beeinträchtigen die langfristigen Ziele des Unternehmens und können somit eine Gefahr für den Fortbestand des Unternehmens darstellen. Aufgrund ihres langfristigen Wirkhorizonts weisen die vorhandenen Informationen regelmäßig nur einen geringen Detaillierungsgrad auf. Operative Risiken haben Auswirkungen auf die Entscheidungen und Ziele einzelner Teilbereiche im Unternehmen mit einem kurzen Zeitbezug. Ihr Schadensausmaß ist allgemein geringer als das von strategischen Risiken. Die Informationsdichte ist bei operativen Risiken vergleichsweise hoch. (HÖLSCHER 2002, HEIN 2007)

### 2.3.5 Risikomanagement in Unternehmen

#### 2.3.5.1 Allgemeines

Genauso wie der Risikobegriff wird auch das Risikomanagement auf verschiedenste Weise definiert (DAHMEN 2002). Seinen Ursprung hat das Risikomanagement in der amerikanischen Versicherungswirtschaft. Das heutige Risikomanagement wird als zentrales Element der Unternehmensleitung verstanden und trägt somit als entscheidender Faktor zur Sicherung des Markterfolgs des Unternehmens bei (DIEDERICHS 2012, KÖNIGS 2017). Die allgemeine Aufgabe der „(..) (koordinierten) Aktivitäten zur Lenkung und Steuerung einer Organisation in Bezug auf Risiken“ nach DIN ISO 31000 konkretisiert DIEDERICHS (2012) und leitet die folgenden vier Teilziele ab:

- Sicherung des Unternehmensbestands (Existenzsicherung)
- Sicherung des zukünftigen Erfolgs
- Marktwertsteigerung des Unternehmens
- Vermeidung oder Senkung der Risikokosten

Das Risikomanagement kann zeitlich in einen strategischen sowie einen operativen Teil unterteilt werden. Der strategische Risikomanagementprozess beinhaltet die Formulierung von Risikomanagementzielen sowie die Organisation des Risikomanagements. Die Risikomanagementziele sind eng mit den Unternehmenszielen verknüpft. Eine Beurteilung der Risiken ist nur durch Kenntnis der Ziel- und Wertvorstellungen im Unternehmen und deren Bedrohung durch das Risiko möglich. Innerhalb des durch das strategische Risikomanagement festgelegten ablauf- und aufbauorganisatorischen Rahmens hat das operative Risikomanagement die Aufgaben der kontinuierlichen Risikoerfassung und -beurteilung im Unternehmen. (ROMEIKE 2003B)

Zusammenfassend hat das Risikomanagement somit die Aufgabe ein Risikobewusstsein in der betreffenden Organisation zu schaffen. Dies ist nur möglich, indem das Risikomanagement durch seine Ausgestaltung in das jeweilige Unternehmen integriert und somit eine Transparenz hinsichtlich existierender Risiken erreicht wird. Im Anschluss daran ist eine systematische und kontinuierliche Bewältigung der identifizierten Risiken anzustreben (DIEDERICHS 2012).

Aufgrund ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit, werden die einzelnen Phasen des operativen Risikomanagements im nachfolgenden Abschnitt 2.3.5.2 näher erläutert, bevor in Abschnitt 2.3.5.3 relevante Werkzeuge des Risikomanagements vorgestellt werden.

### 2.3.5.2 Phasen des Risikomanagements

Der Risikomanagementprozess kann in die vier Phasen Risikoidentifikation, Risikoanalyse/-bewertung, Risikosteuerung und Risikoüberwachung eingeteilt werden (DIN ISO 31000, DIEDERICHS 2012). Die *Risikoidentifikation* steht zu Beginn des Risikomanagementprozesses. Ziel ist die möglichst strukturierte und detaillierte Erfassung der in einem Unternehmen möglicherweise auftretenden Risiken. Da eine allumfassende Analyse der Unternehmensrisiken mit vertretbarem Aufwand kaum möglich ist, muss eine Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen in der Phase der Risikoidentifikation getroffen werden (DIEDERICHS 2012, BREDOW 2014). Die frühzeitige Erkennung der Risiken bildet die Basis für eine erfolgreiche Risikosteuerung in Unternehmen (WIBLER 2006).

Im Anschluss an die Risikoidentifikation folgt die *Risikoanalyse/-bewertung*. In dieser Phase gilt es die Eintrittswahrscheinlichkeit und das mit dem Risiko verbundene Schadensausmaß möglichst genau zu spezifizieren (SCHIMMELPFENG 2001, WIBLER 2006). Eine große Herausforderung hierbei ist die Berücksichtigung der Interdependenzen von Risiken, die dazu führen können, dass Risiken, die isoliert betrachtet das Unternehmen nur geringfügig beeinflussen, in ihrer Gesamtheit relevante Schäden verursachen können (WIBLER 2006, DIEDERICHS 2012). Diese Phase des Risikomanagements ist in geeigneten Abständen zu wiederholen, da eine aktuelle Risikoanalyse als Grundvoraussetzung für die sich anschließende Phase der Risikosteuerung anzusehen ist (DIEDERICHS 2012).

Während der *Risikosteuerung* soll die Risikolage eines Unternehmens beeinflusst werden, entweder durch aktive Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikos oder der Verminderung des Schadensausmaßes. Hierbei kann, abhängig von der Positionierung des Unternehmens in Bezug auf das Risiko, unterschieden werden, ob mögliche Risiken präventiv behandelt oder im Falle eines Risikoeintritts reaktiv gehandhabt werden (ROMEIKE 2003A, DIEDERICHS 2012). Die Risikovermeidung fokussiert die Ursache eines Risikos und wird dadurch charakterisiert, dass das betroffene Geschäft oder der Prozess nicht durchgeführt, sondern auf Alternativen ausgewichen wird. Die Risikominderung hingegen zielt auf die aktive Beeinflussung der Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. des Schadensausmaßes

## 2 Grundlagen

---

bei Prozessen durch organisatorische oder technische Maßnahmen. Die Risikoüberwälzung transferiert das Risiko an externe Unternehmen wie etwa eine Versicherungsgesellschaft oder einen Vertragspartner. Das Selbsttragen des Risikos bietet sich an, wenn das Risiko nur ein geringes Schadenpotential besitzt und die Versicherungsprämie vergleichbar hoch ausfallen würde (SCHIMMELPFENG 2001, DAHMEN 2002, DIEDERICHS 2012).

Die *Risikoüberwachung* schließt sich als letzte Phase des Risikomanagements an die Risikosteuerung an und überwacht die Effektivität und Effizienz der ergriffenen Maßnahmen. Insbesondere wird in dieser Phase auch eine Neubewertung der Risikolage getroffen, sofern sich die Informationslage verändert hat. Abhängig vom Ergebnis dieser Neubewertung können eine erneute Risikoidentifikation und ein Durchlaufen der sich daran anschließenden Prozessphasen notwendig werden. (DIEDERICHS 2012)

Die soeben beschriebenen Phasen des Risikomanagements stellt Abbildung 2-6 zusammenfassend dar.

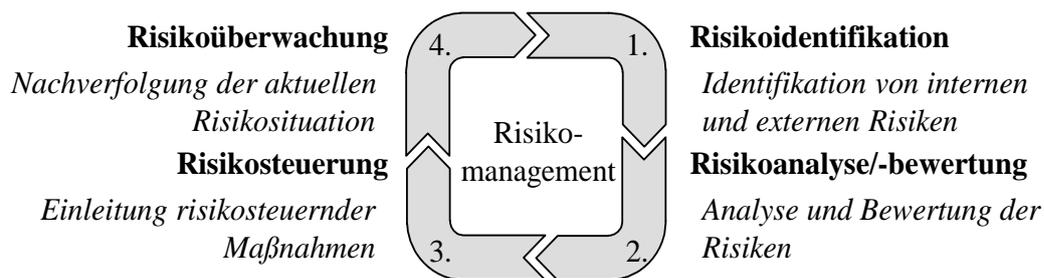


Abbildung 2-6: Phasen des Risikomanagements (in Anlehnung an DIN ISO 31000, DIEDERICHS 2012)

### 2.3.5.3 Werkzeuge des Risikomanagements

Die Zielerreichung in den bereits vorgestellten Phasen des Risikomanagements kann mit Hilfe verschiedener Werkzeuge unterstützt werden. Beispielhaft werden in diesem Abschnitt ausgewählte Werkzeuge vorgestellt, die sich für die Verwendung während der vier Phasen des Risikomanagements (s. Abschnitt 2.3.5.2), insbesondere zur Risikoidentifikation und -analyse, im Hinblick auf die Zielstellung dieser Arbeit besonders gut eignen. Für eine ausführliche Auflistung aller Werkzeuge und deren Beschreibung sei bspw. auf ROMEIKE (2003C), DIEDERICHS (2012) oder ROMEIKE & HUTH (2016) verwiesen.

Die Werkzeuge des Risikomanagements können prinzipiell in Kollektions- und Suchwerkzeuge unterschieden werden. Bei *Kollektionswerkzeugen* werden Informationen durch Befragungen von Mitarbeitern, Fachpersonen und weiteren Wissensträgern gesammelt. Der Fokus liegt hier auf bereits vorhandenen und offensichtlichen Risiken und deren Erscheinungsformen. *Suchwerkzeuge* können weiter in analytische Suchwerkzeuge und Kreativitätswerkzeuge unterschieden werden. *Analytische Suchwerkzeuge* werden eingesetzt, um z. B. initiale Ereignisse, Folge- oder Endereignisse, Ursachen sowie Konsequenzen zu erkennen. *Kreativitätswerkzeuge* nutzen die Kreativität der beteiligten Personen (s. Abbildung 2-7). Neue Denkmuster führen zu vielfältigeren und gleichzeitig konkreteren Ergebnissen in der Risikoidentifikation. Dafür werden die Problemstellungen und später deren Lösungen nach einem festgelegten Vorgehen interaktiv zwischen den beteiligten Personen erarbeitet und immer weiter verbessert. (KÖNIGS 2017).

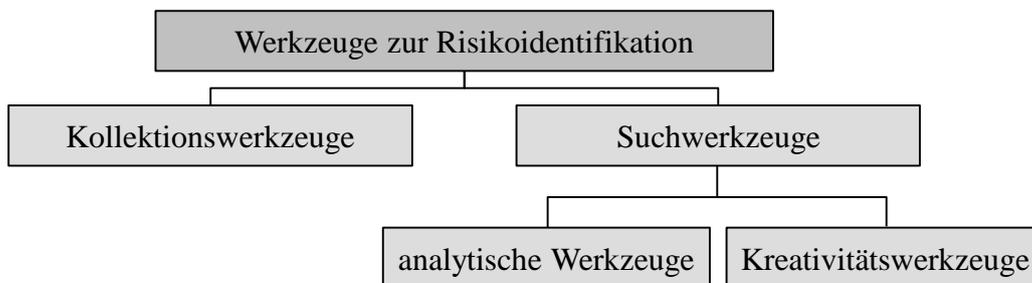


Abbildung 2-7: Einteilung von Werkzeugen des Risikomanagements  
(in Anlehnung an ROMEIKE 2003C)

Im Folgenden werden verschiedene Methoden und Ansätze zur Risikoidentifikation vorgestellt.

### SWOT-Analyse

Die *SWOT-Analyse*, deren Namen sich aus ihren vier Feldern *Strengths* (Stärken), *Weaknesses* (Schwächen), *Opportunities* (Chancen) und *Threats* (Bedrohungen) zusammensetzt, liefert Erkenntnisse über den Ist-Zustand der eigenen Organisation, deren Zielgruppen und Wettbewerbsumfeld sowie über deren Position im Markt. Die Durchführung einer SWOT-Analyse unterstützt die Strategieentwicklung und die Untersuchung von Zusammenhängen aus einer übergeordneten Perspektive. Da die SWOT-Analyse maßgeblich auf einer Sammlung von unternehmensspezifischen Informationen basiert, ist diese den Kollektionswerkzeugen zuzuordnen. (ROMEIKE 2003C, KNOLL & BÖHM 2014)

### Failure Mode and Effects Analysis

Die *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*, auch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, ist eine qualitativ analytische Methode zum frühzeitigen Erkennen und Verhindern von potentiellen Schwachstellen sowie zum Aufzeigen möglicher Gegenmaßnahmen. Sie lässt sich somit den analytischen Suchwerkzeugen zuordnen. Im Laufe der Zeit wurden Erweiterungen entwickelt: Die System-FMEA und die Prozess-FMEA sind systematische und semi-quantitative Risikoanalysemethoden. Bei der *System-FMEA* liegt der Fokus auf der vollen Funktionsfähigkeit der Systemkomponenten, sodass schon in der Produktplanungsphase zahlreiche Risiken abgeschätzt werden können. Dagegen konzentriert sich die *Prozess-FMEA* auf den Aufbau von fehlerfreien Prozessen zur Herstellung von Bauteilen und Systemen. (ROMEIKE 2003C, ROMEIKE & HAGER 2009)

Im Rahmen des Risikomanagements wird eine Abwandlung der FMEA, die sog. Risk Mode and Effects Analysis (RMEA) angewendet. Aus verschiedenen Elementen kann dabei eine Risikoprioritätszahl (RPZ) ermittelt werden, die eine Beurteilung des Risikos hinsichtlich der Relevanz für die Risikosteuerung ermöglicht. Die RMEA sieht zudem eine kontinuierliche Verfolgung der definierten Maßnahmen vor, welche die Ermittlung der neuen RPZ und Restrisikobetrachtungen nach der Maßnahmenumsetzung einschließt. (SCHUH ET AL. 2006)

### Szenarioanalyse

Mit der *Szenarioanalyse*, die ebenfalls ein analytisches Suchwerkzeug darstellt, werden zukünftige Entwicklungen unter verschiedenen Rahmenbedingungen mit dem Ziel untersucht, kausale Zusammenhänge und Entscheidungspunkte zu erkennen. Somit werden auf Grundlage vergangenheitsbasierter Daten mögliche Zukunftsbilder entwickelt, wobei nicht nur auf quantitative, sondern auch auf qualitative Informationen zurückgegriffen wird. Mittlerweile ist die Prognosefunktion in den Hintergrund getreten. Die Szenarien werden nunmehr vorwiegend als Entscheidungshilfe genutzt. Die Szenariotechnik untersucht dabei Extremszenarien (Best Case- oder Worst Case-Szenarien) oder besonders relevante Szenarien (Trendszenarien). (ROMEIKE 2003C, KNOLL & BÖHM 2014)

### Simulation

Als weitere Methode steht die *Simulation* zur Verfügung. Das zugrundeliegende Modell ist ein abstrahiertes Abbild der Realität und ist über Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie über deren Beziehungen untereinander bestimmt. Durch Simulationsexperimente können mit den hinterlegten Parameterwerten die Einflüsse

von bestimmten Eingangs- auf die Ausgangswerte analysiert werden. Auch die Simulation unterfällt somit der Kategorie der analytischen Suchwerkzeuge. (FRANKE & HAX 2004, BREDOW 2014)

### **Brainstorming**

Das Kreativitätswerkzeug *Brainstorming* wird in der Praxis häufig verwendet, um nach dem Prinzip der freien Assoziation neue, ungewöhnliche Ideen zu generieren. Nach Beendigung der Sammelphase werden die aufgenommenen Risiken strukturiert und diskutiert. Idealerweise sind zwischen fünf und sieben Personen Teil der Brainstorming-Gruppe, da bei einer größeren Personenzahl mit Kommunikationsproblemen zu rechnen ist. Für das Risikomanagement kann die Methode dazu beitragen, bestimmte Risikokategorien aus anderen Blickwinkeln zu betrachten und somit neue Risiken zu erkennen. (DAHMEN 2002, ROMEIKE 2003C)

### **Delphi-Methode**

Die ebenfalls kreativitätsbasierte *Delphi-Methode* ist eine systematische, mehrstufige und meist anonyme Befragung von Experten, die auf einem Fragebogen über Risiken und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten, zeitliche Verläufe und Auswirkungen aufbaut. Ziel ist es, Ursache-Wirkungs-Ketten zu verstehen und relevante, aktuelle und zukünftige Risiken zu identifizieren. Meist sind dafür zwei bis vier Iterationen mit den Schritten Befragung, Datenanalyse, Feedback, Diskussion und Entscheidung vorgesehen.

In der ersten Runde geben die Befragten ihre Lösungsvorschläge unvoreingenommen und spontan ab. Nach deren Auswertung wird den Teilnehmern ein Zwischenbericht vorgelegt, auf dessen Grundlage sie ihre ursprüngliche Vorhersage kontrollieren und anpassen können, neue Ideen generieren oder Erweiterungen ableiten sollen. Es folgt eine erneute Auswertung und Weiterreichung der Ergebnisse an die Teilnehmer. Dieses Vorgehen wiederholt sich so oft, bis die Veränderungen in den Einschätzungen im Vergleich zur vorherigen Runde nur noch sehr gering ausfallen. (ROMEIKE 2003C, KNOLL & BÖHM 2014)

Eine Einordnung der soeben beschriebenen Werkzeuge zur Risikoidentifikation in die eingeführten Werkzeugkategorien kann der folgenden Abbildung 2-8 entnommen werden.

## 2 Grundlagen

---

Werkzeuge zur Risikoidentifikation	Beispiele
Kollektionswerkzeuge	SWOT-Analyse
analytische Werkzeuge	FMEA, Szenarioanalyse, Simulation
Kreativitätswerkzeuge	Brainstorming, Delphi-Methode

Abbildung 2-8: *Einteilung von Werkzeugen zur Risikoidentifikation*  
(in Anlehnung an ROMEIKE 2003C, BREDOW 2014)

In diesem Abschnitt wurden Grundlagen im Bereich des Risikomanagements mit Fokus auf die Definition und Kategorisierung von Risiken vorgestellt sowie die möglichen Phasen des Risikomanagements und zugehörige Methoden erläutert. Diese Grundlagen finden bei der Konzeptionierung der einzelnen Schritte zur Entwicklung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz Anwendung. Da im Rahmen dieser Arbeit insbesondere auch die Risikopräferenz von Entscheidungsträgern berücksichtigt werden soll, wird im folgenden Abschnitt auf entscheidungstheoretische Aspekte mit Fokus auf Entscheidungen unter Risiko eingegangen.

## 2.4 Entscheidungen unter Risiko

### 2.4.1 Allgemeines

Im täglichen Leben und somit auch im Berufsalltag sind Individuen kontinuierlich mit Situationen konfrontiert, in welchen Entscheidungen getroffen werden müssen. Die Entscheidungstheorie befasst sich systematisch mit dem Verhalten von Individuen und Gruppen in einer solchen Entscheidungssituation. Entscheidungen können dabei als eine bewusst getroffene Wahl zwischen mindestens zwei Alternativen charakterisiert werden. Entscheidungen im Sinne der Entscheidungstheorie sind somit weiter gefasst als im allgemeinen Sprachgebrauch. Danach liegen Entscheidungen vor, wenn ein bestimmtes Wahlproblem mit besonderer Bedeutung vorliegt. Im Sinne der Entscheidungstheorie kann also neben der Entscheidung etwa über den Kauf einer wichtigen Produktionsmaschine (= Wahlproblem mit besonderer Bedeutung) auch der bloße Entschluss eines Unternehmens, bei einem bestimmten Lieferanten einzukaufen oder nicht einzukaufen (= Wahl zwischen zwei Alternativen), als Entscheidungssituation charakterisiert werden. (BARTHOLOMAE & WIENS 2016, PFISTER ET AL. 2017)

Entscheidungstheoretische Untersuchungen können hinsichtlich ihres Ziels in deskriptive und präskriptive (normative) Betrachtungen unterteilt werden. Die *deskriptive* Entscheidungstheorie beschreibt das tatsächliche Entscheidungsverhalten einer Person. Es werden Aussagen über das zukünftige Entscheidungsverhalten von Personen getroffen, indem aus Beobachtungen des vergangenen Entscheidungsverhaltens Regeln für zukünftige Entscheidungen abgeleitet werden (MEYER 2000, LAUX ET AL. 2018). Die *präskriptive* (normative) Entscheidungstheorie hingegen hat das Ziel, Regeln für rationale Entscheidungen abzuleiten. Dies geschieht durch Abstraktion der konkreten Entscheidungssituation hin zu Grundproblemen der Auswahl sich ausschließender Handlungsoptionen. Im Fokus der Entscheidungen stehen dabei Situationen, die durch mehrere zueinander in Konflikt stehende Zielgrößen und eine ungewisse Zukunft charakterisiert sind (MEYER 2000, LAUX ET AL. 2018).

Um das Entscheidungsverhalten von Personen besser beschreiben zu können, folgt im nächsten Abschnitt die Vorstellung eines Entscheidungsmodells.

### 2.4.2 Das Entscheidungsmodell

Ein *Entscheidungsmodell*, so unterschiedlich die Entscheidungssituationen sein mögen, ist immer gekennzeichnet durch Handlungsalternativen, Ergebnisse, Umweltzustände und eine Entscheidungsregel. Für ein Entscheidungsproblem müssen immer mindestens zwei sich ausschließende Alternativen, die *Handlungsalternativen*, vorliegen. Daneben müssen auch die *Ergebnisse* der jeweiligen Handlungsalternative bekannt sein, um die Alternative beurteilen zu können. Die in einer konkreten Entscheidungssituation betrachteten Ergebnisse sind dabei die Ausprägung einer oder mehrerer durch den Entscheider festgelegten Zielgrößen (z B. Marktanteil, Gewinn). Die Zielgrößen drücken aus, welche Konsequenzen im Rahmen einer Entscheidungssituation für den Entscheider relevant sind. Die Wertekombination der Zielgrößen muss sich bei den einzelnen Handlungsalternativen hinsichtlich ihres Nutzens für den Entscheider unterscheiden. Sind die Ergebnisse der Handlungsalternativen als Wertekombination der Zielgrößen gleich bzw. sehr ähnlich, liegt keine Entscheidungssituation, sondern nur ein Wahlproblem vor: Es kann in einer solchen Situation eine beliebige Alternative gewählt werden, da der Entscheider die durch die einzelnen Handlungsalternativen ausgelösten Konsequenzen als gleichwertig empfindet. (LAUX ET AL. 2018)

Das Ergebnis einer Alternative hängt immer auch von *Umwelteinflüssen* ab, die ein Entscheider ganz oder teilweise nicht beeinflussen kann oder möchte, da bspw.

## 2 Grundlagen

---

die Kosten der Beeinflussung zu hoch erscheinen. Die Gesamtheit von Handlungsalternativen, Ergebnissen und Umweltzuständen wird als Entscheidungsfeld bezeichnet. Unter Berücksichtigung der Entscheidungsregel entsteht ein Entscheidungsmodell (s. Abbildung 2-9).

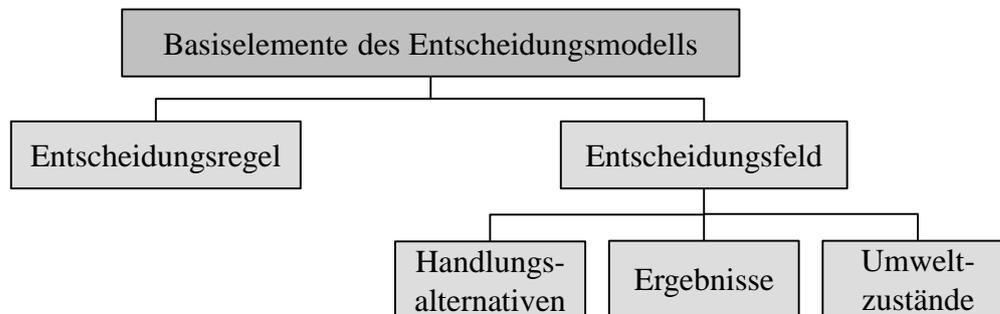


Abbildung 2-9: *Basiselemente des Entscheidungsmodells (in Anlehnung an LAUX ET AL. 2018 )*

Eine *Entscheidungsregel* legt fest, welche Alternative aus einer Menge von Alternativen ausgewählt wird, um die größtmögliche Zielerreichung aus Sicht des Entscheiders zu realisieren. Dabei werden den einzelnen Alternativen Präferenzwerte zugeordnet. Diese Präferenzwerte setzen die Bekanntheit des Zielsystems des Entscheiders voraus, um den einzelnen Alternativen Werte hinsichtlich der Zielerreichung zuordnen zu können. Einen detaillierten Überblick zur Beurteilung von Alternativen bietet der folgende Abschnitt 2.4.3.

### 2.4.3 Risikopräferenz und -verhalten von Entscheidungsträgern

Die Risikopräferenz repräsentiert die Einstellung einer Person gegenüber einem Risiko. In der DIN ISO 31000 wird die Risikopräferenz bzw. -einstellung auf ein ganzes Unternehmen bezogen und definiert als „*Haltung einer Organisation hinsichtlich der Beurteilung und letztendlichen Übernahme oder Vermeidung von Risiken*“. Die Risikopräferenz ist von zentraler Bedeutung, da sie die Priorisierung der einzelnen Handlungsalternativen in einer Entscheidungssituation maßgeblich beeinflusst (EWALD ET AL. 2012, LAUX ET AL. 2018).

Es kann grundsätzlich zwischen drei unterschiedlichen Einstellungen gegenüber einem Risiko unterschieden werden: Risikoaversion, Risikoneutralität und Risikoaffinität. Der Unterschied dieser drei Einstellungen kann anhand der Basis-Referenz-Lotterie aufgezeigt werden. Dabei wird eine Testperson gefragt, welcher si-

chere Betrag ihr genauso viel wert ist wie die Lotterie. Dabei kann sie bei der Lotterieteilnahme entweder 1000 € oder 0 € gewinnen. Der errechnete Erwartungswert  $\mu$  der Lotterie bei einer Wahrscheinlichkeit beider Szenarien von  $w = 0,5$  beträgt 500 €. (MEYER 2000, WAGNER 2003)

Zur Bestimmung des Erwartungswerts kann Formel (2-1) zugrunde gelegt werden:

$$\mu(x) = \sum_{s=1}^{N_{Sz}} w(Sz_s) * x_s \quad (2-1)$$

mit  $N_{Sz}$  = Anzahl der Szenarien,  
 $w(Sz_s)$  = Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios  $s$ ,  
 $Sz_s$  = Szenario  $s$  und  
 $x_s$  = Wert der Zufallsvariable  $x$  in Szenario  $s$ .

Der von der Testperson genannte Betrag ist also der Betrag, bei dem sie indifferent ist, ob sie die Lotterie spielt oder den sicheren Betrag erhält. Dieser Betrag wird als Sicherheitsäquivalent bezeichnet. Die Differenz zwischen Sicherheitsäquivalent und Erwartungswert wird als Risikoprämie bezeichnet. Risikoaverse Personen besitzen eine positive Risikoprämie: Der Erwartungswert der Lotterie ist somit höher als das Sicherheitsäquivalent. Sie verzichten auf die Chance eines höheren Gewinns und setzen gleichzeitig das Sicherheitsäquivalent möglichst niedrig an. Risikoaffine Personen besitzen eine negative Risikoprämie: Der Erwartungswert der Lotterie ist niedriger als das Sicherheitsäquivalent. Die Risikoprämie risikoneutraler Personen beträgt null: Das Sicherheitsäquivalent ist in diesem Fall also gleich dem Erwartungswert der Lotterie. (MEYER 2000, WAGNER 2003)

In der oben beschriebenen Lotterie würde eine risikoaffine Person ein Sicherheitsäquivalent  $> 500$  € wählen, bspw. 600 €. Diese Person würde sich also nur für den sicher ausgezahlten Betrag und damit gegen die unsicherheitsbehaftete Lotterie entscheiden, wenn ihr mindestens die 600 € geboten würden. Die Risikoprämie betrüge in diesem Fall -100 €. (MEYER 2000, WAGNER 2003)

Die Risikopräferenz eines Entscheidungsträgers ist über einen längeren Zeitraum betrachtet nicht konstant, sondern kann aufgrund äußerer Einflüsse variieren (EISENFÜHR & WEBER 2003, SCHILDBERG-HÖRISCH 2018). Zu solchen Einflüssen zählt neben dem Alter bspw. auch die persönliche wirtschaftliche Situation einer Person (MENKHOFF & SAKHA 2017). Die *Risikopräferenz* ist aber nur ein Bestandteil, der das Risikoverhalten eines Entscheiders beeinflusst (s. Abbildung 2-10).

## 2 Grundlagen

---

Das *Risikoverhalten* ist die zu beobachtende Reaktion des Entscheiders, wenn er im Rahmen einer zu treffenden Entscheidung mit einem Risiko konfrontiert wird. Auch die *Wahrnehmung* beeinflusst das Risikoverhalten. Hierbei wird unterschieden in *wahrgenommenes Risiko* und *wahrgenommenes Ergebnis*. Die Risikowahrnehmung übersetzt die objektiv vorhandenen Risiken in subjektiv wahrgenommene Risiken. Ebenso verhält es sich mit der Ergebniswahrnehmung, welche objektiv erzielbare Ergebnisse in subjektive wahrgenommene Ergebnisse umwandelt und somit Einfluss auf die Entscheidung einer Person hat. (STEUL 2003)

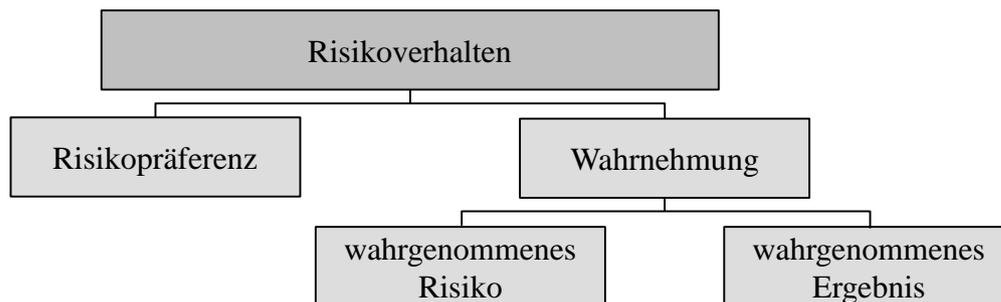


Abbildung 2-10: *Determinanten des Risikoverhaltens*  
(in Anlehnung an STEUL 2003)

Das dargestellte Risikoverhalten mit seinen Bestandteilen wird in der Entscheidungstheorie durch verschiedene Kenngrößen ausgedrückt, um eine Vergleichbarkeit unter verschiedenen Personen herstellen und die Risikopräferenz mathematisch ausdrücken zu können. Elementare Kenngrößen und Testverfahren (TV) werden im nächsten Abschnitt dargestellt.

### 2.4.4 Testverfahren zur Quantifizierung der Risikopräferenz

Für die Messung der Risikopräferenz gibt es in der Wissenschaft bereits zahlreiche Ansätze und Normen. Je nach Fachdisziplin und gewünschter Messung von Merkmalen sind diese Verfahren sehr unterschiedlicher Natur. Da in dieser Arbeit nicht das Risiko von Auswahlalternativen, sondern das Risikoverhalten von Entscheidern betrachtet wird, begrenzt sich der in diesem Kapitel vorgestellte Überblick auf Verfahren, welche zur Bestimmung der individuellen Risikopräferenz von Personen oder Gruppen anwendbar sind. (KRAHNEN ET AL. 1997, WAGNER 2003)

Verfahren zur Bestimmung der Risikopräferenz können in psychologische und ökonomische Verfahren unterteilt werden (s. Abbildung 2-11). *Psychologische Verfahren* ermitteln die Merkmalsausprägung Risikopräferenz anhand von Tests.

Ökonomische Verfahren nutzen den Vergleich von Lotterien zur Bestimmung der Risikopräferenz, meist in Bezug auf finanzielle Risiken. Ziel ist die Bestimmung des Sicherheitsäquivalents mithilfe hypothetischer Lotterievergleiche. (KRAHNEN ET AL. 1997, WAGNER 2003)

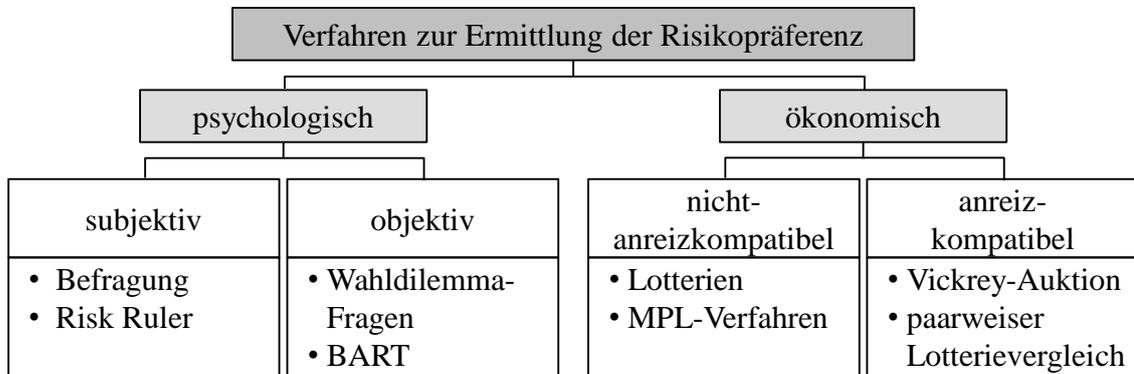


Abbildung 2-11: Einteilung von Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz

Psychologische Verfahren zur Bestimmung der Risikopräferenz können, je nach Art der Datenerhebung, genauer unterschieden werden: Bei subjektiven psychologischen Ansätzen geben die Testteilnehmer die notwendigen Antworten hinsichtlich ihrer Risikopräferenz per Selbsteinschätzung. Dazu zählen bspw. Befragungen oder Risk Ruler. Bei einer objektiven psychologischen Datenerhebung handelt es sich um eine indirekte Selbsteinschätzung: Durch Beobachtung des Verhaltens der Testperson wird deren Risikopräferenz ermittelt, ohne dass eine Selbstbeurteilung durch die Testperson notwendig ist. Zu solchen Verfahren sind bspw. Wahldilemma-Fragen oder der Balloon Analogue Risk Task (BART) zu zählen. (ZUBER & GUTHIER 2003)

Als Unterscheidungsmerkmal bei ökonomischen Ansätzen dient das Vorliegen von Anreizkompatibilität: Hierunter werden all jene Mechanismen verstanden, bei denen es für die Probanden keine Anreize gibt, eine unwahre Präferenz, etwa durch strategisch abgegebene Antworten, zu offenbaren. Den Regeln des Mechanismus zu folgen ist daher die beste Strategiewahl für jeden Teilnehmer ungeachtet des Verhaltens oder der gewählten Strategie von Mitspielern. Nicht-anreizkompatible Verfahren sind bspw. Lotterien oder Multiple-Price-Lists (MPL)-Verfahren. Anreizkompatible Verfahren hingegen sind die Vickrey-Auktion oder paarweise Lotterievergleiche. (KRAHNEN ET AL. 1997)

Die für diese Arbeit relevanten Verfahren der Risikopräferenzmessung werden in Kapitel 7 bei Entwicklung des betroffenen Systemelements detailliert beschrieben.

### 2.5 Fazit

In diesem Kapitel wurden die relevanten Grundlagen, basierend auf der dargestellten Ausgangssituation und Zielsetzung für diese Arbeit, dargelegt. Es wurden zu Beginn die Grundlagen der PPS erläutert. Weiter wurden Risiken und deren Kategorisierung dargestellt, die in der späteren konzeptionellen Entwicklung des Systems berücksichtigt werden sollen. Neben der Berücksichtigung von Risiken soll aber auch die Risikopräferenz einer Person in der Produktionsplanung Beachtung finden, weshalb anschließend grundlegende Modelle der Entscheidungstheorie vorgestellt wurden. Dabei lag der Fokus insbesondere auf Entscheidungen unter Risiko, der Risikopräferenz von Personen sowie Verfahren zur Ermittlung dieser Risikopräferenz. An späterer Stelle der Arbeit sollen diese Verfahren als Ausgangsbasis zur Bestimmung der Risikopräferenz von Entscheidungsträgern in der Produktionsplanung dienen. In Kapitel 3 folgt nun, unter Berücksichtigung der dargelegten Grundlagen, die Darstellung und Analyse der relevanten Bereiche des Stands der Technik.

# 3 Stand der Forschung und Technik

## 3.1 Übersicht

Aufbauend auf der dargestellten Ausgangssituation und Motivation dieser Arbeit in Kapitel 1 sowie den Grundlagen aus Kapitel 2 wird im folgenden Kapitel der aktuelle Stand der Forschung und Technik diskutiert. Dieser erläutert im Hinblick auf die Zielstellung der Arbeit die Ansätze des Risikomanagements (vgl. Abschnitt 3.2). Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung werden dann im darauffolgenden Abschnitt 3.3 dargestellt. Entsprechend dem Fokus der Arbeit werden dort nur die Losgrößenplanung, die Kapazitätsabstimmung sowie die Reihenfolgeplanung berücksichtigt. In Abschnitt 3.4 wird dann der relevante Stand der Forschung und Technik im Hinblick auf die Risikopräferenz von Entscheidungsträgern analysiert. Abschließend wird der sich ergebende Handlungsbedarf aus den Erkenntnissen der vorgestellten Themenbereiche in Abschnitt 3.5 abgeleitet.

## 3.2 Ansätze des Risikomanagements in Industrieunternehmen

### 3.2.1 Allgemeines

Es existiert eine Vielzahl von Verfahren zum Risikomanagement in unterschiedlichen Branchen und für verschiedene Bereiche von Unternehmen. Der Schwerpunkt wird in dieser Arbeit aufgrund der inhaltlichen Ausrichtung auf Konzepte im Bereich von Industrieunternehmen gelegt. Hier gibt es bereits eine große Anzahl von Konzepten, die Risiken und deren Handhabung fokussieren. Folglich ist eine weitere Unterteilung der zu analysierenden Ansätze notwendig. Daher werden die im weiteren Verlauf der Arbeit analysierten Konzepte des Risikomanagements hinsichtlich ihres Wirkungsbereichs differenziert. Einerseits werden überbetriebliche Ansätze des Risikomanagements untersucht (vgl. Abschnitt 3.2.2). Dieser Bereich des Risikomanagements wird zunehmend häufiger betrachtet und ist eng verknüpft mit Ansätzen des Störungsmanagements auf Netzwerkebene, auch als Supply-Chain-Event-Management bezeichnet. Andererseits werden innerbetriebliche Verfahren zur Risikohandhabung mit Fokus auf die Produktion bzw. daran angrenzende Bereiche analysiert (vgl. Abschnitt 3.2.3).

### 3.2.2 Überbetriebliche Ansätze

Für die Berücksichtigung von Unsicherheiten zur Bewertung von Verlagerungsoptionen bei der Standortentscheidung verwendet SUDHOFF (2008) den Realoptionsansatz. Für die Berücksichtigung mehrerer Unsicherheiten wird eine Unterscheidung in primäre und sekundäre Unsicherheiten vorgenommen. Die primäre Unsicherheit wird mit Hilfe einer abgewandelten FMEA bestimmt. Das stochastische Verhalten der daraus resultierenden primären Unsicherheit wird durch Bäume, das der sekundären Unsicherheiten durch Zufallspfade modelliert. Die Risikoauswirkung der primären Unsicherheit wird demnach durch einen rekombinierenden Baum modelliert, die der sekundären Unsicherheiten durch eine Monte-Carlo-Simulation (MCS) nachgebildet. Diese beiden Modelle werden dann in eine Bewertung der Unsicherheiten und deren Einfluss auf die Verlagerung eines Standorts integriert. Die Bewertung der Risiken wird mit Hilfe des Realoptionsansatzes realisiert. Der Ansatz ermöglicht eine Bewertung der Mobilitätsmöglichkeiten in der Produktion. Eine Identifikation und Bewertung operativer Risiken während der Betriebsphase wird nicht betrachtet.

Ein Vorgehen zur Bewertung von Unsicherheiten bei der strategischen Wahl von vernetzten Produktionsstandorten wird von KREBS (2012) vorgestellt. Das Ziel ist die monetäre Bewertung unterschiedlicher Standortalternativen. Dabei werden neben quantitativen Unsicherheitsfaktoren insbesondere auch qualitative Unsicherheitsfaktoren berücksichtigt. Für die Bewertung der Abhängigkeiten dieser qualitativen Unsicherheiten wird auf ein Fuzzy-Bewertungsnetz zurückgegriffen. Die Verbindung der Einzelrisiken zu einem aggregierten Gesamtrisiko erfolgt in diesem Ansatz auf Basis einer MCS. Im Ergebnis wird dadurch eine Bewertung der einzelnen Standortalternativen ermöglicht, die anschließend in einem Bewertungsportfolio visuell dargestellt werden können. Bei der Einordnung der Alternativen in das Portfolio können Grenzwerte für risikoaffine und -averse Alternativen festgelegt werden. Dies ermöglicht eine grundsätzliche Einschätzung des betrachteten Unternehmens hinsichtlich dessen Risikopräferenz in Bezug auf die Standortwahl. Eine explizite Ermittlung der Risikopräferenz zur Berücksichtigung bei der Standortwahl findet jedoch nicht statt.

HEINECKE (2013) stellt ein Konzept für das reaktive Störungsmanagement von Events in der Supply Chain der Automobilindustrie vor. Basierend auf automatisch generierten Ereignissen aus der Lieferkette werden kritische Ereignisse definiert. Die Ankunfts Wahrscheinlichkeit der Rohmaterialien und Fertigteile beim Original

Equipment Manufacturer (OEM) im Netzwerk wird durch Bayes'sche Netze repräsentiert. In kritischen Situationen werden reaktive Maßnahmen ergriffen, um die Auswirkungen des Events in der Lieferkette auf den Produktionsprozess des OEM so gering wie möglich zu halten.

BREDOW (2014) entwickelt ein Verfahren zur Bewertung von Konfigurationen eines Wertschöpfungsnetzwerks im Automobilssektor, um bereits in frühen Planungsphasen eine Aussage hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Risiko der jeweiligen Konfiguration treffen zu können. Auf Basis der modellierten Prozesse findet erst eine deterministische Bewertung der Konfigurationen und im Anschluss eine stochastische Bewertung unter Integration möglicher Risiken statt. Die Bewertung erfolgt anhand des „Net Present Value at Risk“ in Kombination mit der Durchführung einer MCS. Des Weiteren wird ein Vorgehen zur Bewertung der Risikosteuerungsmaßnahmen durch quantitative Einordnung ihrer Wirksamkeit entwickelt. Eine strukturierte Ableitung möglicher Maßnahmen zur Risikosteuerung wird jedoch nicht durchgeführt. Die Ableitung und Auswahl von Maßnahmen im Einzelfall obliegt allein dem Anwender. Da der Betrachtungsbereich von Wertschöpfungskonfigurationen dem eigentlichen Betrieb des Wertschöpfungsnetzwerks vorgelagert ist, sind operative Risiken von diesem Ansatz nicht mitumfasst.

DAS & LASHKARI (2015) entwickeln einen Ansatz zur Beurteilung der Reaktionsfähigkeit einer Supply Chain bei Eintritt von produktions- und marktseitigen Risiken in der Lieferkette. Produktionsseitige Risiken, wie Maschinenausfälle oder fehlerhaftes Ausgangsmaterial, führen zu einer Reduktion der Produktionskapazität. Die Folgen marktseitiger Risiken, bspw. durch Naturkatastrophen oder Arbeitsniederlegungen der Beschäftigten, sind Liefereinschränkungen bei der Auslieferung an die Kunden des Unternehmens. Das mathematische Optimierungsmodell, das die Kosten verschiedener Maßnahmen für die Reaktion auf Risiken vergleicht und minimiert, erlaubt eine Auswahl der kostengünstigsten Alternative im Fall eines Risikoeintritts. Dies erlaubt es dem Supply-Chain-Planer Analysen durchzuführen und die beste Reaktion auf ein bestimmtes Risiko vorab zu bestimmen. Der Fokus dieses Ansatzes liegt auf der strategischen Planung der Supply Chain und berücksichtigt nur teilweise operative Risiken.

GENC (2015) entwickelt ein Frühwarnsystem für Lieferketten, das ein adaptives Störungsmanagement in Unternehmen ermöglicht. Dabei wird ein Referenzmodell entwickelt, welches eine einfache Integration des Frühwarnsystems in bestehende Informationssysteme bezweckt. Dies ermöglicht sowohl die Sicherstellung des Informationsflusses innerhalb eines Unternehmens, als auch zwischen den einzelnen

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

Unternehmen der Wertschöpfungskette. Die Frühwarnungen werden anhand der drei Kategorien Produkt, Prozess und Lieferant eingeteilt und bewertet. Diese Bewertung stellt die Grundlage zur Einleitung von Maßnahmen im Rahmen des Störungsmanagements innerhalb des betroffenen Unternehmens dar. Eine Bewertung der Frühwarnungen durch die Bestimmung der Auswirkungen auf den zu erwartenden Schaden wird bei diesem Ansatz jedoch nicht durchgeführt.

Auch MAURER (2016) fokussiert das Wertschöpfungsnetzwerk in seiner Arbeit zur Frühaufklärung kritischer Situationen in Versorgungsnetzen. Basierend auf einer initial manuellen Analyse des Produktspektrums und der Lieferantenbeziehung wird ein digitales Abbild des Liefernetzes erstellt. Eine Übersicht über die Bedeutung der Versorgungsprozesse erfolgt anhand der Bewertung ihres Beitrags zum Unternehmenserfolg. Nach einer Strukturierung und Zuordnung möglicher Störfaktoren wird die Kritikalität der Versorgungsprozesse durch die unternehmensindividuelle Schadens- und Risikoanfälligkeit ermittelt. Nach der Auswahl der relevanten Versorgungsprozesse durch ein erweitertes Kritikalitätsportfolio wird für die identifizierten Prozesse eine Frühaufklärung durchgeführt. Mittels des Bayes-Theorems werden die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten verschiedener Störungsszenarien der Versorgungsprozesse ermittelt und deren potenziell negative Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit des Unternehmens abgeleitet. Nach Bewertung der Handlungsalternativen unter monetären Aspekten wird in einem letzten Schritt die geeignete Alternative für eine Adaption des Liefernetzes herangezogen. Aufgrund der ständigen Veränderung der Versorgungsprozessstruktur ist eine wiederholte Durchführung der Bewertung der Versorgungsprozesse unabdingbar. Auch werden keine Risiken berücksichtigt, die im Unternehmen selbst auftreten, sondern nur solche, die sich von Seiten der Zulieferer ergeben können.

VARGAS ET AL. (2016) berücksichtigen operative Risiken und ihre Auswirkungen auf den Produktionsplanungsprozess in einem Wertschöpfungsnetzwerk. Entwickelt wird ein zentrales Entscheidungsunterstützungssystem, welches aktiviert wird, sollte die prognostizierte Schadensauswirkung eines Risikos eine zuvor festgelegte Grenze überschreiten. Dabei werden dem Planer für zuvor festgelegte Risiken Handlungsalternativen vorgeschlagen, die dann manuell priorisiert werden müssen. Der Ansatz berücksichtigt eine Vielzahl unterschiedlicher Risiken auf Wertschöpfungsnetzwerkebene, bietet jedoch keine Handlungsalternativen für einzelne Unternehmen.

### 3.2.3 Innerbetriebliche Ansätze

Ein System für das Risikomanagement in Fabrikplanungsprojekten wird von WEIG (2008) entwickelt. Der Fokus liegt hierbei auf den Gestaltungsrisiken während der Planungsphase einer Fabrik. Finanzielle oder auch rechtliche Risiken werden nicht betrachtet. Die Herausforderung der Fabrikplanung liegt in der Berücksichtigung unscharfer Planungsparameter, die erheblichen Einfluss auf die nachfolgende Layout- und Ablaufplanung in einer Fabrik haben. Nach einer Zuordnung der Planungsparameter zu zuvor festgelegten Risikofaktoren werden in der Analysephase die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Zielgrößen Ressourcen- und Herstellungskosten bestimmt. Anhand dieser Wahrscheinlichkeitsfunktionen lassen sich Aussagen hinsichtlich der Risikotragweite eines Risikofaktors für das Planungsprojekt ableiten. Im Anschluss daran werden die Hauptrisikofaktoren in einem Risikoportfolio visualisiert und identifiziert. Darauf folgt eine Beurteilung der Eignung von Risikomaßnahmen für die Reduktion der Auswirkungen eines identifizierten Risikofaktors anhand eines Entscheidungsbaums. Geeignete Maßnahmen werden dann im Rahmen des Projekts umgesetzt. Für die kontinuierliche Überwachung der Entwicklung der Risikofaktoren im Planungsverlauf werden sog. „Risk Gates“ definiert. Dabei handelt es sich um vordefinierte Zeitpunkte im Planungsverlauf, zu denen jeweils eine Überprüfung erfolgen soll, ob ein zuvor für das Projekt festgelegter Risikogrenzwert eingehalten ist oder ggf. weitere Maßnahmen zur Reduktion des Gesamtrisikos ergriffen werden müssen.

KÖNIG (2007) entwickelt ein System zum Management operativer Risiken in Produktionsunternehmen. Dabei liegt der Fokus auf der Entwicklung einer Methodik, die eine zielgerichtete Risikoidentifikation und Maßnahmeneinleitung ermöglicht. Die betrachteten Maßnahmen werden bereits vorab den unterschiedlichen Risikokategorien zugeteilt, um eine spätere Zuordnung von Maßnahmen zu bestimmten Risiken zu erleichtern.

STEINMETZ (2007) fokussiert den Produktionsbereich eines Unternehmens zur Entwicklung eines Risikomanagementvorgehens. Es wird dafür ein umfassender Methodenbaukasten zur Risikoidentifikation und -bewertung erarbeitet. Zuvor werden die Einflussfaktoren auf die Produktion anhand des Input-Output-Modells strukturiert und prinzipiell auf Produktionsfaktoren-, Produktionsprozess- und Produktrisiken eingeschränkt. Durch ein entwickeltes Frühwarnsystem, welches die Grenzwerte für bestimmte Risiken festlegt, soll sichergestellt werden, dass Risiken frühzeitig erkannt und Maßnahmen eingeleitet werden. Die Identifikation

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

und Bewertung der Risiken werden bei diesem Ansatz vorwiegend manuell durchgeführt. Dies führt zu einem kontinuierlich hohen personellen Aufwand für die Risikoanalyse. Auch die Einleitung von Maßnahmen erfolgt manuell. Es gibt keine automatisierte Ableitung von Handlungsempfehlungen oder eine autonome Einleitung von Maßnahmen zur Reduktion des Risikos. Des Weiteren werden keine Interdependenzen von Risiken bei der Risikoanalyse berücksichtigt.

NIESEN ET AL. (2016) stellen in ihrer Arbeit einen Ansatz zum datengetriebenen Risikomanagement im Kontext von Industrie 4.0 vor. Der Fokus der betrachteten Risiken liegt auf solchen, die vor allem durch die Integration moderner Informations- und Kommunikationstechnologien in den Produktionsbereich von Unternehmen entstehen. Dazu wird ein Metamodell aufgestellt, welches die Produktionsprozesse, Risiken und den wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens in Beziehung setzt und somit die Grundlage für die Risikobewertung darstellt. Zur Risikoanalyse wird ein hierarchisches Leistungskennzahlschema entworfen, welches auf unterster Ebene auf Echtzeitdaten und dazugehörigen Grenzwerten basiert, die bei Überschreitung eine Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der entsprechenden Risiken zur Folge haben. Die Autoren verwenden das System, um Risiken in Echtzeit analysieren und darstellen zu können. Weitere Maßnahmen zur Anpassung der Risikosituation werden nicht automatisiert eingeleitet und sind dem Nutzer vorbehalten.

Auch im Forschungsprojekt „*quadrika – Qualitätsdatenbasierte Risikobewertung für Industrie 4.0-Anwendungen*“ werden Daten aus verschiedenen Geschäftsprozessen und Betriebsdaten verwendet, um Daten für das Risikomanagement sowie für die Produkt- und Prozessoptimierung bereitzustellen. Der Fokus liegt auf der Bewertung der Risiken. Eine weitere Entscheidung hinsichtlich der Einleitung von Maßnahmen wird nicht behandelt. (BMBF 2018, MÜLLER ET AL. 2019B)

SCHMITT & ZENTIS (2011) stellen in ihrem Beitrag einen Ansatz vor, bei dem mit der sogenannten Innovative-Function-Effect-Modeling-Methode Risiken identifiziert und analysiert werden. Der sechsstufige Prozess beinhaltet die Modellierung des betrachteten Systems anhand eines Baums aus der Engpasstheorie sowie die Risikomodellierung durch ein Objektmodell. Darauf aufbauend werden Funktionen und Effekte des Systems abgeleitet, wobei auch unerwünschte Effekte berücksichtigt werden. Mit Hilfe dieser Modellierung können Risiken visualisiert und detailliert analysiert werden. Das notwendige Wissen über die Zusammenhänge des Produkts wird durch Prozessexperten im Rahmen von Workshops bereitgestellt. Die Darstellung unerwünschter Effekte einzelner Komponenten innerhalb

des Systems und ihrer Auswirkungen ermöglichen die Veranschaulichung komplexer Risiken, welche mehrere Ursachen haben können. Die Methode bietet weiterhin die Möglichkeit, unternehmensintern ein gemeinsames Systemverständnis aufzubauen und die Risiken klar zu unterscheiden. Für das Vorgehen ist jedoch ein hoher manueller Aufwand notwendig, da mehrere Workshops mit unterschiedlichen Experten aus verschiedenen Bereichen durchgeführt werden müssen. Auch fehlt eine klare Priorisierung der identifizierten Risiken.

SOUSA ET AL. (2015) entwickeln einen Ansatz zur Identifikation von Risiken in industriellen Prozessen. Das zentrale Element des Ansatzes ist wiederum der Einsatz einer Prozess-FMEA zur Identifikation der risikoreichsten Prozesse. Im Anschluss daran werden Einflussfaktoren auf diese Prozesse bestimmt, die einer Änderung durch das Unternehmen zugänglich sind. Basierend auf historischen Daten wird die am besten passende Wahrscheinlichkeitsverteilung für den jeweiligen Einflussfaktor gesucht. Abschließend wird eine Szenarioanalyse durchgeführt, um die Auswirkungen des Einflussparameters auf den zuvor identifizierten Prozess zu bestimmen. Basierend darauf kann manuell entschieden werden, welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um die gewünschte Ausprägung des Einflussfaktors und damit des Risikos des Prozesses zu erreichen. Sowohl der Ansatz von SCHMITT & ZENTIS (2011) als auch jener von SOUSA ET AL. (2015) liefern keine Maßnahmen zur Anpassung des Risikos im Rahmen der Produktionsplanung. Auch ist eine vorwiegend manuelle Einleitung von Maßnahmen vorgesehen. Eine automatisierte Reaktion auf Risiken wird nicht betrachtet.

In einer Fallstudie entwickeln RATNAYAKE & ANTOSZ (2017) eine Risikomatrix mit Hilfe von Fuzzy-Methoden, die je nach Fehlerhäufigkeit und persönlicher Gefährdung der Mitarbeiter sowie dem Anteil fehlerhafter Produkte oder der Anlagenverfügbarkeit, die Anlagen und Maschinen in drei verschiedene Risikokategorien unterteilt. Das Ziel des Ansatzes ist die Identifikation der kritischsten Maschinen in einer Fertigung und die Priorisierung von Instandhaltungsaktivitäten abhängig von der möglichen Schadenshöhe durch den Ausfall der betroffenen Maschine oder Komponente. Durch den Einsatz der Fuzzy-Logik kann eine verbesserte Priorisierung der Instandhaltungsaktivitäten erreicht werden, da hierdurch eine präzise Abstufung der verbalen Beurteilung der Schadensauswirkungen möglich ist. Der Ansatz bietet jedoch kein Verfahren zur Identifikation der relevanten Risiken oder zur Bewertung von Risiken auf Basis historischer Daten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in den analysierten Arbeiten ein Vorgehen zur risikogerechten Modellierung der Produktion nicht ausreichend betrachtet wird. Des Weiteren findet insbesondere auch keine für die Produktionsplanung nutzbare Analyse von Risiken statt, die in den Planungsphasen berücksichtigt werden könnte. Nachfolgend wird daher detailliert auf den Bereich der Produktionsplanung und bereits bestehende Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung eingegangen.

### 3.3 Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung

#### 3.3.1 Allgemeines

Die Aufgaben der operativen Produktionsplanung lassen sich für den in dieser Arbeit betrachteten Teil der Eigenfertigungsplanung in die Losgrößenrechnung, Termin- und Kapazitätsplanung sowie die Reihenfolgeplanung unterteilen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Der Fokus wird auf die beiden Phasen der Losgrößenrechnung sowie der Reihenfolgeplanung gelegt. Diese stellen die algorithmisch komplizierten Phasen dar und müssen daher besonders untersucht werden. Dazu wird im Folgenden der Stand der Forschung und Technik detailliert analysiert.

#### 3.3.2 Losgrößenrechnung

TEMPELMEIER (2011) führt in seinem Beitrag eine neue Lösungsheuristik für ein einstufiges, kapazitiertes und stochastisches Losgrößenproblem ein, welches mehrere Produkte berücksichtigt. Für die Losgrößenplanung wird die statische Unsicherheitsstrategie angewendet, wobei die Nachfrage als unsicher angenommen und mit einer Gleichverteilung dargestellt wird. Zusätzlich sind in diesem Modell Rückstände erlaubt und zur Leistungsmessung des stochastischen Modells wird der zyklische  $\gamma$ -Servicegrad eingeführt. Als Lösungsheuristik wird der Column-Generation-Algorithmus (CGA) verwendet, welcher das Losgrößenproblem in ein Gesamt- und Einzelproblem zerlegt. Das Gesamtproblem wird als Partitionsproblem und das Einzelproblem mit Hilfe des Shortest-Path-Algorithmus gelöst. In numerischen Studien wird ein Vergleich mit dem ABC-Algorithmus durchgeführt, wobei festgestellt wird, dass der eingeführte CGA dem ABC-Algorithmus überlegen ist.

### 3.3 Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung

---

INDERFURTH & VOGELGESANG (2013) berücksichtigen in ihrer Arbeit ein stochastisches Produktionsmodell und erläutern Methoden zur Bestimmung des optimalen Sicherheitsbestandes. Dabei werden stochastische Produktionsmengen zum einen mit einer stochastisch proportionalen Verteilung und zum anderen mit einer binomialen Verteilung dargestellt. Die berücksichtigten Unsicherheiten in der Nachfrage werden durch eine Gleichverteilung modelliert. Insgesamt werden sechs verschiedene Berechnungsarten für die Sicherheitsbestände vorgeschlagen. Da statische Berechnungen leichter in der Praxis eingesetzt werden können, findet zudem eine Unterscheidung zwischen der dynamischen und statischen Ermittlung von Sicherheitsbeständen statt. In Simulationen werden die verschiedenen Berechnungsarten für Sicherheitsbestände untersucht. Sowohl bei einer binomial als auch bei einer stochastisch proportional verteilten Produktionsmenge liefern die statischen nur minimal schlechtere Ergebnisse als die dynamischen Ansätze.

RAMEZANIAN & SAIDI-MEHRABAD (2013) behandeln in ihrer Arbeit ein kombiniertes Losgrößen- und Reihenfolgeplanungsproblem in einer Flow-Shop-Fertigung. Die unsichere Nachfrage wird dabei mit einer Gleichverteilung und die unsicheren Prozesszeiten mit einer Normalverteilung abgebildet. Es wird ein neues Mixed-Integer-Programming (MIP)-Modell entwickelt. Aufgrund der Größe dieses Modells werden drei verschiedene Lösungsheuristiken vorgeschlagen. Bei den ersten beiden Heuristiken handelt es sich um MIP-basierte Heuristiken. Zum Schluss wird noch eine Metaheuristik entwickelt, welche u. a. auf dem Simulated Annealing und dem Firefly-Algorithmus basiert. Bei der Metaheuristik wird zusätzlich die Taguchi-Methode eingesetzt, damit optimierte Parameter generiert werden können. In numerischen Experimenten wird die Überlegenheit der Metaheuristik gegenüber den MIP-basierten Heuristiken gezeigt.

RAHMANI ET AL. (2013) untersuchen ein mehrstufiges, mehrperiodiges Losgrößenproblem, bei dem mehrere Produkte berücksichtigt werden. In dem Modell, welches auch Überstunden und die Fremdvergabe von Aufträgen berücksichtigen kann, sind mehrere Parameter unsicher, u. a. die Nachfrage sowie die Rüstzeiten. Die Unsicherheiten werden mit Hilfe von Szenarien betrachtet. Zunächst entwickeln die Autoren ein MIP-Modell, wobei die Gesamtkosten, bestehend aus u. a. Rüst-, Personal- und Produktionskosten, minimiert werden sollen. Im Anschluss wird das Modell auf ein robustes Modell erweitert. In der neuen und robusten Zielfunktion sollen sowohl die Lösungs- als auch die Modellrobustheit sichergestellt werden. In der betrachteten Fallstudie wird das robuste Modell mit dem Ausgangsmodell, welches zur Berücksichtigung der Unsicherheiten die Erwartungswerte

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

verwendet, verglichen. Dabei liefert das robuste Modell im Vergleich zum Ausgangsmodell meist bessere Lösungen und ist deutlich stabiler gegenüber verschiedenen Unsicherheiten.

In der Arbeit von KOCA ET AL. (2015) wird ein stochastisches Losgrößenproblem mit unsicherer Nachfrage behandelt. Bei dem Modell wird die statische Unsicherheitsstrategie angewendet und zur Leistungsmessung wird der  $\alpha$ -Servicegrad verwendet. Zusätzlich können die Prozesszeiten kontrolliert und z. B. unter erhöhten Kosten verringert werden. Als weitere Möglichkeit zur Verringerung der Prozesszeit kann zusätzliches Personal eingesetzt werden. Die Kompressionsfunktion der Prozesszeiten wird dabei als konvex angenommen. Durch die konvexen Prozesszeiten ergibt sich ein nichtlineares MIP-Modell, welches anschließend mit Hilfe der Second-Order-Cone-Programmierung gelöst wird. In numerischen Experimenten wird bewiesen, dass kontrollierbare Prozesszeiten gerade in stochastischen Umgebungen bei limitierten Kapazitäten zu besseren und flexibleren Ergebnissen führen.

TEMPELMEIER & HILGER (2015) untersuchen ein dynamisches stochastisches Losgrößenproblem mit unsicherer Nachfrage. Dabei werden mehrere Produkte auf einer Ressource mit begrenzter Kapazität gefertigt. Zur Berücksichtigung der begrenzten Kapazität der Ressource wird die statische Unsicherheitsstrategie angewendet. Das Modell basiert auf dem deterministischen Capacitated Lot-Sizing Problem (CLP). Zur Leistungsmessung verwenden die Autoren zwei verschiedene  $\beta$ -Servicegrade, wobei  $\beta^t$  in jeder Periode und  $\beta^c$  in jedem Produktionszyklus gemessen wird. Die resultierenden Funktionen für den Lagerbestand sowie den Rückstand sind nicht linear. Somit werden diese mit stückweise linearen Funktionen angenähert. Die Lösungsfindung erfolgt mittels der Fix-and-Optimize-Heuristik, welche eine MIP-Heuristik darstellt. Dabei wird versucht die Anzahl an Binärvariablen zu reduzieren und somit eine schnellere Lösungsfindung zu ermöglichen. Die Ergebnisse werden anschließend mit dem ABC-Algorithmus und dem CGA verglichen. Eine Aussage darüber, welcher Algorithmus der bessere ist, ist pauschal nicht zu treffen und hängt immer von den aus dem Anwendungsfall abgeleiteten Anforderungen ab.

ZHU (2015) untersucht in seinem Beitrag ein Einprodukt-Bestandsführungssystem mit zwei Bezugsquellen sowie unterschiedlichen Vorlaufzeiten und Kosten. Die erste Bezugsquelle stellt dabei die Eigenfertigung dar. Die zweite Bezugsquelle hat zum einen eine längere Vorlaufzeit als die erste und ist zum anderen unterneh-

### 3.3 Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung

---

mensextern. Die Nachfrage sowie die Produktionsmenge bezogen auf die Eigenfertigung werden als unsicher angenommen. Es wird ein periodisches Modell mit einem endlichen Planungshorizont als Markov-Entscheidungsprozess formuliert und mittels dynamischer Programmierung gelöst. Die optimale Bestellstrategie bei der eigenen Fertigung wird mit Hilfe von Schwellenwerten bestimmt. Die Bestimmung der Bezugsmengen der unternehmensexternen Fertigung erweist sich allerdings als komplizierter und kann optimal nur durch eine Vereinfachung des Problems gelöst werden. Grundsätzlich führt die Unsicherheit in der Produktionsmenge zu höheren Schwellenwerten und somit auch zu höheren Gesamtkosten. Außerdem wird festgestellt, dass mit steigender Varianz der Unsicherheit in der eigenen Fertigung die Bestellmengen für die unternehmensexterne Produktion steigen. Diese Zunahme an Bestellungen soll die interne Varianz der Unsicherheit kompensieren.

HU & HU (2016) beschäftigen sich mit der simultanen Planung der Losgrößen und der Reihenfolge und verwenden ein Modell der zweistufigen stochastischen Optimierung. Die Unsicherheit wird durch die Nachfrage dargestellt, welche diskret in Szenarien modelliert wird. Zusätzlich wird die Nachfrage als jeweils unabhängig von der Nachfrage in den vorherigen Perioden angenommen. Da die Anzahl an Szenarien sehr hoch sein kann, schlägt der Autor die Methode Fast Forward Selection zur Szenarienreduktion vor. Im Modell werden in der ersten Stufe Entscheidungen über Produktionsmengen sowie Auftragsreihenfolgen getroffen. Auf der zweiten Entscheidungsstufe können Anpassungsmaßnahmen, wie z. B. Überstunden, nach Eintritt eines Szenarios vorgenommen werden. In einer Fallstudie werden die Lösungen eines deterministischen Modells mit den Lösungen des zweistufigen stochastischen Modells verglichen. Dabei wird festgestellt, dass Produktionsmengen sensibler auf Unsicherheiten reagieren als die Reihenfolge von Aufträgen. Zusätzlich erzielt das stochastische Modell vor allem bei großen Produktionsmengen bessere Ergebnisse als das deterministische Modell.

KIRSTE (2017) fokussiert in seiner Arbeit stochastische Losgrößenmodelle, welche Unsicherheiten im Produktionsprozess betrachten. Die Unsicherheiten beziehen sich dabei auf die Produktionsmenge, die Kapazität und die Prozesszeiten. Es werden sowohl einstufige als auch mehrstufige Modelle betrachtet sowie neben Einprodukt- auch Mehrproduktmodelle. Es werden verschiedene Lösungsmethoden für die Modelle dargestellt, wobei u. a. die Fix and Optimize (FO) Heuristik, der ABC-Algorithmus und der CGA behandelt werden. Für alle Modelle verwendet der Autor den zyklischen  $\beta^c$ -Servicegrad und eine statische Unsicherheitsstrategie.

Es gibt bereits mehrere Ansätze zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bzw. Risiken in der Reihenfolgeplanung, wovon für diese Arbeit relevante im folgenden Abschnitt untersucht werden sollen.

#### 3.3.3 Reihenfolgeplanung

PETROVIC & DUENAS (2006) stellen einen Ansatz vor, der Fuzzy-Systeme zur Bewältigung von zufälligen Störungen im Rahmen der Planung verwendet. Ein Algorithmus generiert in einem ersten Schritt Produktionspläne, die zu einem gewissen Grad Auswirkungen durch zukünftige Störungen kompensieren können, ohne stark verändert werden zu müssen. Eine Umplanung findet erst im zweiten Schritt statt, sollten die Auswirkungen einer eingetretenen Störung so groß sein, dass diese durch den ursprünglichen robusten Produktionsplan nicht mehr kompensiert werden können. Die Entscheidung, welche Umplanungsmethode zu verwenden ist, wird anhand mehrerer Fuzzy-Regeln festgelegt. In diesem Ansatz wird nur eine Art von Unsicherheit während der Planung berücksichtigt. Eine Kombination von Unsicherheiten findet nicht statt.

ALEMANY ET AL. (2015) haben ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt, um Lagerbestände und eingeplante Produktionsmengen mit bereits zugesagten Kundenaufträgen abzustimmen, falls es zu Engpässen kommen sollte. Die Fallstudie konzentriert sich auf die keramische Industrie und ihre besonderen Bedingungen. Unsicherheiten bzgl. der Qualität und Beschaffenheit des Fertigprodukts aufgrund unterschiedlicher Rohstoffqualität sowie die zugehörigen mathematischen Modelle und die Decision-Support-System (DSS)-Funktionalitäten sollen aber auch auf andere Branchen übertragbar sein. Das DSS basiert auf zwei ganzzahlig linearen Optimierungsmodellen. Das erste Modell weist allen mengenmäßig erfüllbaren Kundenaufträgen einen Liefertermin zu. Das zweite Modell hilft die Robustheit der gefundenen Lösungen zu bewerten, falls ein anderes als das angenommene Produktionsszenario eintritt. Die Unsicherheit im Modell ergibt sich aus den Annahmen, die der Entscheider über die Homogenität der Fertigwaren hinsichtlich Qualitätsparametern wie Material oder Abmessungen der Produkte trifft. Das DSS fokussiert die Optimierung des Bestands bzw. der Lagermengen, während Unsicherheiten, die sich aus dem Produktionsprozess selbst ergeben, nicht berücksichtigt werden.

Die im folgenden untersuchten Publikationen stellen stochastische Planungsprobleme vor, die durch einen mathematisch eindeutigen Algorithmus gelöst werden.

### 3.3 Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung

---

Die Autoren implementieren das Modell entweder direkt in eine Optimierungssoftware oder führen eine eigene Lösungsregel ein. Einige Forscher erweitern ihre Arbeiten um Heuristiken, um größere Instanzen zu optimieren.

LI (2017) untersucht den Einfluss der Berücksichtigung von Lerneffekten der Mitarbeiter bei der stochastischen Einzelmaschinenplanung. Ziel ist es, die erwartete Durchlaufzeit eines Auftrags und die erwartete Gesamtdurchlaufzeit aller Aufträge in der Fertigung zu minimieren. Es wird argumentiert, dass die Berücksichtigung von Lerneffekten bei Planungsproblemen eine Option zur Erfassung dynamischer Verarbeitungszeiten bietet. Die wiederholte Produktion desselben Auftrags verkürzt dessen Bearbeitungszeit durch den Lerneffekt. Dieser Lernfortschritt wird durch eine Funktion repräsentiert, bei der sich die Bearbeitungszeit eines Auftrags mit dessen Position in der Sequenz der Aufträge verringert. Die beiden Parameter Bearbeitungszeit und Lernrate bestimmen die Funktion. Die Bearbeitungszeiten werden als nominal angenommen, während die Lernrate durch eine bekannte Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt wird. Bei zufälligen nominalen Verarbeitungszeiten hat sich die Shortest-Expected-Processing-Time (SEPT)-Regel für beide Ziele als optimal erwiesen. Der Autor schlägt ein äquivalentes deterministisches Zuordnungsproblem vor, um das Modell zu lösen, wenn beide Parameter zufällig sind. Die Methode impliziert eine nichtlineare Funktion der Lernraten, so dass deren Zuordnungskosten mit einer MCS geschätzt werden können. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass der Ansatz des Autors eine bessere Lösung als die SEPT-Regel liefert, insbesondere für unterschiedliche Lernraten. Die Bedeutung der Berücksichtigung von Lerneffekten bei Problemen der maschinellen Planung ist somit als hoch einzuschätzen.

BENMANSOUR ET AL. (2012) betrachten ein stochastisches Problem der Einmaschinenplanung. Sie verwenden für Bearbeitungszeiten der Aufträge Exponentialverteilungen und eine generalisierte Erlang-Verteilung für die Liefertermine der Aufträge. Die generalisierte Erlang-Verteilung wird verwendet, um jede Art von positiver Wahrscheinlichkeitsverteilung zu approximieren. Sie kann durch eine Sequenz von Phasenverteilungen konstruiert werden, welche eine Kombination von Exponentialverteilungen darstellen. Ziel ist es, die Abweichung zwischen Fertigstellungszeitpunkten und Lieferterminen zu minimieren. Es konnte gezeigt werden, dass ein Produktionsplan optimal ist, dessen Aufträge in aufsteigender Reihenfolge gemäß ihren Bearbeitungszeiten eingeplant werden, wenn sie dem Auftrag mit der längsten Bearbeitungszeit vorausgehen, und in abnehmender Reihenfolge, wenn sie danach eingeplant sind. Diese Form der Einplanung von Aufträgen

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

ist auch als Shortest-Processing-Time (SPT)-Longest-Processing-Time (LPT)-Regel bekannt. Der optimale Produktionsplan ist für eine generalisierte Erlang-Verteilung mit zwei und drei Parametern, aber nicht für eine solche mit vier Parametern, gültig. Das gleiche Ergebnis konnte erzielt werden, wenn Maschinenausfälle im Modell berücksichtigt wurden.

ELYASI & SALMASI (2013) untersuchen ebenfalls ein Einzelmaschinenproblem mit zufälliger Bearbeitungszeit und Lieferterminbestimmung. Die Verteilung der Bearbeitungszeit ist bekannt, aber beliebig, und Liefertermine werden als Entscheidungsvariablen ausgewiesen. Das erste Ziel ist es, die maximale Verspätung zu minimieren, um sicherzustellen, dass alle Aufträge rechtzeitig fertiggestellt werden. Die optimale Auftragsreihenfolge wird durch die Anordnung von Aufträgen gemäß absteigendem Service Level erreicht. Der Service Level stellt dabei die Wahrscheinlichkeit dar, mit der ein Auftrag zu seinem Liefertermin fertiggestellt sein wird. Ein Auftrag ist pünktlich, wenn er ein bestimmtes Ziel-Service-Level erfüllt. Das zweite Ziel besteht in der Minimierung der Gesamtkosten, bestehend aus Strafkosten für eine zu frühe bzw. zu späte Fertigstellung sowie Produktionskosten. Für Aufträge mit gleichem Liefertermin erweist sich eine Auftragsreihenfolge als optimal, in welcher Aufträge in V-Form angeordnet werden. Eine V-förmige Sequenz impliziert zunächst eine absteigende Reihenfolge des ersten Auftragsatzes, gefolgt von einer ansteigenden Reihenfolge des zweiten Satzes bezogen auf die Bearbeitungszeit und wird auch als LPT-SPT-Regel bezeichnet. Die Autoren stellen fest, dass die Methode nicht für Aufträge mit unterschiedlichen Lieferterminen anwendbar ist.

SARIN ET AL. (2014) untersuchen die stochastische Planung eines Einzel- und Parallelmaschinenproblems unter Verwendung des Kriteriums des Conditional Value at Risk (CVaR). Der CVaR ist ein gültiges Risikomaß und stellt den Durchschnittswert für das größte Ergebnis dar. Der Durchschnittswert liegt dabei in  $1-\tau$  liegt, wobei  $\tau$  ein Wahrscheinlichkeitsniveau bezeichnet. Das Modell minimiert die erwartete gesamte gewichtete Verspätung im Zusammenhang mit dem CVaR. Die Zufälligkeit der Bearbeitungszeiten wurde über verschiedene Szenarien dargestellt, wobei deren Normalverteilung in eine diskrete Wahrscheinlichkeitsfunktion umgewandelt wurde. Das Problem wurde als zweistufiges Rekursionsproblem formuliert. Auf der ersten Stufe wird die Entscheidungsvariable zur Auftragsreihenfolge ermittelt, bevor die Zufallsparameter bekannt sind. Anschließend wird auf der zweiten Stufe die Entscheidung bzgl. Verspätung und Fertigstellung gefällt. Das Modell wurde auf ein Parallelmaschinenproblem erweitert. Die Autoren schlagen einen ganzzahligen L-förmigen Algorithmus vor, um das Problem für kleine

### 3.3 Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung

---

Mengen zu lösen, indem sie enge Grenzen für das Problem der ersten Stufe vorgeben. Für Fälle mit größerem Lösungsraum wurde eine lokale Suchmethode auf Basis der dynamischen Programmierung implementiert. Die Ergebnisse sowohl für das Einzel- als auch das Parallelmaschinenproblem konnten die Wirksamkeit des CVaR-Kriteriums belegen. Die Variabilität der Zielgröße konnte durch eine nur geringe Steigerung der erwarteten gewichteten Verspätung signifikant reduziert werden.

BAKER (2014) untersucht ein stochastisches Planungsproblem für eine Maschine. Ziel ist es, die Kosten für eine zu frühe bzw. zu späte Fertigstellung der Aufträge zu minimieren, während Liefertermine als Entscheidungsvariablen modelliert werden. Die Verarbeitungszeiten werden mit Hilfe einer Normalverteilung modelliert. Folglich sind auch die Fertigstellungszeiten normal verteilt. Der Autor schlägt einen Branch-and-Bound-Algorithmus vor, um das Problem zu lösen. Die Festlegung unterer Schranken und einer Dominanzbedingung reduzieren den Rechenaufwand. Eine Dominanzbedingung ist gegeben, wenn ein Auftrag  $j$  einem Auftrag  $k$  in einer zuvor festgelegten optimalen Reihenfolge vorausgeht. Unter diesen Annahmen ist das Modell lösbar, jedoch ist die Lösung sehr aufwändig. Darauf aufbauend werden auch heuristische Verfahren untersucht. Die Nachbarschaftssuche auf Grundlage des benachbarten paarweisen Austausches erweist sich als effizientes Vorgehen für das Modell. Unter der Einschränkung, dass für alle Aufträge die gleichen Kosten für eine unpünktliche Lieferung gelten, bietet diese Sortierung nach steigender Varianz eine effiziente Lösung.

Von BRANDA ET AL. (2016) wird ein Problem der festen Intervallplanung behandelt, bei dem die Aufträge feste Start- und Verarbeitungszeiten haben. Das Modell berücksichtigt Unsicherheiten in Bezug auf die Bearbeitungsdauer von Aufträgen, indem diese durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen repräsentiert werden. Alle Aufträge müssen anschließend einer Maschine zugeordnet werden, wobei die erwartete Anzahl von Aufträgen, die aufgrund von Verzögerungen nicht rechtzeitig bearbeitet werden können, minimiert werden soll. Das Problem wurde durch die Formulierung eines robusten Färbeproblems als deterministisches Äquivalent gelöst. Es beinhaltet ein Diagramm der Farben  $C$  als Maschinen und eine Reihe von Aufträgen  $J$  mit festen bekannten Start- und Verarbeitungszeiten. Die Menge der Kanten  $E$  umfasst alle Auftragspaare, die überlappende Verarbeitungszeiten aufweisen. Zur Generierung eines optimierten Produktionsplans wird die komplementäre Menge  $E^*$  betrachtet, die Auftragspaare enthält, in welchen der erste Auftrag endet, bevor der andere Auftrag beginnt. Zudem wird die Menge  $E$  um Auftragspaare reduziert, die sich nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit überschneiden.

Die Autoren gehen von ausreichend verfügbaren Maschinen aus, um einen realisierbaren Zeitplan zu erstellen. Daher bestraft das Modell die Kanten in der komplementären Menge  $E^*$  nur, wenn sich ein Auftragspaar die gleiche Maschine teilt. Das Problem wurde um ein Zuverlässigkeitskriterium erweitert, das die Umsetzbarkeit des Zeitplans mit einer maximalen Wahrscheinlichkeit bei Auftragsverzögerungen sicherstellt. Die Lösung erfordert einen hohen Rechenaufwand und wurde daher mithilfe eines Tabu-Suchalgorithmus generiert.

Die Analyse der Arbeiten auf dem Gebiet der Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung hat gezeigt, dass bereits unterschiedliche Ansätze existieren, die die Risiken in einzelnen Planungsphasen berücksichtigen. Jedoch berücksichtigen diese Arbeiten zumeist nicht ausschließlich Produktionsrisiken, sondern beziehen bspw. auch Risiken wie eine unsichere Nachfrage ein. Solche Risiken weisen jedoch andere Eigenschaften auf als Produktionsrisiken und sind für die operative Produktionsplanung nicht relevant. Es muss also ein Verfahren entwickelt werden, welches die Analyse von spezifischen Produktionsrisiken ermöglicht, um diese in der operativen Produktionsplanung berücksichtigen zu können. Da die vorliegende Arbeit in die Analyse zudem die individuelle Risikopräferenz einbeziehen soll, wird im nachfolgenden Abschnitt auf Ansätze zur Berücksichtigung der Risikopräferenz von Entscheidungsträgern eingegangen.

#### **3.4 Ansätze zur Berücksichtigung der Risikopräferenz in Industrieunternehmen**

Im Folgenden werden aktuelle Arbeiten vorgestellt, die die Risikopräferenz von Unternehmen bzw. Personen in Entscheidungssituationen im betrieblichen Umfeld berücksichtigen.

LAVASTRE ET AL. (2012) führen eine Studie unter Personen durch, die für das Risikomanagement in französischen Unternehmen verantwortlich sind. Sie stellen fest, dass ein effektives Supply-Chain-Risikomanagementsystem aus drei Bestandteilen aufgebaut ist: *Werkzeuge im Rahmen des Risikomanagements*, *Handhabungsstrategien für Risiken* sowie die Einstellung des Unternehmens bzw. der Person gegenüber Risiken, also die *Risikopräferenz* (s. Abbildung 3-1).

### 3.4 Ansätze zur Berücksichtigung der Risikopräferenz in Industrieunternehmen

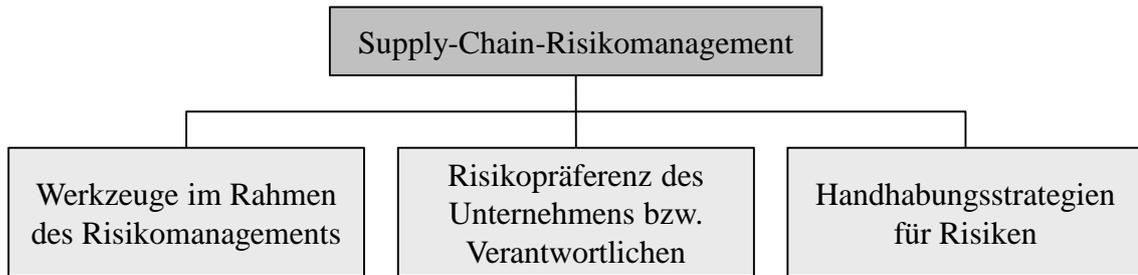


Abbildung 3-1: Bestandteile eines effektiven Supply-Chain-Risikomanagements (in Anlehnung an LAVASTRE ET AL. 2012)

Auch HECKMANN ET AL. 2015 kommen in ihrem Review verschiedener Ansätze des Supply-Chain-Risikomanagements zu dem Schluss, dass die Risikopräferenz der Unternehmen einen entscheidenden Einfluss auf die Leistung eines Wertschöpfungsnetzwerks hat. Eine explizite Berücksichtigung der Risikopräferenz findet allerdings nur bei wenigen Ansätzen statt.

PERGHER & ALMEIDA (2017) berücksichtigen bei der Constant Work in Progress (ConWIP)-Auftragsfreigabe eines Lagerfertigers die Risikoeinstellung der für die Produktionsplanung verantwortlichen Personen. Die Risikoeinstellung der Produktionsplaner wird explizit bei der Festlegung geeigneter Parameter, vornehmlich Durchlaufzeit und Durchsatzrate, für die Produktionsplanung integriert. Die Ermittlung der Risikoeinstellung erfolgt anhand einer direkten Befragung der Produktionsverantwortlichen durch Verhaltensanalyseexperten. Es fehlt jedoch ein Konzept für die Ermittlung der Risikopräferenz ohne Unterstützung von Experten. Es wird lediglich auf bereits bestehende Verfahren verwiesen. Darauf aufbauend erweitern PERGHER & ALMEIDA (2018) ihren Ansatz und berücksichtigen hierbei nicht nur die Risikopräferenz durch eine Bewertung der Risikoauswirkungen verschiedener Alternativen. Es wird zusätzlich die subjektive Bewertung der Entscheidungsträger bzgl. der Eintrittswahrscheinlichkeiten betrachteter Risiken in Form von Nutzenfunktionen einbezogen.

Basierend auf dieser Erkenntnis entwickeln QAZI ET AL. (2018) einen Ansatz für das Risikomanagement in Wertschöpfungsnetzwerken. Der Fokus liegt einerseits auf der Berücksichtigung von Interdependenzen zwischen auftretenden Wertschöpfungsnetzwerkrisiken und andererseits auf der Berücksichtigung der Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers. Diese wird durch eine direkte Befragung der Experten ermittelt. Den Experten werden verschiedene alternative Szenarien im Netzwerk vorgelegt. Diese Szenarien unterscheiden sich in der Eintrittswahr-

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

scheinlichkeit und in der Auswirkung der Risiken auf bestimmte Leistungskennzahlen. Die befragten Personen sind dann dazu aufgefordert, den einzelnen Szenarien verschiedene Nutzenwerte auf einer von null bis eins normierten Skala zuzuweisen. Basierend auf dieser Zuweisung wird eine Erwartungsnutzenfunktion für den Entscheidungsträger abgeleitet. Die Autoren gehen jedoch nicht weiter darauf ein, wie diese Nutzenfunktion ermittelt wird bzw. wie die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers explizit berücksichtigt wird.

LI ET AL. (2012) berücksichtigen die Risikoeinstellung einer Person bei der Festlegung der optimalen Route für den täglichen Weg eines Pendlers von dessen Wohn- zum Arbeitsort. Die Testpersonen müssen bei diesem Verfahren angeben, welche Route sie bevorzugen. Die vorgeschlagenen Routen unterscheiden sich in ihrer durchschnittlichen Dauer, in der Wahrscheinlichkeit zu spät bzw. zu früh am Zielort anzukommen und in ihren Kosten. So werden teilweise Mautstraßen bei der Routenplanung berücksichtigt, die in anderen Szenarien ausgeschlossen werden. Die Entscheidung der Testperson lässt somit Rückschlüsse auf dessen Risikobereitschaft zu.

CHO ET AL. (2018) entwickeln ein Berechnungsverfahren zur Optimierung der Beladung von Schiffen in der Erdgasindustrie unter Berücksichtigung unsicherer Wettereinflüsse auf die Verladevorgänge. Das Ziel der Optimierung ist eine Reduktion der entstehenden Kosten. Bei schlechtem Wetter muss die Verladung von Erdgas auf Schiffe abgebrochen werden, wodurch zusätzliche Kosten für die Lagerung des Rohstoffs sowie höhere Liegekosten für das Schiff anfallen. Die Häufigkeit von Tagen, an welchen schlechtes Wetter herrscht und somit eine Verladung unmöglich ist, dient als Eingangsparameter in das Optimierungsmodell. Je höher die Häufigkeit von Tagen mit schlechtem Wetter, desto früher wird die Verladung des Erdgases eingeplant, um mit einer hohen Wahrscheinlichkeit pünktlich verladen und liefern zu können. Die Verteilungsfunktion der Tage mit schlechtem Wetter wird als Dreiecksfunktion abgebildet. Die Parametrierung dieser Funktion kann bei unzureichender Datenlage durch den Entscheidungsträger erfolgen. Je nach Risikoeinstellung kann die Funktion so parametrierung werden, dass wenige Schlechtwettertage (= risikoaffin) oder viele Schlechtwettertage (= risikoavers) im Optimierungsmodell berücksichtigt werden. Die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers wird also explizit über die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der ungünstigen Wetterbedingungen berücksichtigt.

JABBARZADEH ET AL. (2018) stellen ein Optimierungsmodell für Wertschöpfungsnetzwerke zur Reduktion der Kosten sowie der Treibhausgasemissionen vor. Der

### 3.4 Ansätze zur Berücksichtigung der Risikopräferenz in Industrieunternehmen

---

verwendete Ansatz ermöglicht die Berücksichtigung der Risikopräferenz bei der Bestimmung der optimalen Beschaffungs- und Vertriebsstrategie für das Wertschöpfungsnetzwerk. Im Rahmen der Bewertung von Alternativen während der Auswahl einer Strategie werden die Wahrscheinlichkeiten der Einhaltung der Randbedingungen und die Kosten des jeweiligen Szenarios miteinander verglichen. Der risikoaverse Entscheidungsträger etwa kann dann, abhängig von seiner Risikopräferenz, die Parameter so wählen, dass zwar hohe Kosten entstehen, jedoch mit einer hohen Sicherheit alle Randbedingungen des Modells und damit der Lieferkette eingehalten werden können. Risikoaffinere Entscheidungsträger können eine Konfiguration des Wertschöpfungsnetzwerks mit niedrigeren Kosten wählen, jedoch kann es dadurch häufiger zur Nichteinhaltung der Randbedingungen kommen.

WU ET AL. (2020) entwickeln einen Algorithmus zur Optimierung der Durchlaufzeit sowie zur Reduktion von Stabilitätsrisiken in der Produktionsplanung. Es werden zufällige Maschinenstörungen und deren Auswirkung auf die Durchlaufzeit bei der Generierung des Produktionsplans integriert. Die Integration der Risiken findet durch das Einfügen von Leerlaufzeiten auf einer Maschine zwischen zwei Aufträgen statt. Die unterschiedliche Risikopräferenz der Entscheidungsträger wird durch ein multikriterielles Optimierungsproblem berücksichtigt. Mit der Gewichtung vorgegebener Zielgrößen durch den Entscheidungsträger findet implizit eine Berücksichtigung der individuellen Risikopräferenz statt. Eine vorherige Abfrage der Ausprägung der Risikopräferenzen der Entscheidungsträger findet nicht statt.

Die vorgestellten Ansätze zur Berücksichtigung der Risikopräferenz integrieren diese häufig implizit über die mögliche Parametrierung von Randbedingungen. Es findet jedoch keine explizite Ermittlung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers statt, die dann zur Lösung des jeweils betrachteten Problems verwendet werden kann. Des Weiteren liegt der Anwendungsbereich der vorgestellten Ansätze, mit Ausnahme des zuletzt behandelten Ansatzes, nicht in der unternehmensinternen Produktionsplanung. Auch dem von WU ET AL. (2020) entwickelten Modell fehlt es jedoch an einer expliziten Berücksichtigung der individuellen Risikopräferenz. Daher kann keines der vorgestellten Verfahren für das in dieser Arbeit zu entwickelnde System zur operativen Produktionsplanung übernommen werden.

### 3.5 Ableitung des Handlungsbedarfs

In Kapitel 3 wurden bisher die für diese Arbeit relevanten Forschungsvorhaben aus dem Stand der Forschung und Technik betrachtet. Der Fokus lag dabei auf Partialsystemen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung, insbesondere in der Losgrößen- sowie der Reihenfolgeplanung. Daneben wurden verschiedene Ansätze des Risikomanagements untersucht. Hierbei wurden über- und innerbetriebliche Konzepte zur Beherrschung von Risiken produzierender Unternehmen näher betrachtet. Weiter wurden Ansätze zur Berücksichtigung der Risikopräferenz von Entscheidungsträgern betrachtet, vorwiegend in betrieblichen Entscheidungssituationen. Im Folgenden lässt sich nun aus den bei der Analyse des aktuellen Stands der Forschung und Technik gewonnenen Erkenntnissen der bestehende Handlungsbedarf ableiten.

#### **Risikogerechte Modellierung des Produktionssystems**

Zur risikogerechten Modellierung eines Produktionssystems, das die in der Produktion vorhandenen Risiken und die Risikopräferenz des Entscheiders berücksichtigen soll, sind verschiedene Daten notwendig, die derzeit für die Produktionsplanung noch nicht zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse der durchzuführenden Risikoanalyse, bspw. die Interdependenz von Risiken, müssen in dafür geeigneten Modellen gespeichert werden, sodass die gewonnenen Daten durch Planungssysteme genutzt werden können. Dazu sollen bereits vorhandene Modelle um die für die Zielsetzung notwendigen Informationen erweitert und für den Anwendungsfall adaptiert werden. Als weiteres Element müssen auch die zu ermittelnden Informationen zur Risikopräferenz des Entscheidungsträgers in diesen Datenmodellen gespeichert werden, um in der Planung Berücksichtigung zu finden.

#### **Analyse von Produktionsrisiken**

Bisherige Ansätze zur Identifikation von Risiken berücksichtigen nur teilweise die Randbedingungen in der Produktion, die aus der zunehmenden Digitalisierung und den damit einhergehenden stark vernetzten Produktionssystemen resultieren. So muss ein Vorgehen entwickelt werden, das eine Identifikation von Risiken unter Berücksichtigung relevanter Maschinen- und Zustandsdaten ermöglicht. Zudem soll dieses Vorgehen in einem weiteren Schritt die Möglichkeit zur Analyse und Bewertung der identifizierten Risiken unter Berücksichtigung der Interdependenz von Risiken eröffnen. Da vor allem die Kombination mehrerer Risiken schwerwiegende Konsequenzen haben kann, muss dies im Rahmen der Produktionsplanung berücksichtigt werden.

### **Berücksichtigung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung**

Die Berücksichtigung der Risikopräferenz eines Entscheidungsträgers hat entscheidenden Einfluss auf die Erreichung der Zielgrößen in der Produktion. Daher ist die Einbeziehung der Risikopräferenz in die Produktionsplanung sinnvoll. Die Analyse des Stands der Forschung und Technik in diesem Bereich hat jedoch gezeigt, dass in den bestehenden Ansätzen zur Produktionsplanung die Risikopräferenz des Entscheiders aktuell kaum berücksichtigt wird. Somit sind bestehende Systeme zur Produktionsplanung so anzupassen, dass die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers Berücksichtigung findet.

### **Ermittlung der individuellen Risikopräferenz**

Bestehende Ansätze zur Ermittlung der Risikopräferenz bieten das Potenzial, die Risikobereitschaft des Entscheidungsträgers auch in der Produktionsplanung abbilden zu können. Es soll deshalb ein Verfahren entwickelt werden, das es erlaubt, die Risikopräferenz eines Entscheidungsträgers zu testen und in geeigneter Art und Weise in den dafür vorgesehenen Datenmodellen zu speichern. Dadurch können Planungssysteme die Risikopräferenz anschließend verwenden und bei der Planerstellung berücksichtigen. Zusätzlich soll ein Klassifizierungsschema entwickelt werden, das die ermittelte Risikopräferenz in unterschiedliche Klassen einteilt, sodass eine einfachere Berücksichtigung während der Phasen der Produktionsplanung gewährleistet ist.

### **Phasenspezifische Berücksichtigung von Risiken**

Der Stand der Forschung und Technik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung hat gezeigt, dass es bereits zahlreiche Arbeiten gibt, die isoliert einzelne Phasen der operativen Produktionsplanung fokussieren. Jedoch fehlt es bislang an einem Vorgehen, das die Phasen zusammenhängend betrachtet und Risiken, abhängig von ihrer individuellen Auswirkung in den einzelnen Phasen, berücksichtigt. Es ist daher ein Ansatz zur phasenspezifischen Berücksichtigung von Risiken zu entwickeln. Dabei gilt es, eine Klassifikation für Risiken zu erarbeiten, die eine Zuordnung zu den jeweiligen Phasen der Produktionsplanung aufgrund der spezifischen Risikoeigenschaften, wie bspw. der Eintrittswahrscheinlichkeit, zulässt. Vor diesem Hintergrund sollen für die in dieser Arbeit betrachteten Phasen der Produktionsplanung Risiken phasenspezifisch berücksichtigt werden, um so ihre Auswirkungen auf die Produktion zu verringern.

### **3 Stand der Forschung und Technik**

---

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Handlungsbedarf sich aus der Integration von Risiken in die operative Produktionsplanung sowie der Berücksichtigung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers zusammensetzt. Die Risikointegration in die Produktionsplanung ist, wie im Stand der Forschung und Technik dargestellt, schon in mehreren Arbeiten behandelt worden und somit als fortgeschritten einzuordnen. Die Risikopräferenz von Entscheidungsträgern wird bisher jedoch nur unzureichend über eine implizite Berücksichtigung in Entscheidungssituationen für die Produktionsplanung behandelt. Diese Arbeit konzentriert sich daher auf die Kombination dieser beiden Teilbereiche, um künftig die Risikopräferenz von Entscheidungsträgern in der Produktionsplanung ermitteln und berücksichtigen zu können.

Basierend auf den grundlegenden Darstellungen in Kapitel 2 und dem Stand der Forschung und Technik sowie dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf in Kapitel 3 werden im nachfolgenden Kapitel die Anforderungen an das zu entwickelnde System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz erarbeitet. Darauf aufbauend erfolgt die Vorstellung des Systems sowie der einzelnen Systemelemente.

## **4 System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz**

### **4.1 Übersicht**

Die in Kapitel 1 dargestellten Herausforderungen der zunehmenden Komplexität heutiger Produktionssysteme und die damit einhergehenden steigenden Unsicherheiten in den einzelnen Wertschöpfungsstufen führen zu einer Beeinträchtigung der Planungszuverlässigkeit in Produktionsunternehmen. Störungen in der Produktion können durch die Produktionsplanung jedoch in Form von noch nicht eingetretenen Risiken bereits vorab berücksichtigt werden. Dabei muss eine Entscheidung darüber getroffen werden, wie die bestehenden Risiken mit den der Planung zur Verfügung stehenden Möglichkeiten integriert werden sollen. Im Rahmen dieser Entscheidungssituation ist neben der zur Verfügung stehenden Datenbasis und den festgelegten Randbedingungen auch die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers von Bedeutung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter Berücksichtigung des aus dem in Kapitel 3 analysierten Stand der Forschung und Technik abgeleiteten Handlungsbedarfs ein System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz entwickelt. Die notwendigen Anforderungen an das System werden im Folgenden erläutert (vgl. Abschnitt 4.2). Im Anschluss an die Definition der Anforderungen werden das System und dessen Elemente vorgestellt (vgl. Abschnitt 4.3).

### **4.2 Anforderungen an eine risikoorientierte Produktionsplanung**

#### **4.2.1 Allgemeines**

Im folgenden Abschnitt werden zu Beginn allgemeine Anforderungen an das zu entwickelnde System definiert, die unabhängig vom speziellen Einsatzzweck und dem Anwendungsfall zu beachten sind. Im Anschluss daran werden spezifische Anforderungen an das zu entwickelnde System definiert. Diese lassen sich aus dem Stand der Technik sowie jüngsten Erkenntnissen aktueller Forschungsarbeiten ableiten.

## **4 System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz**

---

### **4.2.2 Allgemeine Anforderungen**

#### **Transparenz**

Die Praxistauglichkeit des Systems hängt entscheidend von der Transparenz für den Anwender ab. So muss in den einzelnen Bausteinen des Systems immer Klarheit über den aktuellen Bearbeitungsfortschritt und die für die jeweilige Phase relevanten Daten herrschen. Außerdem wird durch eine hohe Transparenz die mögliche Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle gewährleistet. Weiterhin wird durch diese Anforderung auch die Nachvollziehbarkeit der einzelnen Schritte für den Anwender sichergestellt. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass der Anwender die Planungsvorschläge des Systems übernimmt und umsetzt. Dies ist für die Erreichung der durch die Planung festgelegten Zielgrößen essenziell.

#### **Adaptierbarkeit und Skalierbarkeit**

Das zu entwickelnde System muss adaptierbar gestaltet werden, um auch auf andere Anwendungsfälle übertragen werden zu können. Hierfür muss die Branchen- und Unternehmensunabhängigkeit des Systems gewährleistet sein. Grundlage dafür ist die Beschreibung des Systems und der betrachteten Ressourcen der Produktion mit einer generischen Modellierungssprache. Dabei muss neben der einfachen Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle auch eine produktionssystemspezifische Anpassbarkeit und Skalierbarkeit sichergestellt sein, sodass Veränderungen in Produktionssystemen aufwandsarm in das System integriert werden können. Zudem sollte auch die Integrierbarkeit des Planungssystems in bereits bestehende IT-Systeme mit geringem Aufwand möglich sein.

#### **Durchgängigkeit des Datenmodells**

Es ist erforderlich, für das zu entwickelnde System eine Vielzahl unterschiedlicher Daten aufzunehmen bzw. aus bestehenden Systemen weiterzuverwenden. So sind bereits bei der Risikoidentifikation unterschiedliche Datenquellen heranzuziehen. Daneben wird aber gerade auch bei der Risikobewertung eine Vielzahl systemzustandsbezogener Daten verwendet. Das System muss somit durch eine redundanzfreie, strukturierte Datenhaltung die Durchgängigkeit der Daten gewährleisten.

### 4.2.3 Spezifische Anforderungen

#### **Analyse des vorhandenen Risikos**

Ein wichtiger Bestandteil des Planungssystems ist die Identifikation und die anschließende Analyse von Risiken im Produktionssystem. Dazu müssen die in einem Produktionssystem vorhandenen Risiken mittels eines geeigneten Vorgehens identifiziert werden können. Dabei ist explizit auf die Universalität des Vorgehens hinsichtlich der Anwendbarkeit in unterschiedlichen Unternehmen zu achten. Das Vorgehen sollte ebenfalls so modular aufgebaut sein, dass einzelne Verfahrensschritte, abhängig von den kontextspezifischen Randbedingungen, ausgelassen oder durch andere Schritte ersetzt werden können.

#### **Beschreibung des Risikoniveaus des Produktionssystems**

Die Analyse des Stands der Forschung und Technik hat gezeigt, dass bisherige Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen keine ausreichende Beschreibung von Risiken und der Risikopräferenz ermöglichen. Als wichtigste Voraussetzung für die adäquate Beschreibung des Risikoniveaus müssen ressourcenspezifische Risiken für das Planungssystem dargestellt werden können. Daneben ist auch eine Beschreibung auftragsspezifischer Risiken zu ermöglichen.

#### **Ermittlung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers**

Die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers muss in dem zu entwickelnden Planungssystem berücksichtigt werden können. Daher sind bestehende Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz zu adaptieren, sodass sie auch in der Produktionsplanung angewendet werden können. Die ermittelte Risikopräferenz muss in geeigneter Form in dem zu entwickelnden System abgebildet werden können.

#### **Integration der risikorelevanten Informationen in die Produktionsplanung**

Basierend auf der Beschreibung des Produktionssystems muss das Planungssystem die Integration der Risiken und der Risikopräferenz in die betrachteten Phasen der Produktionsplanung sicherstellen. Dazu muss eine Zuordnung der Risiken zu den einzelnen Planungsphasen möglich sein. Außerdem muss eine Anpassung des Produktionsplanungsvorgehens durchgeführt werden, sodass die zugeordneten Risiken berücksichtigt werden können. Die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers muss ebenfalls in die Produktionsplanung integriert werden können.

Im folgenden Abschnitt werden das auf den Anforderungen basierende System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz und

## 4 System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

dessen Systemelemente vorgestellt. Eine Übersicht über die grundlegenden Anforderungen gibt Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Anforderungen an ein System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

Anforderungen	allgemein	Transparenz
		Adaptierbarkeit und Skalierbarkeit
		Durchgängigkeit des Datenmodells
	spezifisch	Analyse des vorhandenen Risikos
		Beschreibung des Risikoniveaus des Produktionssystems
		Ermittlung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers
		Integration der risikorelevanten Informationen in die Produktionsplanung

### 4.3 Systemübersicht

In diesem Abschnitt werden das System zur operativen Produktionsplanung sowie dessen Systemelemente, die in den nachfolgenden Kapiteln 5 bis 8 entwickelt und detailliert beschrieben werden, vorgestellt. Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit werden Risiken und die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers im Kontext der Produktionsplanung berücksichtigt. Das zu entwickelnde System besteht aus den Elementen *Risikogerechtes Systemmodell*, *Quantifizierte Risiken*, *Risikopräferenz des Entscheidungsträgers* und *Methode zur operativen Produktionsplanung* (s. Abbildung 4-1).

Das *risikogerechte Systemmodell* stellt die Grundlage der nachfolgenden Systemelemente dar. Um die Risikobewertung durchführen zu können, müssen vorbereitend die in einem Produktionssystem vorhandenen Risiken mittels eines geeigneten Vorgehens identifiziert werden. Hierbei gilt es ein bereits bestehendes Verfahren zur Risikoidentifikation zu adaptieren und sicherzustellen, dass dieses unabhängig vom betrachteten Produktionssystem verwendet werden kann. Weiterhin werden die Bestandteile des Systemmodells vorgestellt, um eine Modellierung des Produktionssystems im betrachteten Anwendungsfall zu ermöglichen.

Darauf aufbauend werden die mit Unsicherheit behafteten Parameter spezifiziert und dabei *quantifizierte Risiken* ermittelt. Neben der Betrachtung einzelner Risikofaktoren wird ein Vorgehen zur Zusammenfassung der Risikofaktoren in geeigneten Aggregationsstufen vorgestellt. Entscheidend hierfür ist die Kenntnis über

die Wirkzusammenhänge der einzelnen Risikofaktoren. Zur Bestimmung der Risikofaktoren wird ein Ansatz erarbeitet. Abschließend wird das Konzept für die Risikodatenbank vorgestellt, in der die quantifizierten Risiken gespeichert und somit für die spätere Nutzung während der Produktionsplanung verfügbar gemacht werden.

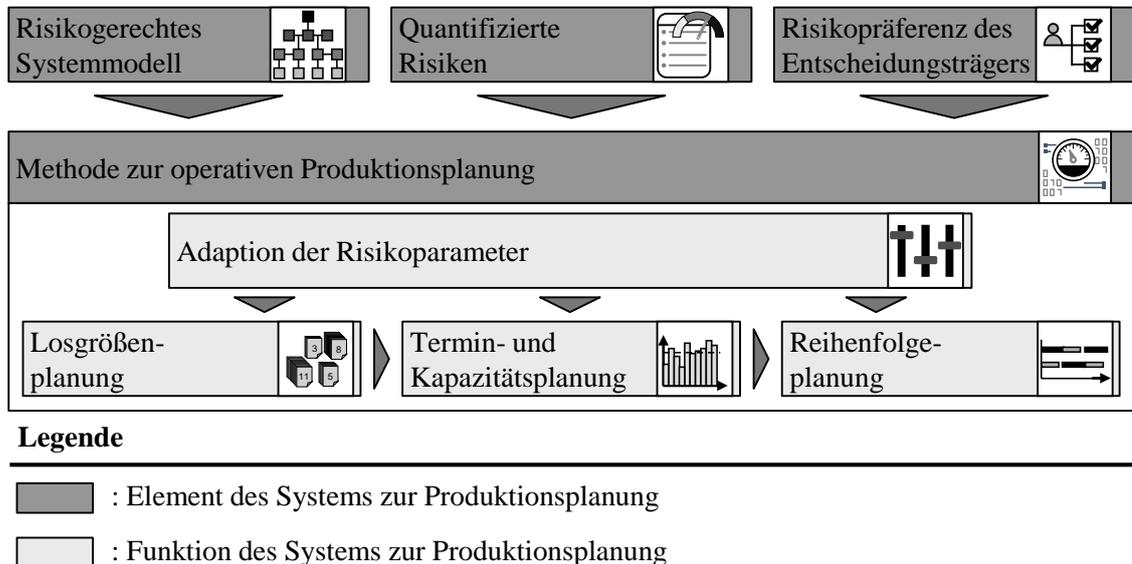


Abbildung 4-1: Überblick über das System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

Neben dieser objektiven Perspektive auf die Risiken und das betrachtete Modell wird mit der *Risikopräferenz des Entscheidungsträgers* auch eine subjektive Perspektive berücksichtigt. Innerhalb dieses Systemelements werden vorhandene Ansätze aus der Entscheidungstheorie zur Messung der Risikopräferenz, bspw. ökonomische TV, untersucht und adaptiert, um sie für den Betrachtungsfokus dieser Arbeit anwendbar zu machen. Die ermittelte Risikopräferenz muss anschließend in ein entsprechendes Format gebracht werden, sodass sie in der Produktionsplanung berücksichtigt werden kann. In Anlehnung an bereits bestehende Richtlinien, etwa aus der Maschinensicherheitstechnik, sind Präferenzklassen zu entwickeln, die in unterschiedlichen Unternehmenstypen universal einsetzbar sind.

Nachdem die Risikoanalyse durchgeführt und die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers ermittelt wurde, sind diese Daten in die *Methode zur operativen Produktionsplanung* zu integrieren und während der betrachteten Phasen einzubeziehen. Dazu muss in einem ersten Schritt die Anpassung der Risikoparameter der einzelnen Phasen erfolgen. Abhängig von der Risikopräferenz des Produktionsplaners sind dazu bspw. in der Losgrößenplanung die Anpassung der gewünschten

## 4 System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

Lagerreichweite oder in der Reihenfolgeplanung die mindestens zu erreichende Termintreue des Produktionsplans zu definieren. Aufgrund der inhärenten Unsicherheiten der Plandaten ist hierbei ein geeignetes Kriterium zu entwickeln, anhand dessen die Entscheidung für einen Plan in der jeweiligen Phase getroffen werden kann. Dazu kann bspw. auf Verfahren zur Entscheidung unter Risiko aus der Entscheidungstheorie zurückgegriffen werden.

Die Sequenz der entwickelten Systemelemente lehnt sich an die Phasen des Risikomanagements (vgl. Abschnitt 2.3.5.2) an. Das *risikogerechte Systemmodell* kann als Ergebnis der ersten Phase des Risikomanagementprozesses *Risikoidentifikation* verstanden werden. Es erfolgt zum einen die Definition des relevanten Systems, zum anderen die Identifikation der in diesem System vorhandenen Risiken. Die Elemente *Quantifizierte Risiken* und *Risikopräferenz des Entscheidungsträgers* entsprechen der Phase *Risikoanalyse/-bewertung*. In beiden Fällen werden Risiken quantifiziert und deren Bedeutung für das Unternehmen ermittelt. Zur Berücksichtigung von Risiken in der Produktionsplanungsphase wird ein risikoorientierter Produktionsplan erstellt. Dieser beruht auf der Berücksichtigung von Risiken und der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers. Als Maßnahmeninitiierung zur Reduktion des vorhandenen Risikos in der Produktion ist dies den in der Phase *Risikosteuerung* zu ergreifenden Maßnahmen vergleichbar. Die *Risikoüberwachung* dient zur kontinuierlichen Überprüfung der Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen. Dieser Schritt wird in der Produktionssteuerung durch eine fortlaufende Überwachung der Aufträge realisiert. Da die Produktionssteuerung in der vorliegenden Arbeit nicht fokussiert wird, bleibt die Risikoüberwachung in dem hier entwickelten System unberücksichtigt (s. Abbildung 4-2).



Abbildung 4-2: Einordnung des Systems in den Risikomanagementprozess

In den folgenden Kapiteln werden die vorgestellten Elemente des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz näher erläutert (vgl. Kapitel 5 bis 8) und die Validierung des Systems anhand eines realen Anwendungsfalls umgesetzt (vgl. Kapitel 9).

## **5 Risikogerechte Systemmodellierung**

### **5.1 Übersicht**

Das in diesem Kapitel entwickelte risikogerechte Systemmodell stellt die Grundlage für die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Bausteine dar. Dabei müssen insbesondere die Eigenschaften des zu analysierenden Produktionssystems berücksichtigt werden. Nach der Identifikation der Risiken werden diese in einer geeigneten Modellierungssprache zusammen mit der Struktur des Produktionssystems abgebildet. Insbesondere die spätere Anwendbarkeit des Modells für die Risikoquantifizierung und -präferenzmessung soll bei der Entwicklung berücksichtigt werden. Ein geeignetes Vorgehen zur Risikoidentifikation wird daher in Abschnitt 5.2 vorgestellt. Anschließend wird ein Modellierungskonzept für das zu betrachtende Produktionssystem in Abschnitt 5.3 detailliert, welches es ermöglicht, verschiedene Risiken in der Produktion zu berücksichtigen. Dazu bedarf es einer Strukturierung der verschiedenen Ressourcen eines Produktionssystems, wobei hier auf bereits bestehende Normen und Standards wie bspw. die Norm DIN 8580 Bezug genommen wird.

### **5.2 Identifikation von Risiken im Produktionssystem**

#### **5.2.1 Allgemeines**

Die Identifikation von Risiken ist der erste Schritt im Rahmen des Risikomanagements und bildet die Grundlage für alle nachfolgenden Schritte. Der Identifikation der Risiken ist deshalb eine hohe Bedeutung zuzumessen. Grundsätzlich ist in dieser Phase auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Aufwand und Kosten zu achten. Zur Sicherstellung dieser Ausgewogenheit wird zuallererst eine Strukturierung möglicher Risiken vorgenommen, sodass eine Fokussierung auf die Identifikation planungsrelevanter Produktionsrisiken möglich wird (vgl. Abschnitt 5.2.2). Im Anschluss erfolgt die Darstellung des Ablaufs des entwickelten Vorgehens zur Risikoidentifikation (vgl. Abschnitt 5.2.3).

### 5.2.2 Strukturierung der Wirkung von Produktionsrisiken

Die Strukturierung der Wirkung von Produktionsrisiken dient der Einordnung hinsichtlich ihrer Relevanz für den Produktionsplanungsprozess. Zugrunde gelegt wird dafür die Ursache-Wirkungs-Kette von Risiken (s. Abbildung 5-1). Die *Risikoauswirkung* manifestiert sich durch eine Verfehlung der Soll-Werte der Zielgrößen im Zielsystem der PPS (STEINMETZ 2007). Dies ist wiederum auf die Ergebnisse der einzelnen Produktionsplanungsphasen zurückzuführen, die sog. *Risikoträger*, die vom Planwert abweichen (SCHUH & SCHMIDT 2014). Diese Abweichung wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher *Risikofaktoren* beeinflusst. Die *Ursachen* für Risikofaktoren werden für diese Arbeit nicht näher betrachtet.

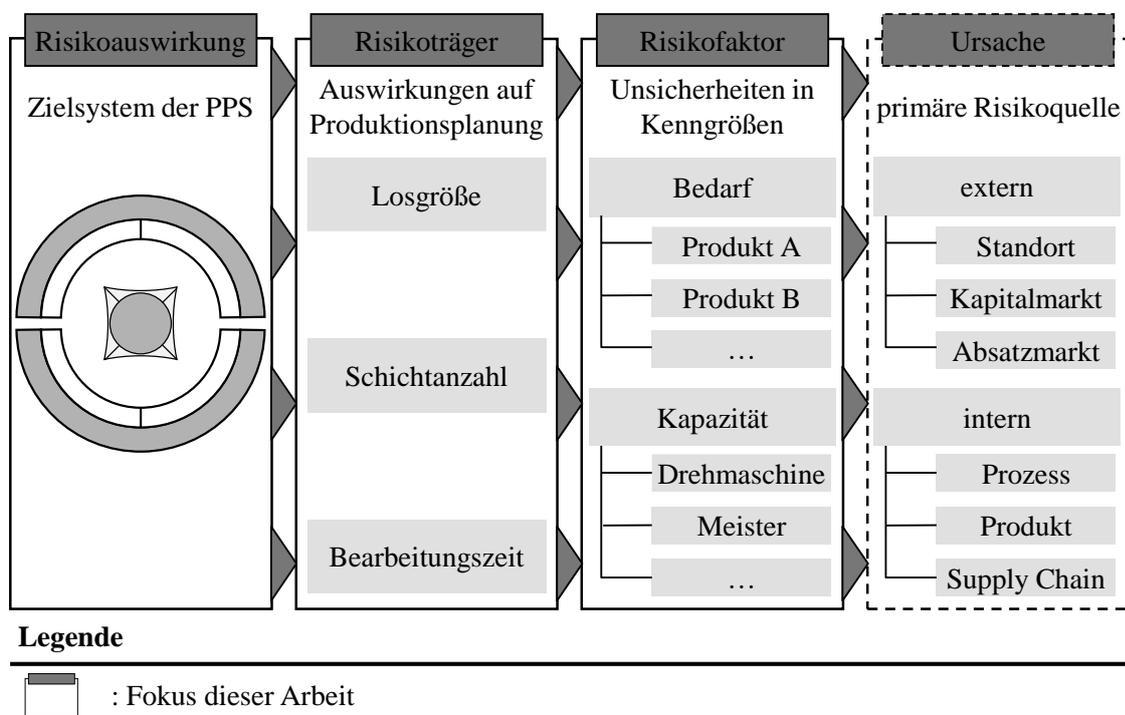


Abbildung 5-1: *Erweiterte Ursache-Wirkungs-Kette*  
(in Anlehnung an WEIG 2008)

Die *Risikoauswirkung* besteht in den Konsequenzen, die durch den Eintritt der Risiken offenbar werden, also die negative Beeinflussung der relevanten Zielgrößen. Im Rahmen der PPS sind das die am häufigsten verwendeten Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue. Für eine genaue Bewertung des Risikos muss dabei die mögliche Abweichung von der betrachteten Zielgröße jeweils individuell bestimmt werden.

## 5.2 Identifikation von Risiken im Produktionssystem

*Risikoträger* sind die Parameter der Produktionsplanung, deren Wert durch die Unsicherheiten der Risikofaktoren beeinflusst wird. Bei Fokus auf die operative Produktionsplanung sind sie als die Kategorien *Losgröße*, *Schichtanzahl* sowie *Bearbeitungszeit* der Produktionsaufträge zusammenzufassen (s. Abbildung 5-2). Diese *Risikoträger* sind die Ergebnisse der Phasen der operativen Produktionsplanung und stehen somit im Fokus der Risikosteuerung. (SCHUH ET AL. 2014).

Phasen der operativen Produktionsplanung	Risikoträger	Risikofaktoren
Losgrößenrechnung	Losgröße	Rüstdauer, Materialverfügbarkeit
Kapazitätsabstimmung	Schichtanzahl	Mitarbeiterzahl, Ressourcenzahl
Reihenfolgeplanung	Bearbeitungszeit	Losgrößenrechnung

Abbildung 5-2: *Risikoträger und Faktoren in den Phasen der operativen Produktionsplanung*

*Risikofaktoren* sind solche Kenngrößen in der Produktion, welche mit Unsicherheiten behaftet sind. Allerdings sind diese Risikofaktoren noch zu heterogen, um in der Produktionsplanung berücksichtigt werden zu können. Unterschieden werden können Risikofaktoren im Rahmen der Produktionsplanung in *Bedarf* und *Kapazität*. Im betrachteten Fall kann darunter etwa die Unsicherheit verstanden werden, wann ein bestimmtes Ausgangsmaterial zu Verfügung steht oder wie hoch die Kapazität einer Ressource tatsächlich ist. Die Unsicherheit in Bezug auf die verschiedenen Kenngrößen muss durch eine Abbildung mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen und anschließender Aggregation zu Risikoträgern in den geeigneten Produktionsplanungsphasen berücksichtigt werden.

Die *Ursachen* von Risiken können entweder interner oder externer Natur sein. So können bspw. vorgelagerte Wertschöpfungsstufen in einem Netzwerk die Ursache für auftretende Risiken in einem Unternehmen sein. Diese Risikoursachen entziehen sich jedoch dem in dieser Arbeit betrachteten Bereich der PPS und werden somit nicht für eine zielführende Identifikation planungsrelevanter Risiken herangezogen.

Nach der Strukturierung der Wirkung von Risiken folgt die Darstellung des Vorgehens zur Identifikation sowie einer ersten Priorisierung der Risikofaktoren in der Produktion.

### 5.2.3 Ablauf der Risikoidentifikation

Die Identifikation der Risiken ist in mehrere Schritte unterteilt (KLÖBER-KOCH ET AL. 2018). Zu Beginn findet die Eingrenzung des Betrachtungsbereichs sowie eine Festlegung der Informationsquellen für die benötigten Daten statt. Im Anschluss erfolgt die Prüfung bereits bekannter Risiken. Abschließend werden neue Risiken im Produktionssystem ermittelt (s. Abbildung 5-3). Diese Stufen werden im Folgenden erläutert.

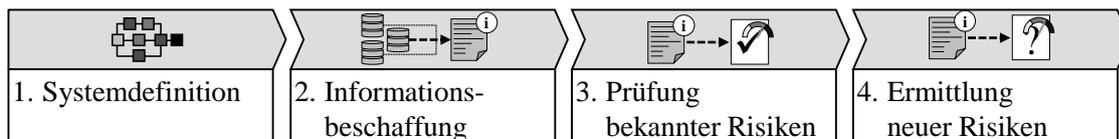


Abbildung 5-3: Übersicht über den Ablauf der Risikoidentifikation

Das Vorgehen basiert auf der aus dem Qualitätsmanagement bekannten FMEA. Sie eignet sich insbesondere deshalb, da sie den systematischen Umgang mit dem in einem Unternehmen vorhandenen Wissen über Zusammenhänge und Wechselwirkungen unterstützt. Wie bereits in Abschnitt 2.3.5.3 erläutert, existieren mehrere Arten der FMEA. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommt eine Prozess-FMEA zum Einsatz

Schließlich wird eine realitätsnahe Darstellung des zu betrachtenden Produktionssystems geschaffen. Diese wiederum dient als Grundlage für die Ableitung von Risiken. Die dafür erforderliche Produkt- und Prozessbeschreibung erfolgt mittels einer Struktur- und/oder Funktionsanalyse mit vorhandenen Dokumenten bspw. aus dem Qualitätsmanagement oder einer Wertstromanalyse.

#### 1. Systemdefinition

Für die Systemdefinition wird die im vorhergehenden Abschnitt 5.2.2 dargestellte Ursache-Wirkungs-Kette herangezogen. Der Kern der Betrachtung ist auf die relevanten Risikofaktoren einzugrenzen. Die mit diesen verbundenen Unsicherheiten wirken sich auf die Risikoträger aus und können im Rahmen der Handhabung der Risiken beeinflusst werden.

Für die Erstellung des Systemmodells wird ein hierarchischer Ansatz verfolgt (z. B. Hauptkomponente, Subkomponente, Baugruppe). Dadurch kann eine detailliertere Modellierung erfolgen, abhängig davon, auf welcher Ebene die Produktionsplanung durchgeführt wird (vgl. Abschnitt 6.6). Bereits vorhandenes Wissen

dient als Grundlage für die Erstellung des Flussdiagramms. So können bestehende Prozesshandbücher, etwa aus dem Qualitätsmanagement, hilfreiche Informationen liefern.

Insgesamt gibt die Systembeschreibung Aufschluss über die Systemfunktionen, Abläufe und Prozesse, Komponenten und Teilsysteme sowie die vorhandenen Schnittstellen. Bei der Strukturierung der Systembeschreibung ist zu beachten, dass alle Randbedingungen eingehalten werden. Zu diesen Randbedingungen zählt es etwa, die passende Detaillierungsstufe für die Modellierung zu wählen oder die Prämisse auf Basis von aktuellen Daten zu arbeiten (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT 2012). Die erstellte Beschreibung des Systems stellt den Ausgangspunkt für die Identifikation von Risiken dar. Das zu analysierende Produktionssystem ist in überschaubare Einheiten aufgeteilt, sodass elementspezifische Risiken identifiziert werden können.

### **2. Informationsbeschaffung**

Nachdem die Abgrenzung des betrachteten Produktionssystems im vorherigen Schritt vorgenommen wurde, müssen im zweiten Schritt die für die Risikoidentifikation relevanten Daten und Informationen bestimmt und beschafft werden. Zu den internen Informationen aus dem Produktionsbereich zählen Dokumente aus der Schadensfalldatenbank oder auch Auswertungen von Kundenreklamationen, die über die in der Vergangenheit aufgetretenen Fehler und Auswirkungen informieren. Daneben wird auf Rückmeldedaten aus Fertigung und Montage über BDE- und MDE-Systeme zurückgegriffen. Hinzu kommen Schaltbilder, Montagepläne, Prozessbeschreibungen und Ergebnisse aus anderen Funktionsbereichen, z. B. aus dem Qualitätsmanagement oder Controlling, die übernommen werden können. Hier sind insbesondere die Listen typischer Risiken zu erwähnen, die von Verbänden und Institutionen herausgegeben werden und an die Umstände im Unternehmen angepasst werden müssen.

### **3. Prüfung bekannter Risiken**

Für die Risikoidentifikation im engeren Sinne gilt es zunächst, die bereits bekannten Risiken zu erfassen. Darunter werden solche Risiken verstanden, die bereits durch Erfahrungen in der Vergangenheit mit ähnlichen Produkten bzw. mit dem zu untersuchenden Prozess aufgetreten sind.

Zu ihrer Erfassung eignen sich Kollektionsmethoden, die in Abschnitt 2.3.5.3 erläutert wurden. Insbesondere die Checkliste und das Experteninterview eignen sich für die Erfassung von bereits bekannten Risiken. Unterstützend können auch

Schadensfalldatenbanken und Simulationsmodelle herangezogen werden. Basierend auf den Checklisten können Experteninterviews gestaltet werden, um die notwendigen Risiken zu identifizieren. Durch die Verwendung dieser Methoden lässt sich sowohl explizit als auch implizit im Unternehmen vorhandenes Wissen erfassen. Explizites Wissen liegt in dokumentierter Form vor, z. B. in Dokumenten aus vorherigen Risikomanagementzyklen. Implizites Wissen hingegen ist nicht schriftlich dokumentiert und umfasst das Knowhow der Mitarbeiter, das sie durch individuelle Erfahrungen gesammelt haben. Der Zugriff auf implizites Wissen ist eine Herausforderung, mittels Expertenbefragungen kann jedoch der Zugriff auf dieses Wissen gelingen (NAGEL 2011).

### 4. Ermittlung neuer Risiken

Nur die Prüfung von bereits bekannten Risiken reicht für eine vollständige Risikoidentifikation nicht aus. Für die Ermittlung von bisher nicht erkannten, nicht dokumentierten oder völlig neuartigen Risiken bieten sich insbesondere Kreativitäts- und analytische Werkzeuge an (vgl. Abschnitt 2.3.5.3), die auf das implizit vorhandene Wissen der Mitarbeiter zugreifen. Im Bereich der Kreativitätswerkzeuge eignen sich dafür insbesondere das Brainstorming und die Delphi-Methode.

Die Brainstorming-Methode wird für die Ermittlung von neuen Risiken zunächst eingesetzt, da sie lediglich Systemkenntnis und -verständnis der Teilnehmer voraussetzt und noch keine spezifischen Daten oder Vorarbeiten benötigt (DAHMEN 2002).

Da die Delphi-Methode detaillierter und vor allem strukturierter vorgeht und auf bereits vorhandenes Datenmaterial angewiesen ist, wird sie erst nach dem Brainstorming durchgeführt (DAHMEN 2002, ROMEIKE 2003C). Die notwendige Expertenzahl kann im Rahmen der Risikoidentifikation mit zehn bis zwölf beziffert werden (CUHLS 2019). Kann diese Personenzahl nicht erreicht werden, kann auch ein fokussiertes Experteninterview zum Ziel führen, wobei zu beachten ist, dass in diesem Fall die Ergebnisgüte abnimmt.

Bei Bedarf kann im Anschluss an Brainstorming und Delphi-Methode mit den gewonnenen Daten eine Szenarioanalyse durchgeführt werden. Ziel ist es, vorab einschätzen zu können, wie sich die risikorelevanten Rahmenbedingungen entwickeln werden. Prinzipiell ist darauf zu achten, dass neu ermittelte Risiken in bereits bestehende Checklisten zu integrieren sind, um das vorhandene Wissen unterneh-

## 5.2 Identifikation von Risiken im Produktionssystem

mensweit nutzbar zu machen. Alle gesammelten Informationen münden im Risikokatalog bzw. den relevanten Bereichen des adaptierten RMEA-Formblatts (s. Abbildung 5-4).

RMEA-Formblatt							Nummer: 2 Seite: 1	
Typ/Modell: Prozess Umformen Presse			Sachnummer: M 750		Verantwortlich: Reuter		Erstellungsdatum: 17.03.2020	
Systemelement: Presse								
ID	Risiko-träger	Risikofaktor	Kennzahl	Relevanz	Auftreten	Ent-deckung	RPZ	Interdependenzen
RF <sub>1</sub>	Schicht-anzahl	Mitarbeiter	Mitarbeiter-anzahl	3	5	1	15	keine

### Legende

RPZ : Risikoprioritätszahl

RF<sub>i</sub> : Risikofaktor i

*Abbildung 5-4: Adaptiertes RMEA-Formblatt mit beispielhaftem Risikofaktor (in Anlehnung an ROMEIKE & HUTH 2016)*

Der graue Bereich ist für organisatorische Informationen vorgesehen. Danach folgen die Erläuterungen der Risikofaktoren. Die *ID* ermöglicht eine eindeutige Identifikation des Risikofaktors. Der *Risikoträger* gibt an, worauf der jeweilige Risikofaktor einen Einfluss hat (vgl. Abschnitt 5.2.2). Der *Risikofaktor* selbst wird in der zweiten Spalte festgehalten. Durch die Angabe der *Kennzahl* wird definiert, welche Kennzahl durch den Risikofaktor beeinflusst wird und somit zu messen ist. Die Bildung der *RPZ* erfolgt durch Angabe der Bedeutung des Risikofaktors für die betrachtete Zielgröße (*Relevanz*), der Häufigkeit des Eintritts (*Auftreten*) sowie der Wahrscheinlichkeit der Entdeckung des Risikos (*Entdeckung*) und ermöglicht eine erste Priorisierung der Risikofaktoren. Berechnet wird die *RPZ* gemäß Formel (5-1):

$$RPZ = Relevanz * Auftreten * Entdeckung \quad (5-1)$$

Das Maximum der *RPZ* beträgt 1000. Die *Relevanz*, das *Auftreten* und die *Entdeckungswahrscheinlichkeit* des Risikofaktors werden jeweils mit einem Wert zwischen eins und zehn beziffert. Dabei ist eins der niedrigste Wert und zehn der höchste. Bei der Bewertung der *Entdeckungswahrscheinlichkeit* ist die Bedeutung

der Werte umgekehrt. Hier steht der Wert eins für eine wahrscheinliche Entdeckung und der Wert zehn für eine eher unwahrscheinliche Entdeckung des Risikofaktors.

Falls bereits Informationen hinsichtlich der Wechselwirkungen mit anderen Risikofaktoren vorliegen, sind diese unter *Interdependenzen* festzuhalten. Nach der erfolgten Identifikation der Risiken wird die Modellierung der betrachteten Produktionssystemelemente erläutert.

### 5.3 Risikogerechtes Produktionssystemmodell für die Produktionsplanung

#### 5.3.1 Allgemeines

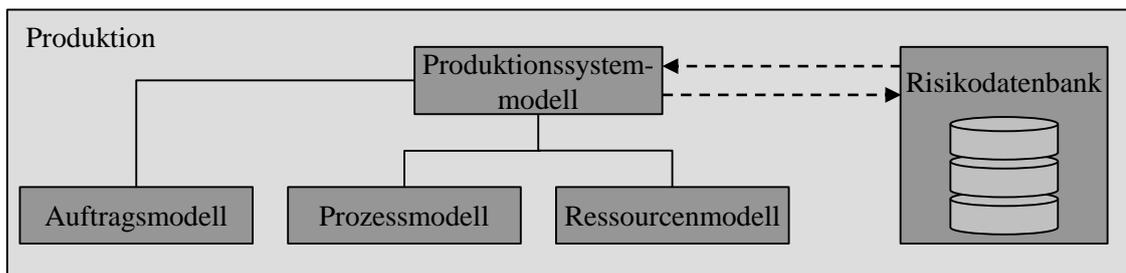
Als Grundlage für das zu entwickelnde System dient die Modellierung des während der Planungsphase betrachteten Produktionssystems. Die Modellierung macht die relevanten Stamm- und Bewegungsdaten für die risikoorientierte Produktionsplanung nutzbar. Eine Unterteilung der Produktionsfaktoren kann nach GUTENBERG (1963) in *Elementarfaktoren* und *dispositive Faktoren* vorgenommen werden. *Dispositive Faktoren*, wie etwa die Planung und Organisation, sind für diese Arbeit nicht weiter relevant. *Elementarfaktoren* können weiter in *Potential-* und *Repetierfaktoren* unterteilt werden. *Potentialfaktoren* sind solche, die während der Produktion nicht verbraucht werden wie bspw. Betriebsmittel. *Repetierfaktoren* sind Ausgangsmaterialien sowie Hilfsstoffe, die während der Produktion verbraucht bzw. umgewandelt werden. Dazu sind in der Arbeitsplanung organisatorische Abläufe, die technischen Fertigungsverfahren sowie die Betriebsmittel auftrags- und terminneutral festzulegen, um den späteren Produktionsprozess durchführen zu können. Das Ergebnis ist ein Arbeitsplan mit allen relevanten Informationen (WIENDAHL 2010). Eine Verknüpfung der Arbeitspläne mit Losgrößen und Terminen findet durch eine Konkretisierung des Produktionsprogramms im Rahmen der PPS statt.

Vor diesem Hintergrund müssen verschiedene Datenmodelle definiert werden, die alle benötigten Informationen für die Produktionsplanung berücksichtigen. Dabei ist die Berücksichtigung risikospezifischer Aspekte nach der Zielsetzung dieser Arbeit sicherzustellen. Insbesondere ist im Hinblick auf die Anforderung *Beschreibung des Risikoniveaus des Produktionssystems* (vgl. Abschnitt 4.2.3) zu gewährleisten, dass eine Speicherung der Risiken und relevanten Informationen in

### 5.3 Risikogerechtes Produktionssystemmodell für die Produktionsplanung

der Modellierung vorgesehen werden muss. Das zu entwickelnde Modell eines Produktionssystems muss also, basierend auf OSTGATHE (2012), folgende Elemente enthalten (s. Abbildung 5-5):

- *Prozessmodell*: Modellierung der ressourcenneutralen Prozessfolgen innerhalb des Produktionssystems (vgl. Abschnitt 5.3.2);
- *Ressourcenmodell*: Modellierung der Betriebsmittel eines Produktionssystems mit den technologischen Fähigkeiten sowie Abbildung der Informationen der Risikofaktoren (vgl. Abschnitt 5.3.3);
- *Produktionssystemmodell*: Modellierung der Verknüpfung der verschiedenen Ressourcen sowie der aggregierten Risikoträger auf Ebene des Produktionssystems (vgl. Abschnitt 5.3.4);
- *Auftragsmodell*: Modellierung von Produktionsaufträgen unter Einbeziehung der Risikosituation (vgl. Abschnitt 5.3.5);
- *Dynamische Risikodatenbank*: Speicherung der identifizierten Risikofaktoren sowie relevanter Informationen zur Risikopräferenz des Entscheidungsträgers (vgl. Abschnitt 6.7).



#### Legende

--> : Informationsaustausch

Abbildung 5-5: Elemente des Produktionssystemmodells

Für die Darstellung der Teilmodelle wird zur Sicherstellung einer informationstechnischen Weiterverarbeitbarkeit die Unified Modeling Language (UML) verwendet. Die UML-Notation ist eine in der Softwareentwicklung weitverbreitete objektorientierte Modellierungssprache (GADATSCH 2020). Mit der UML können Strukturen und (Geschäfts-)Prozesse abstrahiert dargestellt werden. Um der Anforderung eines möglichst breiten Einsatzfeldes gerecht zu werden, sind in der UML unterschiedliche Diagrammtypen definiert worden. Diese können prinzipiell in Struktur- und Verhaltensdiagramme unterteilt werden. Je nach Anwendungsfall und Einsatzzweck können die relevanten Diagrammtypen ausgewählt werden. Für die strukturellen Modelle (Auftrags-, Ressourcen- und Produktionssystemmodell)

wird das Klassendiagramm und für das dynamische Modell des Prozesses das Aktivitätsdiagramm verwendet (CZUCHRA 2010, RANDEN VAN ET AL. 2016). Zur Entwicklung des Ressourcen-, Produktionssystem- und Auftragsmodell werden bestehende Ansätze zur Modellierung um risikospezifische Elemente erweitert.

### 5.3.2 Prozessmodell

Das Prozessmodell veranschaulicht die Bearbeitungsschritte, die bei der Fertigung jedes Auftrags notwendig sind. Zur Darstellung der relevanten Prozessbereiche wird mittels Aktivitätsdiagrammen zumeist auf Aktionen, Aktivitätsknoten, Flüsse, Objektknoten und Kontrollknoten zurückgegriffen (CZUCHRA 2010, RUMPE 2011).

Basierend auf diesen Diagrammbausteinen kann die Prozessmodellierung für den jeweiligen Auftrag durchgeführt werden. Beispielhaft sei dazu die Fertigung eines einfachen Drehteils auf einer entsprechenden Bearbeitungsmaschine in Abbildung 5-6 dargestellt. Der Vorteil in der Prozessmodellierung besteht in der Neutralität der Beschreibung hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Die Verknüpfung mit den zu belegenden Ressourcen findet erst später in dem dafür vorgesehenen Produktionsplanungsschritt unter Einhaltung der Randbedingungen, wie etwa Risikoniveau oder Arbeitsvorrat des Werkzeugs, statt. Jedoch muss bereits bei der Prozessmodellierung jeder mögliche Bearbeitungsschritt, der durch eine bestimmte Ressourcennutzung notwendig wird, berücksichtigt werden.

In dem dargestellten Prozess ist erkennbar, dass das Aktivitätsdiagramm eine prozess- und anwendungsspezifische Detaillierung zulässt. So ist im oberen Bereich auf einem abstrakten Niveau die Bearbeitung von Rohmaterial dargestellt. Im unteren Bereich ist der Prozess Drehen detailliert beschrieben. Diese Flexibilität erlaubt es, nur die Prozesse detailliert zu beschreiben, die für den vorgesehenen Anwendungszweck, in diesem Fall die Produktionsplanung, relevant sind. Das führt dazu, dass der Modellierungsaufwand so gering wie möglich gehalten wird (KLÖBER-KOCH ET AL. 2017B).

## 5.3 Risikogerechtes Produktionssystemmodell für die Produktionsplanung

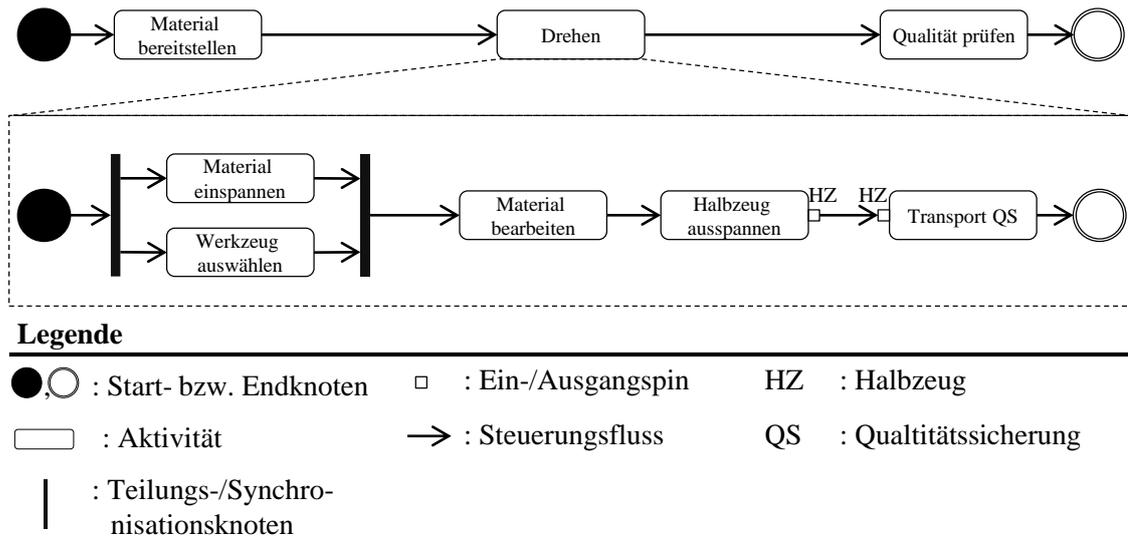


Abbildung 5-6: Beispielhaftes Prozessmodell in UML-Notation

### 5.3.3 Ressourcenmodell

Das Ressourcenmodell dient zur Beschreibung der Fähigkeiten der Ressource sowie des aktuellen Zustands des jeweiligen Betriebsmittels. Zum aktuellen Zustand des Betriebsmittels sind neben Informationen wie der Auslastung oder der aktuellen Konfiguration insbesondere Risiken zu zählen, die dieser Ressource zugeordnet werden können. In Anlehnung an das Ressourcenmodell von OSTGATHE (2012) wird somit eine Unterteilung in *Organisatorische Informationen*, *Betriebsmittelfähigkeit*, *Umgebungseinflüsse* und *Wirtschaftlichkeit* vorgenommen (s. Abbildung 5-7).

*Organisatorische Informationen* umfassen zusätzliche Informationen zum einzelnen Betriebsmittel wie etwa die Identifikationsnummer oder auch den Typ der Maschine. Die *Betriebsmittelfähigkeit* enthält Details zu den technischen und organisatorischen Restriktionen eines Betriebsmittels. *Umgebungseinflüsse* charakterisieren die Rahmenbedingungen für den Einsatz eines Betriebsmittels und können bspw. Informationen zum Energieverbrauch enthalten. Informationen zur *Wirtschaftlichkeit* beinhalten kalkulatorisch relevante Informationen wie bspw. Maschinenstundensätze oder Anschaffungskosten.

*Betriebsmittelfähigkeiten* müssen noch weiter spezifiziert werden, um eine Anwendbarkeit im Rahmen der Produktionsplanung sicherstellen zu können. Es werden dazu *risikospezifische Informationen* festgehalten, die durch kontinuierliche Aktualisierung mit Hilfe der Risikodatenbank detailliert werden. Hinzu kommen *technische Informationen* sowie die *Verfahrensart*.

## 5 Risikogerechte Systemmodellierung

Gemäß dem Betrachtungsschwerpunkt dieser Arbeit fassen risikospezifische Informationen *risikoorganisatorische Informationen* zusammen, bspw. wie viele unterschiedliche Risikofaktoren auftreten und wie viele unterschiedliche Risikoträger dadurch betroffen sein können. Die *Eintrittswahrscheinlichkeiten* für Risikofaktoren sind dort genauso hinterlegt wie das mögliche *Schadensausmaß*, das durch den Eintritt eines Risikofaktors hervorgerufen werden kann.

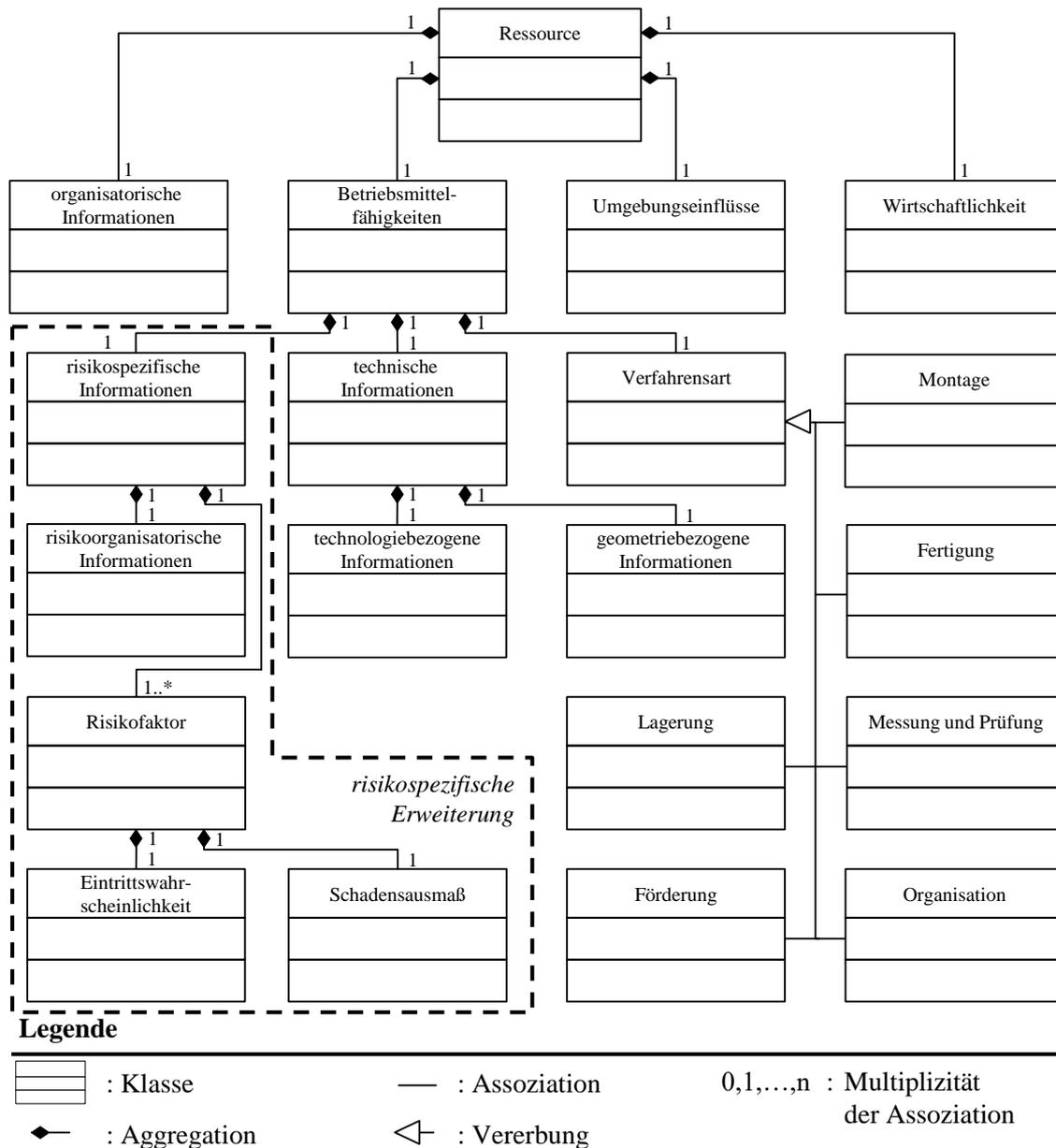


Abbildung 5-7: Ressourcenmodell in UML-Notation  
(in Anlehnung an OSTGATHE 2012)

### 5.3 Risikogerechtes Produktionssystemmodell für die Produktionsplanung

*Technische Informationen* können in Anlehnung an KNOCHÉ (2005) und MORYSON (2004) weiterhin in *technologiebezogene* und *geometriebezogene* Informationen unterteilt werden. *Technologiebezogene* Informationen enthalten bspw. Leistungskennwerte der Ressource oder auch eine Spezifikation der Werkstoffe, die bearbeitet werden können. *Geometriebezogene* Informationen detaillieren etwa den zur Verfügung stehende Arbeitsraum eines Betriebsmittels. Diese Ressourcenstammdaten sind notwendig, um eine Zuordnung von Produkten zu Ressourcen zu ermöglichen. Die *Verfahrensart* einer Ressource kann in Anlehnung an VDI 2815-1 nach *Fertigung, Montage, Lagerung, Förderung, Messung und Prüfung* oder *Organisation* unterschieden werden.

#### 5.3.4 Produktionssystemmodell

Das Produktionssystemmodell enthält strukturelle Informationen über den betrachteten Produktionsbereich. In Anlehnung an MÜLLER ET AL. (2013) enthält das Produktionssystemmodell die vorhandenen *Ressourcen*, Informationen zu den *Werkstoffen* sowie Details hinsichtlich des *Risikoniveaus*. Das Modell kann Abbildung 5-8 entnommen werden.

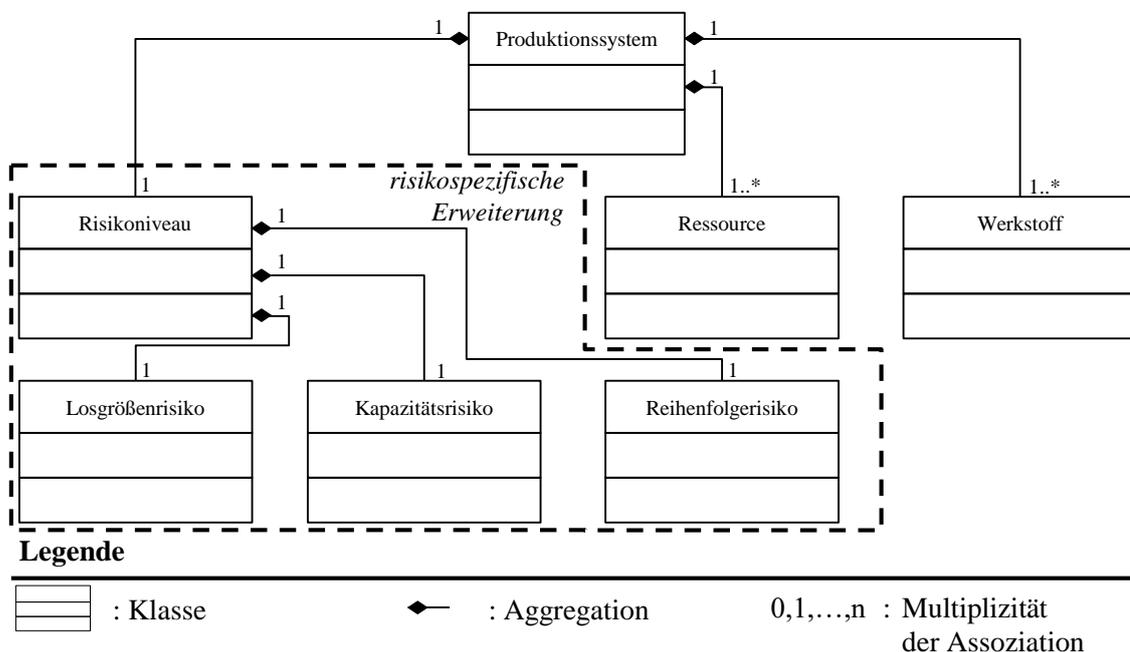


Abbildung 5-8: Produktionssystemmodell in UML-Notation (in Anlehnung an OSTGATHE 2012)

Das *Produktionssystemmodell* enthält zur Berücksichtigung des risikospezifischen Schwerpunkts insbesondere Informationen zum aktuellen *Risikoniveau*. Das Risikoniveau detailliert die in einem Produktionssystem vorhandenen möglichen Auswirkungen der Risikofaktoren auf die verschiedenen Risikoträger. Dazu ist eine weitere Unterscheidung in die drei für diese Arbeit relevanten Kategorien von Risiken vorzunehmen. In den Kategorien *Losgrößenrisiko*, *Kapazitätsrisiko* und *Reihenfolgerisiko* sind Daten enthalten, die die Auswirkungen der aggregierten Risiken einer Ressource auf das gesamte Produktionssystem beschreiben. Dazu werden die Risiken in diesem Bereich unter Berücksichtigung charakteristischer Wirkweisen (vgl. Abschnitt 5.2.2) auf einen einzelnen Wert aggregiert.

Weiterhin enthält das Produktionssystemmodell alle im betrachteten Bereich enthaltenen *Ressourcen*. Für eine Detaillierung des Ressourcenmodells sei auf den vorangehenden Abschnitt 5.3.3 verwiesen. Zusätzlich sind im Produktionssystemmodell alle *Werkstoffe* abgebildet, die durch die enthaltenen Ressourcen verarbeitet werden können. Gemäß der Einteilung von GUTENBERG (1963) sind hierunter alle Repetierfaktoren zu verstehen, mithin solche Materialien, die während der Produktion verbraucht bzw. umgewandelt werden.

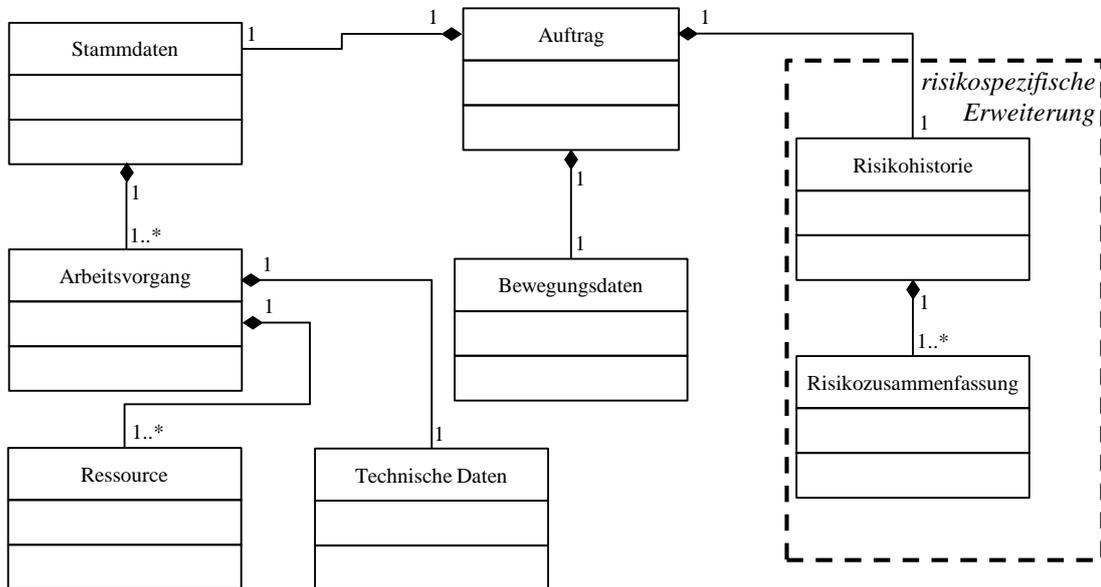
### 5.3.5 Auftragsmodell

Im *Auftragsmodell* werden verschiedene Plan- und Ist-Daten des Auftrags verwaltet (s. Abbildung 5-9). Es enthält Informationen über den spezifischen risikoabhängigen Fertigungshergang des Produktes, was eine zentrale Voraussetzung für die operative Produktionsplanung unter Beachtung der Risikopräferenz darstellt. Während der Produktion werden in diesem Modell risikorelevante Informationen abgelegt, sodass ein ganzheitliches Bild der auftragsspezifischen Risiken entsteht. Nach der Fertigstellung des Auftrags erfolgt eine Speicherung spezifischer Informationen in der Risikodatenbank, sodass eine kontinuierliche Aktualisierung dieses zentralen Informationssystems sichergestellt werden kann.

In Anlehnung an LOOS (1999) werden *Stammdaten* und *Bewegungsdaten* des Auftrags unterschieden. *Stammdaten* sind solche Daten eines Auftrags, die im Rahmen der Fertigung keinen häufigen Änderungen bzw. Aktualisierungen unterworfen sind. Dazu können etwa die Prozessreihenfolge, die Produktnummer oder der Name des Produkts gezählt werden. In der Stammdaten-Klasse *Ressource* wird eine Zuordnung des Arbeitsvorgangs zu möglichen Ressourcen vorgenommen. Damit ist eine Verbindung zum Ressourcenmodell hergestellt. *Technische Daten* konkretisieren geometrische Randbedingungen des Produkts wie bspw. die Form

### 5.3 Risikogerechtes Produktionssystemmodell für die Produktionsplanung

oder auch die Abmaße. Dazu kommen technologische Randbedingungen, welche den bei der Herstellung zu verwendenden Werkstoff und die geforderte Oberflächenrauigkeit beinhalten.



#### Legende

	: Klasse		: Aggregation	0,1,...,n	: Multiplizität der Assoziation
--	----------	--	---------------	-----------	---------------------------------

Abbildung 5-9: Auftragsmodell in UML-Notation (in Anlehnung an OSTGATHE 2012)

*Bewegungsdaten* wiederum sind durch eine höhere Änderungshäufigkeit gekennzeichnet. Dazu zählen im Rahmen des Auftragsmodells alle Informationen welche bei der Generierung des Produktionsauftrags angepasst werden. Solche Informationen sind bspw. der Liefertermin, der Kunde oder auch die geplante Durchlaufzeit eines Auftrags.

Das Auftragsmodell lässt sich um risikorelevante Informationen erweitern. Die *Risikohistorie* des Auftrags beschreibt die aus der Vergangenheit bereits durchgeführten Aufträge dieses Typs und die dabei vorherrschenden risikorelevanten Parameter. Risikorelevante Parameter sind die des jeweiligen Auftrags bestimmenden Risikokategorien. In der *Risikozusammenfassung* ist für jede Risikokategorie ein Überblick zu bereits früher aufgetretenen Risiken festgehalten.

### 5.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde ein Vorgehen zur Identifikation von Risiken in Produktionssystemen entwickelt. Mit der Modellierung des Produktionssystems wurde die informationstechnische Grundlage für das System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz gelegt. Für die Identifikation der Risiken war die Strukturierung der Wirkung von Risiken eine Voraussetzung. Im Rahmen der risikogerechten Produktionssystemmodellierung für die Produktionsplanung wurde aufgrund der dargestellten Vorüberlegungen ein Ansatz bestehend aus vier Teilmodellen gewählt, der eine ganzheitliche Abbildung aller für die Planung relevanten Informationen ermöglicht. Nach Beschreibung des Prozessmodells wurden Ressourcen-, Produktionssystem- und Auftragsmodell jeweils aus bestehenden Ansätzen zur Modellierung abgeleitet und um risikospezifische Aspekte ergänzt.

Der erarbeitete Modellierungsansatz muss als nächstes mit den relevanten Informationen zur Analyse von Risiken angereichert werden (vgl. Kapitel 6). Anschließend können die mit den aktuellen Informationen angereicherten Modelle für die Produktionsplanung verwendet werden.

## 6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken

### 6.1 Übersicht

Das vorliegende Kapitel stellt das Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken dar. Dieser Analyse kommt eine zentrale Bedeutung im Rahmen des Risikomanagements zu, da durch eine richtige Quantifizierung der Risiken langfristig Wettbewerbsvorteile für das Unternehmen erzielt werden können. Für die Analyse müssen die Risikofaktoren mathematisch modelliert und ihr Schadensausmaß definiert werden. Zu Beginn des Kapitels wird auf die Modellierung der Risikofaktoren (vgl. Abschnitt 6.2) eingegangen. Im Anschluss daran wird ein Ansatz vorgestellt, wie Risikofaktoren und deren Wirkung auf die Risikoträger quantifiziert werden können (vgl. Abschnitt 6.3). Dazu zählt einerseits die Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Risiken sowie die Bestimmung des Schadensausmaßes. Nach einer Quantifizierung der einzelnen Risiken ist eine Kategorisierung (vgl. Abschnitt 6.4) notwendig, sodass mögliche Abhängigkeiten bestimmt werden können (vgl. Abschnitt 6.5) und anschließend eine Aggregation der Risiken vorgenommen werden kann (vgl. Abschnitt 6.6). Diese Aggregation ist erforderlich, um in der Produktionsplanung eine Risikokennzahl zur Verfügung zu haben, die zu berücksichtigen ist und auf Basis welcher die Produktionsplanung durchzuführen ist. Anschließend wird der Aufbau der Risikodatenbank dargestellt (vgl. Abschnitt 6.7).

### 6.2 Modellierung von Risikofaktoren

Nachdem die Risikofaktoren identifiziert wurden (vgl. Abschnitt 5.2), erfolgt in diesem Abschnitt die Modellierung des Verhaltens der Faktoren über die Zeit. Um die Risikofaktoren während der Produktionsplanung berücksichtigen zu können, ist eine mathematische Repräsentation der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Risikofaktoren unerlässlich.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit  $P$  eines bestimmten Ergebnisses, also die Realisierung  $x_i$  einer Zufallsvariable  $X$ , kann mittels der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $f(x_i)$  angegeben werden. Es gilt somit der Zusammenhang wie in Formel (6-1) dargestellt (MUN 2010, WERMUTH 2014, FAHRMEIR ET AL. 2016):

## 6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken

---

$$f(x_i) = P(X = x_i) \quad (6-1)$$

mit  $x_i$  Wert der Zufallsgröße  $X$   
 $X$  Zufallsgröße  $X$   
 $P$  Wahrscheinlichkeit für  $x_i$  von  $X$

Die zugehörige Verteilungsfunktion  $F(x)$  einer Zufallsgröße  $X$  gibt wiederum die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Zufallsgröße Werte annimmt, die kleiner oder gleich dem Wert  $x$  sind. Bei diskreten Zufallsgrößen gilt somit der in Formel (6-2) dargestellte Zusammenhang (MUN 2010, WERMUTH 2014, FAHRMEIR ET AL. 2016):

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} f(x_i) \quad (6-2)$$

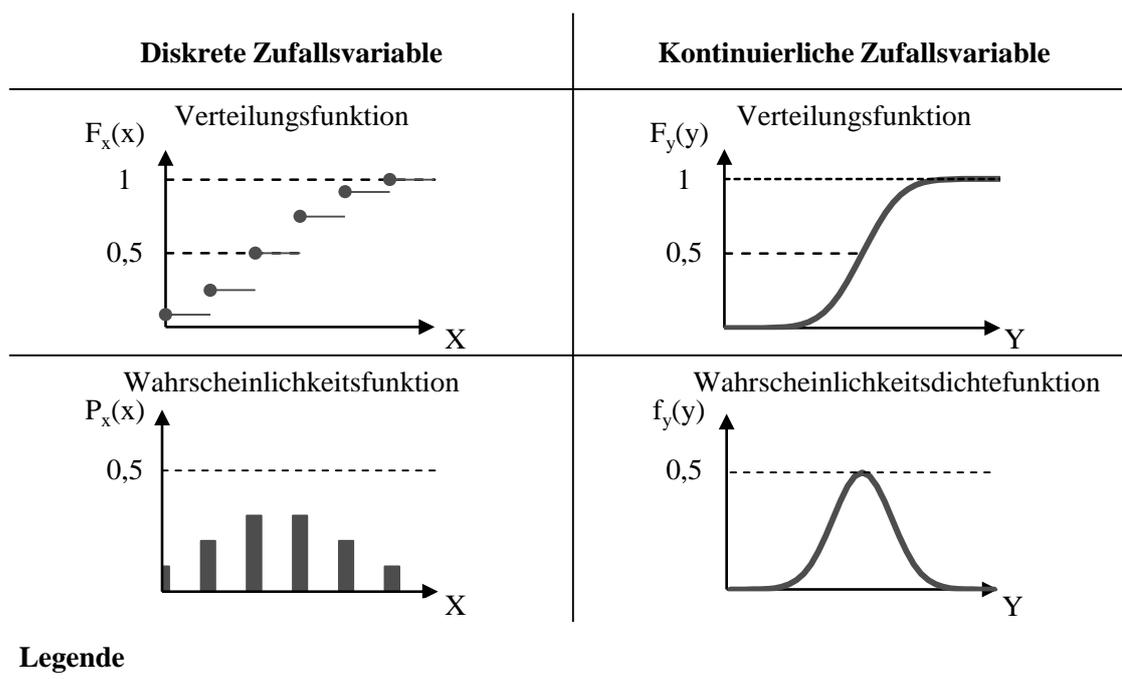
mit  $F$  Verteilungsfunktion der Zufallsgröße  $X$

Einen Unterschied gibt es bei *stetigen* und *diskreten* Zufallsgrößen. *Diskrete* Zufallsgrößen können nur eine endliche Anzahl abzählbarer Werte annehmen, oft sind das ganze Zahlen. Beispielhaft hierfür sei der Wurf eines Würfels genannt. Die Ergebnisse eines Wurfs sind natürliche Zahlen zwischen eins und sechs. Bei *stetigen* Zufallszahlen hingegen ist die Menge der Zufallsgrößen nicht mehr abzählbar, die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion lautet daher gemäß Formel (6-3) (MUN 2010, WERMUTH 2014, FAHRMEIR ET AL. 2016):

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \quad (6-3)$$

In Abbildung 6-1 ist dieser Zusammenhang zwischen Verteilungs- und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zur Verdeutlichung grafisch dargestellt.

Der mögliche Eintritt von Risikofaktoren kann mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt werden, wobei für unterschiedliche Risiken eine Vielzahl unterschiedlicher Verteilungen zur Verfügung stehen. Diskrete Verteilungen sind bspw. die Poisson-Verteilung oder die Binomialverteilung, kontinuierliche Verteilungen sind etwa die Beta-, die Gamma-, die Lognorm-, die Normal- oder die Erlangverteilung (WERMUTH 2014). Für Details zu diesen Verteilungen sei auf entsprechende Literatur wie etwa RUGE ET AL. (2014), WERMUTH (2014) oder HÄRTLER (2016) verwiesen.



**Legende**

X, Y : Zufallsvariablen

*Abbildung 6-1: Wahrscheinlichkeiten einer diskreten und einer kontinuierlichen Zufallsvariablen ausgedrückt durch die Verteilungsfunktionen sowie Wahrscheinlichkeits(dichte)funktionen (in Anlehnung an WEIG 2008)*

Zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeiten existieren charakteristische Kenngrößen. Im Rahmen der Arbeit sind vor allem die Kenngrößen *Erwartungswert*, *Varianz* und *Standardabweichung* sowie die Verteilungs- und Wahrscheinlichkeitsfunktion einer Zufallsgröße relevant. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

**Erwartungswert**

Der Erwartungswert  $\mu = E(X)$  einer Funktion  $g(X) = X$  einer diskreten oder stetigen Zufallsgröße  $X$  ist gemäß Formel (6-4) definiert (MUN 2010, WERMUTH 2014, FAHRMEIR ET AL. 2016). Dabei gilt die Annahme, dass die Summe bzw. das Integral absolut konvergiert.

## 6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken

---

$$\begin{aligned}\mu = E(X) &= \sum_i x_i * f(x_i) \quad \text{bzw.} \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x * f(x) dx\end{aligned}\tag{6-4}$$

mit  $x_i$  Wert der Zufallsgröße  $X$   
 $X$  diskrete oder stetige Zufallsgröße  $X$

### Varianz und Standardabweichung

Die Varianz einer diskreten bzw. stetigen Zufallsgröße  $X$  ist der Erwartungswert des Quadrates der Abweichung vom Mittelwert  $\mu$  und berechnet sich gemäß Formel (6-5) (MUN 2010, WERMUTH 2014, FAHRMEIR ET AL. 2016):

$$\begin{aligned}\sigma^2 = Var(X) &= E[(X - \mu)^2] = \\ &= \sum_i (x_i - \mu)^2 * f(x_i) = \sum_i x_i^2 * f(x_i) - \mu^2 \quad \text{bzw.} \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx - \mu^2\end{aligned}\tag{6-5}$$

mit  $x_i$  Wert der Zufallsgröße  $X$   
 $X$  Zufallsgröße  
 $\mu$  Mittelwert

Die Quadratwurzel aus der Varianz heißt Standardabweichung und berechnet sich somit gemäß Formel (6-6) (MUN 2010, WERMUTH 2014, FAHRMEIR ET AL. 2016):

$$\sigma = \sqrt{Var(X)}\tag{6-6}$$

mit  $\sigma$  Standardabweichung  
 $X$  Zufallsgröße

Diese Kenngrößen spielen in der Produktionsplanung eine Rolle. Sie werden insbesondere bei der Auswahl der Werte für die Risikoträger verwendet (vgl. Abschnitt 8.4). Die Parametrisierung der Randbedingungen für die Planung wird dann von der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers beeinflusst. Weiterhin sind diese Werte bei der Analyse des Risikos und der Einordnung der aktuell in der

Produktion vorherrschenden Risikolage von Bedeutung. Nachfolgend wird erläutert, wie die vorgestellte Modellierung verwendet wird, um Risikofaktoren zu quantifizieren.

### 6.3 Quantifizierung der Risikofaktoren

#### 6.3.1 Allgemeines

Die Quantifizierung der Risiken bestimmt einerseits die Definition der Eintrittswahrscheinlichkeit des betrachteten Risikos. Andererseits wird während der Risikoquantifizierung das mögliche Ausmaß der negativen Zielgrößenbeeinflussung durch die Realisation des Risikos bestimmt.

Die Werte dieser das Risiko charakterisierenden Größen sind in Vorbereitung auf den jeweiligen Planungsdurchlauf zu überprüfen. Vor jeder neuen Generierung des Produktionsplans muss somit die Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikos sowie dessen Schadensausmaß überprüft und eventuell neu berechnet werden.

#### 6.3.2 Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Risikofaktoren

Die Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeit erfolgt über die Ermittlung der Parameter der mathematischen Verteilung des betrachteten Risikofaktors. Ist ein Risikofaktor in einem System noch nicht eingetreten, so ist auf eine Schätzung von Experten durch die Program-Evaluation-and-Review-Technique (PERT)-Schätzung (auch 3-Punkt-Schätzung) bezüglich dieses Risikofaktors zurückzugreifen. Diese wird häufig zum Einschätzen von Unsicherheiten verwendet (MARCO 2018). Die 3-Punkt-Schätzung erlaubt die Angabe der charakteristischen Werte eines Risikofaktors durch Konstruktion einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion auf Basis der Expertenschätzungen. Die Experten schätzen dafür drei unterschiedliche Werte. Den Wert  $a$  für den Fall einer positiven Entwicklung des Risikofaktors, den Wert  $m$  des Risikofaktors mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit sowie den Wert  $b$  für eine pessimistische Entwicklung des Risikofaktors. Diese drei Werte werden verwendet, um eine Beta-Verteilung abzuleiten. Der Erwartungswert der Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikofaktors wird dann über Formel (6-7) bestimmt (MARCO 2018):

## 6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken

---

$$E(x) = \frac{(a + 4m + b)}{6} \quad (6-7)$$

- mit  $E(x)$  Erwartungswert der Zufallsgröße  $x$
- $a$  Wert des Risikofaktors bei positiver Entwicklung
- $b$  Wert des Risikofaktors mit größter Eintrittswahrscheinlichkeit
- $m$  Wert des Risikofaktors bei negativer Entwicklung

Die Standardabweichung des mittels PERT-Schätzung abgeschätzten Risikofaktors wird gemäß Formel (6-8) berechnet (MARCO 2018):

$$S(x) = \frac{(b - a)}{6} \quad (6-8)$$

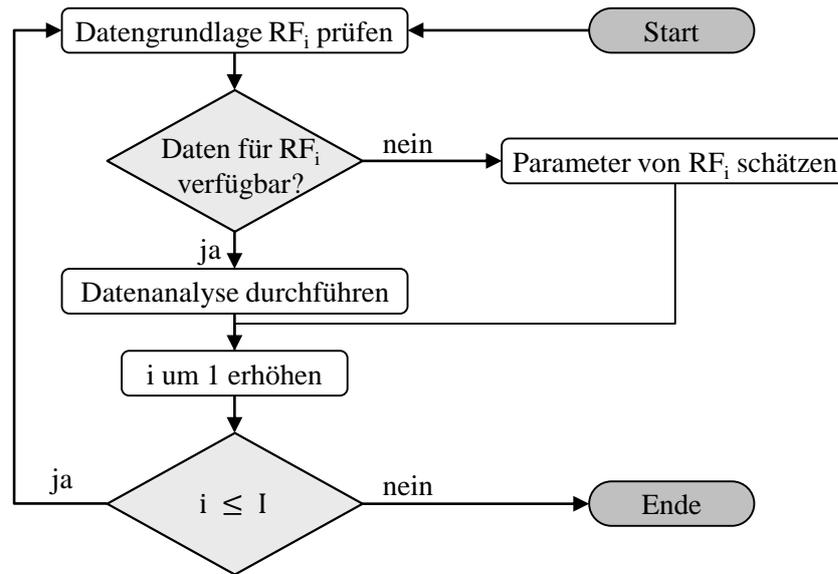
- mit  $S$  Standardabweichung der Zufallsgröße  $x$

Die Varianz lässt sich mithilfe von Formel (6-9) bestimmen (MARCO 2018):

$$V(x) = S(x)^2 = \left(\frac{(b - a)}{6}\right)^2 \quad (6-9)$$

- mit  $V$  Varianz der Zufallsgröße  $x$

Sind Daten über das Auftreten des Risikofaktors bereits vorhanden, so sind diese mit geeigneten statistischen Verfahren auszuwerten und die relevanten Größen für den jeweiligen Risikofaktor festzuhalten. Der Betrachtungszeitraum, aus welchem die Daten verwendet werden, ist unter Berücksichtigung des Planungszeitraums der operativen Produktionsplanung des jeweiligen Unternehmens individuell festzulegen. Sollte der initial gewählte Zeitraum nicht groß genug sein, da die vorliegenden Daten noch keine Aussage zur Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikofaktors zulassen, ist dieser Zeitraum situationsspezifisch zu vergrößern. Diese Daten werden aus den betrieblichen Datenerfassungssystemen (MDE-/BDE-Systeme) oder aus übergeordneten Informationssystemen (z.B. Enterprise Resource Planning (ERP) oder Manufacturing Execution Systeme (MES)) extrahiert. Diese statistischen Daten zu einzelnen Risikofaktoren, bspw. die Anzahl der Ausfälle einer Resource in einem bestimmten Zeitraum, können dann mit Approximationsverfahren in mathematische Funktionen (vgl. Abschnitt 6.2) transformiert werden. Für eine Übersicht der relevanten Verfahren sei beispielhaft auf BERTSCHE & LECHNER (2004), ENGEL (2010) oder FAHRMEIR ET AL. (2016) verwiesen. Der prinzipielle Ablauf des Vorgehens zur Bestimmung der mathematischen Parameter der Eintrittswahrscheinlichkeit ist in Abbildung 6-2 dargestellt.



### Legende

$RF_i$  : Risikofaktor  $i$

$I$  : Anzahl der identifizierten Risikofaktoren

Abbildung 6-2: Ablauf der Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikofaktors

Ist die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikofaktors definiert, muss für die Risikoanalyse die Bestimmung des Schadensausmaß erfolgen. Das Vorgehen dafür wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

### 6.3.3 Bestimmung des Schadensausmaßes der Risikofaktoren

Die Bestimmung des Schadensausmaßes der Risiken erfolgt über die Risikoträger des betrachteten Risikofaktors sowie die daraus resultierende Risikoauswirkung (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Die Zuordnung der Risikofaktoren zu Risikoträgern erfolgt bereits im Rahmen der Risikoidentifikation. Diese Zuordnung ist zur Bestimmung des Schadensausmaßes um einen quantitativen Faktor zu erweitern. Die von jedem Risikofaktor ausgehenden Auswirkungen auf den Risikoträger sind vor der Planungsdurchführung zu bestimmen. Dazu wird den möglichen Ausprägungen der Eintrittswahrscheinlichkeiten des Risikofaktors das mögliche Schadensausmaß in Form einer Auswirkung auf die Risikoträger gegenübergestellt. Dazu sind die maximalen bzw. minimalen Auswirkungen des betrachteten Risikofaktors auf den jeweiligen Risikoträger abzuschätzen. Eine Abschätzung der Auswirkungen durch Experten ist in diesem

## 6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken

Fall einer detaillierten Analyse vorzuziehen. Mit der Expertenschätzung kann eine ausreichende Genauigkeit der Schadensbestimmung bei vergleichsweise geringem Aufwand realisiert werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikofaktors, Mitarbeiterzahl, sowie dessen Wirkung auf den Risikoträger Losgröße kann beispielhaft der folgenden Abbildung 6-3 entnommen werden.

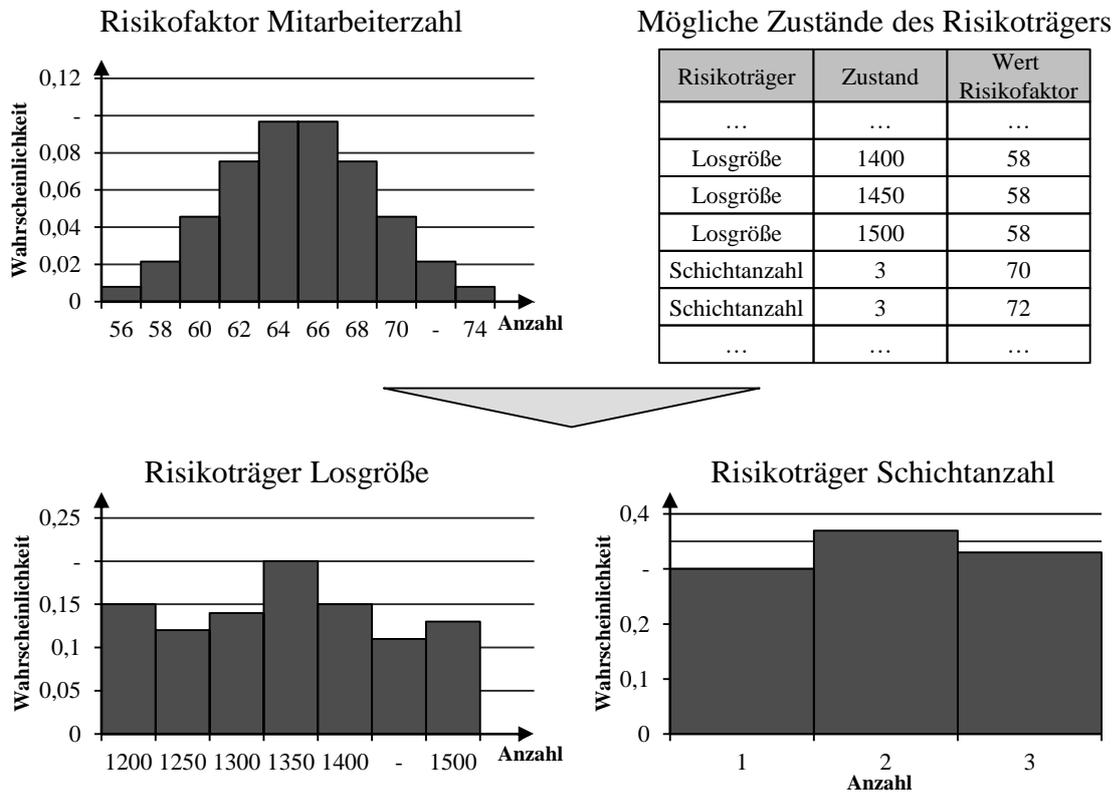


Abbildung 6-3: Schadensausmaßbestimmung eines Risikofaktors auf die Risikoträger der Produktionsplanung

In der dargestellten Abbildung kann die Mitarbeiterzahl schwanken. Dies spiegelt sich in dem Risikofaktor Mitarbeiterzahl wider. Der angenommene Planwert für die Mitarbeiterzahl ist 64. Im Falle von nur 58 anwesenden Mitarbeitern steht nicht die gesamte eingeplante Kapazität zur Verfügung, da einzelne Maschinen aufgrund der geringen Mitarbeiteranzahl nicht wie geplant bedient werden können. Andererseits hat die positive Abweichung der Mitarbeiterzahl, bspw. 72, einen Zuwachs an Kapazität zur Folge. Dadurch können zusätzliche Arbeiten durchgeführt oder Prozesszeiten verkürzt werden. Der Risikofaktor Mitarbeiterzahl wirkt sich somit auf die Risikoträger Losgröße und Schichtanzahl aus. Sind nicht genügend Mitarbeiter anwesend, wird es notwendig, größere Losgrößen eines Auftrags auf einer Ressource zu fertigen, da nicht genügend Personal für häufige Rüstwechsel

zur Verfügung steht. Entsprechend häufiger kann gerüstet werden, wenn mehr Personal zur Verfügung steht als vorgesehen. Auf den Risikoträger Schichtanzahl hat der Risikofaktor Mitarbeiterzahl ebenso Einfluss. Die Anzahl der Schichten wird durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Mitarbeiter beeinflusst. Sollte diese vom ursprünglichen Planwert abweichen, ist bei einer ausreichend großen negativen Abweichung der Mitarbeiterzahl eine Reduktion der Schichtanzahl notwendig. Ebenso ist es möglich, dass mehr Mitarbeiter zur Verfügung stehen als eingeplant, wodurch grundsätzlich eine Erhöhung der Schichtanzahl möglich wird.

Ausgehend von der Zuordnung des Schadensausmaßes und den Dichte- bzw. Verteilungsfunktionen kann gemäß WEIG (2008) die Auswirkung eines einzelnen Risikofaktors auf die Risikoträger quantifiziert werden. Dazu sind die relevanten Größen neben den Funktionen vor allem der Erwartungswert sowie die Varianz des Risikofaktors. Dies wird im Weiteren am Beispiel des Risikoträgers Bearbeitungszeit gezeigt. Für diesen Träger ergibt sich beispielhaft die in Abbildung 6-4 links dargestellte Wahrscheinlichkeitsfunktion sowie daraus abgeleitet rechts die Visualisierung des Schadensausmaßes. Das Schadensausmaß ist somit das Risiko für eine verfrühte bzw. verspätete Fertigstellung des Auftrags. Dieser Fertigstellungszeitpunkt hat direkten Einfluss auf die Termintreue, welche eine der Zielgrößen in der Produktionsplanung darstellt.

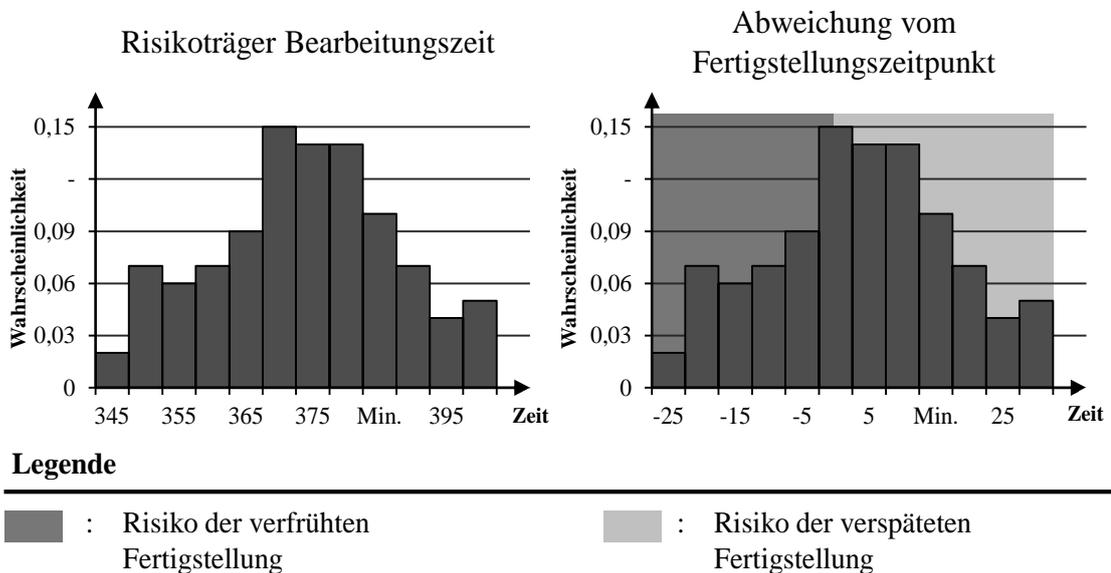


Abbildung 6-4: Visualisierung des auf einem Risikofaktor beruhenden Risikos

Der dargestellte Zusammenhang ist Grundlage für die noch ausstehende Bewertung des Risikos und dessen Handhabung im Rahmen der operativen Produktionsplanung. Da Risikofaktoren in der Produktion auf unterschiedliche Risikoträger

wirken können müssen die noch kategorisiert werden. Diese Kategorisierung wird im folgenden Abschnitt dargestellt und dient als Vorbereitung der Aggregation der Risikofaktoren.

### 6.4 Kategorisierung von Produktionsrisiken

Die Kategorisierung der Risiken ermöglicht eine spätere Aggregation der Risikofaktoren und kann anhand unterschiedlicher Kriterien durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.3.3). Basierend auf der Kategorisierung der Produktionsrisiken von HÄRTERICH (1987) wird im Rahmen dieser Arbeit eine Kategorisierung der Risikofaktoren hinsichtlich ihrer Wirkung vorgenommen. Zur späteren einfacheren Handhabung der Risiken während der Produktionsplanung wird eine an den Aufgaben der betrachteten Produktionsplanungsphasen orientierte Einteilung als zielführend erachtet. Somit erfolgt eine Einteilung in *Losgrößen-*, *Kapazitäts-* und *Reihenfolgerisiken* (s. Abbildung 6-5).

*Losgrößenrisiken* sind solche Risiken, die sich auf die Losgrößenbestimmung auswirken und somit im Rahmen der Losgrößenplanung zu berücksichtigen sind. Risikoträger, die sich auf die Losgröße auswirken sind stark schwankende Rüstzeiten oder die Verfügbarkeit von Ausgangsmaterialien.

*Kapazitätsrisiken* können als solche Risiken verstanden werden, die einen Einfluss auf die Planungsparameter der Kapazitätsplanung besitzen. Dazu zählt auf Seiten der Betriebsmittel bspw. die Wartung von Maschinen, durch die sich das Kapazitätsangebot deutlich reduzieren kann. Ein weiterer Risikofaktor kann auch die Personalverfügbarkeit sein, die aufgrund von Urlaub oder Krankheit das Kapazitätsangebot ebenfalls negativ beeinflusst. Auf Seiten der Kapazitätsnachfrage sind Unsicherheiten hinsichtlich der Abnahmemenge der Produkte zu berücksichtigen. So können etwa saisonale Schwankungen in der Nachfrage zu stark unterschiedlichem Kapazitätsbedarf führen (LÖDDING 2016).

Ebenfalls zu berücksichtigen in der Produktionsplanung sind *Reihenfolgerisiken*. Darunter sind solche Risiken zu verstehen, deren Eintritt eine Auswirkung auf die Reihenfolge der geplanten Aufträge hat. So kann bspw. die Abweichung der geplanten Bearbeitungszeit eines Auftrags aufgrund des möglichen Ausfalls einer Maschine als ein Risikoträger dieser Kategorie verstanden werden.

Risikokategorie	Risikoträger	Risikofaktoren
Losgrößenrisiko	Losgröße	Rüstdauer, Materialverfügbarkeit
Kapazitätsrisiko	Schichtanzahl	Mitarbeiterzahl, Ressourcenzahl
Reihenfolgerisiko	Bearbeitungszeit	Werkzeuganzahl, Störungsdauer

Abbildung 6-5: Kategorisierung von Risiken für die Produktionsplanung

Die Kategorisierung der Risiken basiert auf der in der Phase der Risikoidentifikation durchgeführten Zuordnung der Risikofaktoren zu den Risikoträgern der Produktionsplanung (vgl. Abschnitt 5.2.3). Die dargestellte Risikokategorisierung erlaubt eine zielführende Darstellung der Abhängigkeiten der Risikofaktoren sowie eine Risikoaggregation, welche in den folgenden beiden Abschnitten 6.5 und 6.6 dargestellt wird.

### 6.5 Abhängigkeiten der Risikofaktoren

Die Abbildung der Abhängigkeiten zwischen Risikofaktoren ist Voraussetzung für deren Zusammenfassung und die Quantifizierung der Auswirkungen auf die Risikoträger der Produktionsplanung. In der Statistik wird zur Abbildung von Abhängigkeiten die Korrelation zwischen zwei Größen angegeben. Sie ist ein Maß dafür, wie stark der Zusammenhang zwischen zwei Größen, bspw. Zufallsgrößen, ist.

Am weitesten verbreitet zur Bestimmung von Korrelationen von Zufallsvariablen sind der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient sowie der Kendall'sche Rangkorrelationskoeffizient. Rangkorrelationskoeffizienten geben nicht die Korrelation zwischen den einzelnen Zufallsvariablen, sondern die ihrer Ränge wieder. Den Rang einer Zufallszahl bestimmt man durch die Zuweisung der Platzzahl bei größenmäßiger Anordnung. Sind  $x_1 \leq \dots \leq x_n$  die geordneten Zufallszahlen, so gilt gemäß Formel (6-10) (FAHRMEIR ET AL. 2016):

$$rg(x_i) = i \tag{6-10}$$

mit  $x_i$  Wert der Zufallsgröße  $X$   
 $rg(x_i)$  Rang des Fallswerts  $x_i$

Es ist möglich, dass identische Zufallszahlen auftreten. In einem solchen Fall wird jedem Wert das arithmetische Mittel der infrage kommenden Ränge zugewiesen.

## 6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken

---

In dieser Arbeit wird der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient verwendet, um die Abhängigkeiten zwischen den Verteilungen der identifizierten Risikofaktoren zu bestimmen. Der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient für die Zufallswerte  $X$  und  $Y$  ergibt sich durch folgende Formel (6-11):

$$r_{SP} = \frac{\sum (rg(x_i) - \bar{rg}_x)(rg(y_i) - \bar{rg}_y)}{\sqrt{\sum (rg(x_i) - \bar{rg}_x)^2 (rg(y_i) - \bar{rg}_y)^2}} \quad (6-11)$$

mit  $r_{SP}$  Spearman'scher Rangkorrelationskoeffizient

$rg(x_i)$  Rang des Zufallswerts  $x_i$

$\bar{rg}_x$  Mittelwert des Rangs  $X$

$rg(y_i)$  Rang des Zufallswerts  $y_i$

$\bar{rg}_y$  Mittelwert des Rangs  $Y$

Die Mittelwerte der Ränge ergeben sich nach Formel (6-12):

$$\bar{rg}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n rg(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(n+1)}{2} \quad (6-12)$$

mit  $rg(x_i)$  Rang des Zufallswerts  $x_i$

$\bar{rg}_x$  Mittelwert des Rangs  $X$

$n$  Anzahl der Zufallswerte

Der Wertebereich des  $r_{SP}$  liegt zwischen -1 und 1. Ein Rangkorrelationskoeffizient von -1 sagt aus, dass die beiden Größen in gegensinnig monotonem Zusammenhang stehen. Ein Wert von 1 des  $r_{SP}$  hingegen kennzeichnet einen gleichsinnig monotonen Zusammenhang. Stehen die beiden Größen  $X$  und  $Y$  in keiner Korrelation so ist der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient gleich 0.

Bei der Interpretation von Korrelationsmaßen ist zu beachten, dass diese eine Aussage über den Zusammenhang zweier Zufallsgrößen ermöglichen, jedoch nichts über die Richtung der Wirkung der einen Zufallsgröße auf die andere zulassen. Für eine solche Aussage sind sachlogische Überlegungen anzustellen und unlogische Zusammenhänge vor der Analyse bereits auszuschließen. Ebenso ist darauf zu achten, keine Scheinkorrelationen zu konstruieren. Dies sind Korrelationen, die nur scheinbar existieren, da beim Vergleich zweier Größen, die dritte, welche wesentlich für die scheinbare Korrelation ist, nicht betrachtet wird. Beispielhaft kann hier

die Korrelation zwischen der Körpergröße von Kindern und deren Wortschatz genannt werden. Diese Größen stehen scheinbar in einem Zusammenhang, jedoch ist der eigentlich bestimmende Faktor hierbei das Alter der Kinder. (FAHRMEIR ET AL. 2016)

Unter Beachtung der Ausführungen zu den Einschränkungen des Korrelationskoeffizienten kann also Folgendes für die Risikofaktoren X und Y angenommen werden (FAHRMEIR ET AL. 2016):

- $0 < r_{SP} \leq 1$ : Die betrachteten Risikofaktoren korrelieren positiv. Tritt der Risikofaktor X auf, so ist mit einem Eintritt des Risikofaktors Y zu rechnen. Je größer  $r_{SP}$  ist, desto stärker ist die Korrelation der beiden Risikofaktoren.
- $r_{SP} \approx 0$ : Die betrachteten Risikofaktoren korrelieren nicht miteinander. Tritt einer der Risikofaktoren auf, kann kein Rückschluss auf den Eintritt des anderen Risikofaktors gezogen werden.
- $-1 \leq r_{SP} < 0$ : Die betrachteten Risikofaktoren korrelieren negativ. Tritt der Risikofaktor X auf, so ist nicht mit einem Eintritt des Risikofaktors Y zu rechnen. Je kleiner  $r_{SP}$  ist, desto stärker ist die negative Korrelation der beiden Risikofaktoren.

Die Bestimmung des Korrelationskoeffizienten sollte, sofern eine ausreichend große Datenbasis vorhanden ist, anhand der Verwendung historischer Daten durchgeführt werden. Stehen solche historischen Daten nicht zur Verfügung, müssen Expertenmeinungen zur Schätzung der Korrelation zwischen den betrachteten Risikofaktoren herangezogen werden. Die Zuordnung der Einschätzung der Experten und zum dazu passenden Korrelationskoeffizienten kann der folgenden Tabelle 6-1 entnommen werden. Das Vorzeichen der Korrelation ist ebenso durch einen Experten zu bestimmen.

*Tabelle 6-1: Übersicht zum Zusammenhang der Expertenschätzung und dem zugehörigen Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten (in Anlehnung an KREBS 2012)*

<b>Experten- schätzung</b>	keine Korrelation	sehr geringe Korrelation	geringe Korrelation	mittlere Korrelation	hohe Korrelation	sehr hohe Korrelation
$r_{SP}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1

## 6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken

Die Korrelationen der verschiedenen Risikofaktoren sind für die Bewertung des Risikos in eine Korrelationsmatrix einzutragen. Für jeden betrachteten Risikoträger in den fokussierten Planungsphasen ist zudem eine eigene Korrelationsmatrix anzufertigen. Im Falle, dass Risikofaktoren für alle Planungsphasen auftreten sind somit insgesamt drei Korrelationsmatrizen für die Risikoträger Losgröße, Schichtanzahl und Bearbeitungsdauer mit den zugehörigen Werten für  $r_{SP}$  zu erstellen. Eine Übersicht einer solchen Korrelationsmatrix mit entsprechenden Werten zu den Korrelationen enthält Abbildung 6-6.

Risikoträger				
	RF <sub>1</sub>	RF <sub>2</sub>	...	RF <sub>N</sub>
RF <sub>1</sub>				
RF <sub>2</sub>				
...				
RF <sub>N</sub>				

**Legende**

RF<sub>x</sub> : Risikofaktor x      r<sub>SP</sub> : Spearman'scher Rangkorrelationskoeffizient

Abbildung 6-6: *Layout der Korrelationsmatrix zur Darstellung der Korrelationen zwischen den Risikofaktoren*

Die Kenntnis über Korrelationen der Risikofaktoren ist eine Voraussetzung für die weitere Analyse des Risikos in Produktionssystemen. Dazu müssen die Risiken in einem folgenden Schritt zusammengefasst werden, um so ihre Auswirkungen auf die Risikoträger darstellen zu können. Die Vorgehensweise zur Zusammenfassung der Risikofaktoren wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

### 6.6 Risikoaggregation

Die Zusammenfassung der Risikofaktoren und deren Wirkung auf den betrachteten Risikoträger wird im Rahmen des Risikomanagements *Risikoaggregation* genannt. Dafür stehen analytische sowie simulative Verfahren zur Verfügung. Als analytisches Verfahren kann bspw. der Varianz-Kovarianz-Ansatz genannt werden. Dieser basiert auf der Annahme, dass alle Risikofaktoren normalverteilt sind und kann einen ersten Anhaltspunkt für die Risikosituation eines Unternehmens

geben. Jedoch ist die Annahme einer Normalverteilung von Risiken in der industriellen Praxis häufig nicht zutreffend. Neben der Berücksichtigung unterschiedlicher Wahrscheinlichkeitsverteilungen müssen durch ein geeignetes Aggregationsverfahren auch nichtadditive Abhängigkeiten von Risiken berücksichtigt sowie der Kontext zur Produktionsplanung hergestellt werden können. Diese Anforderungen erfüllt die MCS, welche sich als simulatives Verfahren zur Risikoaggregation bewährt hat. (GLEIBNER & WOLFRUM 2019)

Bei jedem Simulationslauf einer MCS werden Zufallszahlen erzeugt, die den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der unsicherheitsbehafteten Risikofaktoren entsprechend gezogen werden. Basierend darauf wird die wahrscheinliche Ausprägung der Risikofaktoren sowie die entsprechende Ausprägung des Risikoträgers berechnet. Über die Gesamtheit aller Simulationsläufe entsteht damit eine Verteilung für den Risikoträger unter Berücksichtigung der einzelnen Risikofaktoren. (GLEIBNER & WOLFRUM 2019)

Die MCS wird auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um die Risikolage des Unternehmens bestimmen zu können. Voraussetzung für den Einsatz der MCS ist die Kenntnis über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Risikofaktoren und ihre Wirkung (vgl. Abschnitt 6.3) sowie ihre Wechselwirkung untereinander (vgl. Abschnitt 6.5).

Mit Hilfe der MCS ist es möglich, eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen der Risikofaktoren und deren Kombinationen zu simulieren. Damit lässt sich eine Wahrscheinlichkeits(dichte)funktion des betrachteten Risikoträgers, bspw. der Schichtanzahl, ermitteln. Dies wiederum erlaubt die Bestimmung verschiedener Bewertungsmaße des Risikos, wie bspw. die Varianz oder Standardabweichung des Risikoträgers vom Erwartungswert. Diese Größen werden verwendet, um in der Planungsphase die geeigneten Maßnahmen zur Anpassung des Risikos ergreifen zu können.

Das Ergebnis einer MCS für die Berücksichtigung von zwei Risikofaktoren und deren Auswirkung auf den Risikoträger ist in Abbildung 6-7 dargestellt. Dabei sind auf der linken Seite die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Risikoträger durch die identifizierten Risikofaktoren dargestellt. Das Ergebnis spiegelt dann ein Histogramm der möglichen Ergebnisse des Risikoträgers wider. Dieses Ergebnis wird dann im Weiteren dazu verwendet, um die Risikolage des Unternehmens zu beurteilen.



ist. Risikofaktoren, welche sich auf den Risikoträger Losgröße auswirken, sind auf Zellebene zu aggregieren, da hier zumeist eine gemeinsame Losgrößenplanung stattfindet (SCHUH ET AL. 2012A). Risikofaktoren mit Auswirkungen auf Risikoträger der Kategorie Kapazität sind auf Zell-, Segment- oder Fabrikebene zu aggregieren, abhängig davon, wie granular unterschiedliche Schichten im jeweiligen Unternehmen eingeplant werden können. Risikofaktoren, die sich auf Risikoträger der Kategorie Reihenfolge auswirken, sind auf Arbeitsstationsebene zu aggregieren, da auch in der Reihenfolgeplanung eine Planung auf Arbeitsstationsebene stattfindet (s. Abbildung 6-8) (SCHUH ET AL. 2012A).

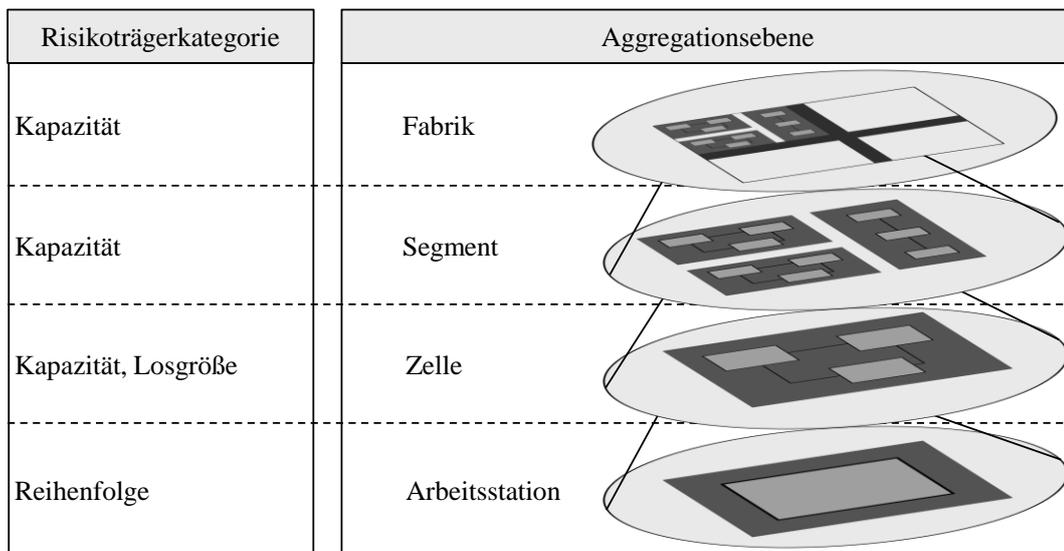


Abbildung 6-8: Zusammenhang zwischen Aggregationsebenen und Risikoträgerkategorien

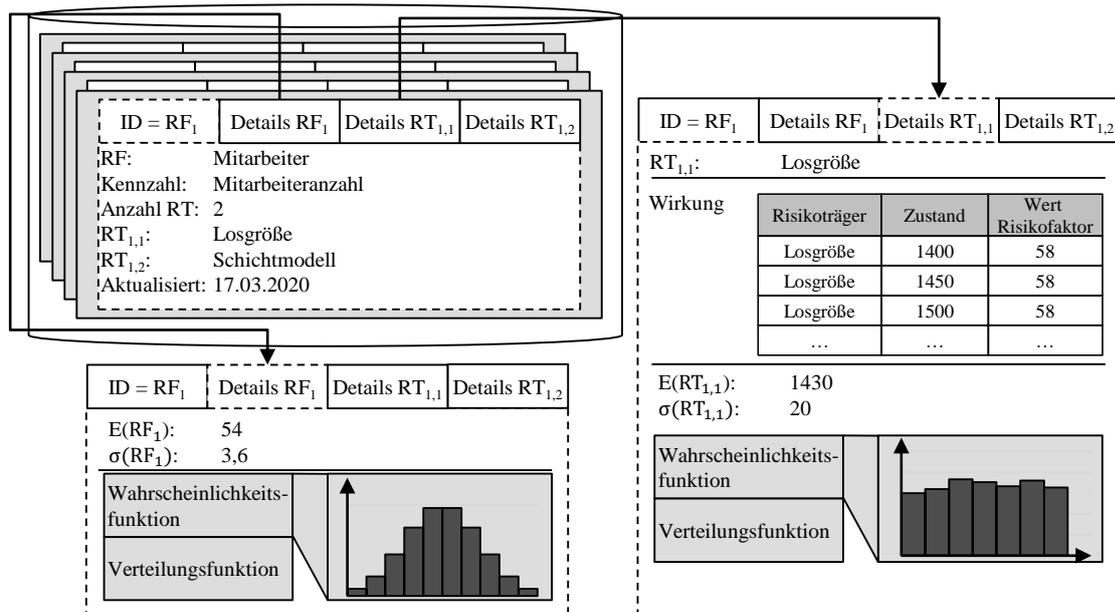
Zur Reduktion des Berechnungsaufwands bei der Analyse der Risiken werden bereits vorhandene Risikobeurteilungen in einer Risikodatenbank gespeichert. Die Inhalte dieser Datenbank und die Generierung neuer Einträge werden im nächsten Abschnitt dargelegt.

## 6.7 Risikodatenbank

In der Risikodatenbank werden Ergebnisse der Risikoidentifikation sowie der Risikoanalyse festgehalten. Dadurch wird eine zentrale Speicherung der für die Produktionsplanung relevanten Daten erreicht. Somit sind alle Informationen an einem Ort gespeichert und es entstehen keine unterschiedlichen Risikoanalyseergebnisse aufgrund unterschiedlicher Informationsstände.

## 6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken

In der Risikodatenbank ist jeder Risikofaktor festgehalten. Die Informationen aus dem erweiterten RMEA-Formblatt sind dort ebenso hinterlegt wie auch die Ergebnisse aus der Risikoanalyse. So wird zu jedem Risikofaktor dessen Wirkung auf den Risikoträger gespeichert sowie die quantifizierte Eintrittswahrscheinlichkeit und das zugehörige Schadensausmaß. Es ist möglich, dass ein Risikofaktor eine Wirkung auf unterschiedliche Risikoträger besitzt. Dadurch kann es vorkommen, dass einem Risikofaktor mehrere quantifizierte Auswirkungen auf unterschiedliche Risikoträger in der Risikodatenbank zugeordnet werden (s. Abbildung 6-9).



### Legende

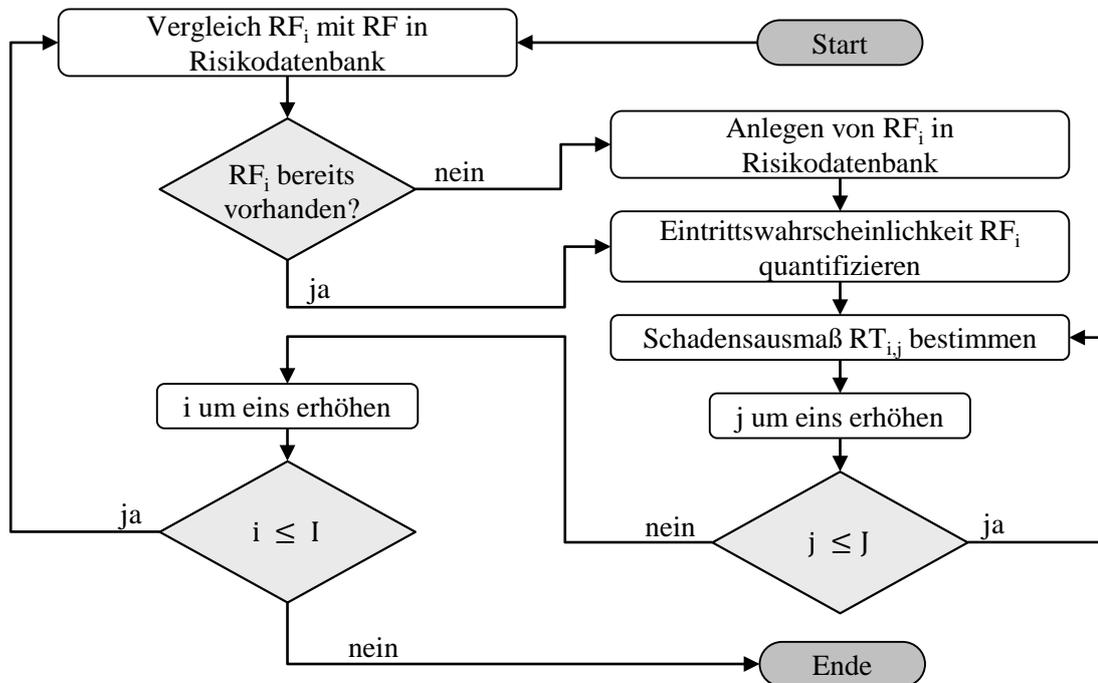
$RF_i$  : Risikofaktor i

$RT_{i,j}$  : Risikoträger j beeinflusst durch Risikofaktor i

Abbildung 6-9: Inhalt der Risikodatenbank

Um die Validität der Quantifizierung der Risikofaktoren zu gewährleisten, muss sichergestellt sein, dass die in der Risikodatenbank hinterlegten Informationen aktuell sind. Die Aktualität der Daten wird durch eine periodische Überprüfung der abgelegten Informationen realisiert. Aufgrund der späteren Verwendung der Daten in der operativen Produktionsplanung und einem damit einhergehenden Planungshorizont von bis zu mehreren Wochen wird eine wöchentliche Überprüfung der Aktualität der Informationen als ausreichend eingeschätzt. Diese Frequenz kann jedoch aufgrund unternehmensindividueller Präferenzen auch angepasst werden. Neben einer periodischen Überprüfung der Informationen ist auch eine ereignisbasierte Überprüfung und ggf. Aktualisierung vorzusehen. Solche Ereignisse sind

bspw. die Integration neuer Produktionsressourcen in das betrachtete Produktionssystem oder die Änderung der Arbeitsgangreihenfolge eines Produkts. In solchen Fällen ist eine erneute Risikoidentifikation durchzuführen und die Risikodatenbank entsprechend zu erweitern. Der prinzipielle Ablauf der Aktualisierung der Risikodatenbank kann Abbildung 6-10 entnommen werden.



#### Legende

$I$  : Anzahl der identifizierten Risikofaktoren

$RF_i$  : Risikofaktor  $i$

$J$  : Anzahl der von Risikofaktor  $i$  beeinflussten Risikoträger

$RT_{i,j}$  : Risikoträger  $j$  beeinflusst durch Risikofaktor  $i$

Abbildung 6-10: Ablauf der Eintragung und Aktualisierung der Daten in der Risikodatenbank

## 6.8 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde ein Vorgehen zur Analyse von Risiken vorgestellt. Die Modellierung der Risikofaktoren erfolgt durch passende Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Diese werden durch Analyse historischer Daten oder durch eine Einschätzung von Experten ermittelt. Nachdem die Auswirkung der Risikofaktoren auf die Risikoträger der Produktionsplanung definiert wurde, kann das Schadensausmaß jedes Risikofaktors auf die Risikoträger beziffert werden. Da Risikofakto-

## **6 Vorgehen zur Analyse von Produktionsrisiken**

---

ren Auswirkungen auf mehrere Risikoträger haben können und zudem auch untereinander in Wechselwirkung stehen können, wurde ein Vorgehen vorgestellt, um die Auswirkungen auf einen Risikoträger mittels MCS zusammenzufassen und zu quantifizieren. Abschließend wurde die Risikodatenbank vorgestellt, in welcher Risikofaktoren, ihre Eintrittswahrscheinlichkeit und ihr Schadensausmaß festgehalten werden.

## 7 Entscheidungstheoretisches Modell zur Ermittlung der Risikopräferenz

### 7.1 Übersicht

Entscheidungen unter Risiko, zu welchen auch Entscheidungen während der Produktionsplanung gezählt werden können, werden immer auch durch die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers beeinflusst. Zur Verbesserung der Akzeptanz der Ergebnisse von Produktionsplanungssystemen zur Berücksichtigung von Risiken ist somit eine Integration der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers in das Planungssystem zielführend. Zur Integration dieser Risikopräferenz muss eine Aussage über deren Ausprägung getroffen werden können. Im Folgenden wird daher ein Ansatz zur Ermittlung der Risikopräferenz vorgestellt.

Dazu müssen zunächst Risikopräferenzklassen (RPK) abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 7.2). Im Anschluss werden bereits existierende Verfahren zur Risikopräferenzermittlung untersucht und bewertet (vgl. Abschnitt 7.3). In einem nächsten Schritt wird das aus der Entscheidungstheorie adaptierte Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz von Entscheidungsträgern vorgestellt (vgl. Abschnitt 7.4). Wie bereits dargestellt (vgl. Abschnitt 2.4.3), ist die Risikopräferenz kein konstantes Merkmal. Daher werden abschließend Kriterien abgeleitet, auf Basis derer die Durchführungshäufigkeit des Verfahrens zur Ermittlung der Risikopräferenz bestimmt werden kann.

### 7.2 Risikopräferenzklassen

Die RPK dienen als Grundlage zur Einstellung der Risikoparameter während den Produktionsplanungsphasen. Zur Einordnung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers wird ein fünfstufiges Schema in Anlehnung an die Einteilung von Performance Levels nach DIN EN ISO 13849-1 gewählt. Ein Performance Level ist demnach die „(...) Fähigkeit sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen, eine Sicherheitsfunktion unter vorhersehbaren Bedingungen auszuführen (...)“. Übertragen auf die Risikopräferenz von Entscheidungsträgern ist eine RPK wie folgt zu definieren:

## 7 Entscheidungstheoretisches Modell zur Ermittlung der Risikopräferenz

*Der Grad der Bereitschaft eines Entscheidungsträgers, die mögliche negative Beeinflussung der Zielgrößen der Produktion durch die vorhandenen Risiken zu akzeptieren.*

Die fünf RPK erstrecken sich von *sehr risikoavers* über *risikoavers*, *risikoneutral* und *risikoaffin* bis hin zu *sehr risikoaffin* (s. Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Übersicht über die RPK

Risiko-präferenzklasse	1	2	3	4	5
Beschreibung	sehr risikoavers	risikoavers	risikoneutral	risikoaffin	sehr risikoaffin

Nach der Beschreibung der RPK folgt nun eine Auswahl der am besten geeigneten Verfahren aus der Entscheidungstheorie zur Risikopräferenzmessung. In einem nachfolgenden Schritt werden die ausgewählten Verfahren für die Produktionsplanung adaptiert.

### 7.3 Auswahl geeigneter Verfahren zur Risikopräferenzermittlung

#### 7.3.1 Allgemeines

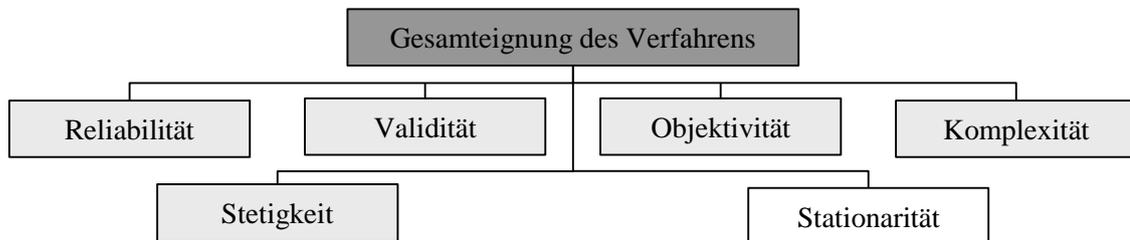
Die Verfahren zur Risikopräferenzmessung können in psychologische und objektive Verfahren unterteilt werden (vgl. Abschnitt 2.4.4). Für die Anwendung in der Produktionsplanung sind die am besten geeigneten Verfahren zu identifizieren und auszuwählen. Dazu werden im Folgenden in der Entscheidungstheorie anerkannte Bewertungskriterien für TV vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt eine kurze Darstellung des Bewertungsergebnisses unterschiedlicher Verfahren. Im Anschluss daran werden die laut Bewertung am besten geeigneten und später angewendeten Verfahren vorgestellt.

#### 7.3.2 Bewertungskriterien

Zur zielgerichteten Analyse bestehender Ansätze der Risikopräferenzermittlung sind Bewertungskriterien zu definieren. Aus der Einzelbewertung der Verfahren bezüglich jedes Merkmals ergibt sich eine Gesamtbewertung, welche das unter-

### 7.3 Auswahl geeigneter Verfahren zur Risikopräferenzermittlung

suchte Verfahren relativ zu anderen Ansätzen vergleicht. Zur Beurteilung der Eignung eines Verfahrens zur Risikopräferenzmessung können insgesamt sechs Kriterien identifiziert werden: *Reliabilität*, *Validität*, *Objektivität*, *Komplexität*, *Stetigkeit* und *Stationarität* (s. Abbildung 7-1). (ZUBER & GUTHIER 2003, GRASCHITZ 2017)



#### Legende

: keine Betrachtung in dieser Arbeit

Abbildung 7-1: Bewertungskriterien für Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz

Unter *Reliabilität* wird allgemein die Zuverlässigkeit der Messergebnisse verstanden. Dieses Maß der formalen Genauigkeit gibt den tatsächlichen Unterschied zwischen Messergebnissen und Realität an, der nicht durch Messfehler verursacht wird. Liegt eine hohe *Reliabilität* vor, so sind Messergebnisse unter gleichen Rahmenbedingungen reproduzierbar. Zur Bewertung, inwiefern das gewünschte Merkmal auch gemessen wird, dient das Gütekriterium der *Validität*. Damit Bewertungsergebnisse nicht vom gewählten Subjekt, z. B. der Testperson, abhängig sind, sollte ein Verfahren zur Messung der Risikopräferenz zudem eine hohe *Objektivität* aufweisen. Die *Reliabilität*, *Validität* und *Objektivität* gelten hierbei als die drei wichtigsten Gütekriterien empirischer Untersuchungen. (ZUBER & GUTHIER 2003, GRASCHITZ 2017)

Unter *Komplexität* wird nicht nur die Komplexität des Ansatzes zur Risikopräferenzmessung selbst verstanden, sondern auch der Zeitaufwand für die Schulung der Probanden, die Datenerhebung und die Messergebnisauswertung. Aufgrund der Bewertungsskala der Analyse wird jedoch für die Bewertung statt der Komplexität deren reziproker Wert, die „Einfachheit“ der Verfahren angegeben. Bei der Beurteilung anhand der *Stetigkeit* müssen grundsätzlich zwei Arten unterschieden werden: So bilden einige Verfahren die Risikopräferenz als stetige Risikonutzenfunktionen (RNF) andere Ansätze in Risikonutzenklassen (RNK) ab. (ZUBER & GUTHIER 2003, GRASCHITZ 2017)

## **7 Entscheidungstheoretisches Modell zur Ermittlung der Risikopräferenz**

---

Als weiteres Gütekriterium zur Bewertung der Gesamteignung eines Verfahrens ist die *Stationarität* zu nennen. Wie sich in verschiedenen Studien gezeigt hat, ist das Risikoverhalten zeitvariant (ZUBER & GUTHIER 2003, MATA ET AL. 2011). Je nach Verfahren treten abhängig vom Untersuchungszeitpunkt beim gleichen Probanden Abweichungen in der gemessenen Risikoeinstellung auf. Die Quantifizierung und Bewertung der Stationarität je Verfahren gestaltet sich jedoch aufgrund der Komplexität und dem Mangel an Untersuchungen äußerst schwierig, weshalb diese Einflussgröße zwar als Bewertungskriterium angeführt wird, jedoch in der folgenden Bewertung nicht miteinbezogen wird. Laut KRAHNEN ET AL. (1997) schwankt das Verhalten von Probanden im zeitlichen Verlauf sehr stark. Zeitstabile Risikoeinstellungen existieren bei Personen nicht, da sich deren individuelle Sicherheitsäquivalente mit der Zeit signifikant ändern. Zu weiteren Effekten, deren Auswirkungen ihren Ursprung in zeitabhängigen Einflussgrößen haben, wird an dieser Stelle auf einschlägige Literatur verwiesen, wie bspw. MATA ET AL. (2011), EWALD ET AL. (2012) oder SCHILDBERG-HÖRISCH (2018).

### **7.3.3 Bewertung der Verfahren**

In Tabelle 7-2 ist das Bewertungsergebnis für die betrachteten Verfahren anhand der vorgestellten Kriterien zusammengefasst. Das Bewertungskriterium Komplexität wird zur besseren Lesbarkeit durch das Kriterium „Einfachheit“ ersetzt. Es wird deutlich, dass nur wenige Verfahren als geeignet bzw. besonders geeignet für die Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung einzustufen sind. Die beiden am besten geeigneten Verfahren, der *Risk Ruler* und *MPL* werden in diesem Abschnitt detailliert vorgestellt. Eine Beschreibung der weiteren Verfahren, die für die Risikopräferenzmessung analysiert wurden, kann Abschnitt 12.2 des Anhangs entnommen werden.

Als subjektives psychologisches Verfahren weisen *Risk Ruler* eine gute Gesamteignung für die Risikobeurteilung in der Produktionsplanung auf. Trotz durchschnittlicher Reliabilität und Validität zeichnet sich diese Art zur Risikopräferenzermittlung durch ihre Einfachheit aus und wird somit gegenüber dem BART für den Einsatz in der Produktionsplanung bevorzugt. *Risk Ruler* stellen standardisierte Verfahren dar, um die Risikoeinstellung durch eine subjektive Selbsteinschätzung zu messen. Der Proband muss einen fest definierten Fragenkatalog ausfüllen, indem er auf Fragen und Statements entsprechend seiner persönlichen Risikoeinstellung antwortet. Damit die Fragen für den Probanden möglichst verständlich gestaltet sind, ist es essentiell, eine passende Tiefendimension zu wählen. Hierunter wird die sprachliche Ebene der Faktoren (Fragen oder Aussagen) im

### 7.3 Auswahl geeigneter Verfahren zur Risikopräferenzermittlung

Vergleich zur Komplexität des jeweils zu erklärenden Konstrukts (hier Risikoaversion) verstanden. Wird die Tiefendimension zu gering gewählt, beinhalten die Statements häufig zu viele Begriffe aus dem Fachbereich der Entscheidungstheorie, welche für Befragte häufig unverständlich sind. (ZUBER & GUTHIER 2003)

Tabelle 7-2: *Bewertungsergebnis der Analyse der Verfahren zur Messung der Risikopräferenz*

Art	Verfahren	Reliabilität	Validität	Objektivität	Einfachheit	Stetigkeit	Eignung
Psychologische Verfahren	Befragungen					RNK	
	Risk Ruler					RNK	
	DOSPERT-Skala					RNK	
	Wahldilemma-Fragen					RNK	
	Polaritätendiagramm					RNK	
	BART					RNK	
	Blackjack					RNK	
Objektive Verfahren	Lotterien und Vergleiche					RNK/RNF	
	BIAS					RNK/RNF	
	Multiple Preislisten					RNK/RNF	
	Iowa Gambling Task					RNK	
	Cake Gambling Task					RNK	
	Paarweiser Lotterievergleich					RNK	
	Vickrey-Auktion					RNK/RNF	

**Legende**

- : sehr gering     
 : neutral     
 : sehr stark ausgeprägt  
 : gering     
 : stark ausgeprägt

Auch mit nur wenig Erklärung können Probanden den Risk Ruler eigenständig durchführen. In Bezug auf die Produktionsplanung haben Risk Ruler den Vorteil, dass die einzelnen Fragen angepasst und somit als produktionstechnische Aussagen ausgeführt werden können. Durch die Adaption der Fragen in ihrer Tiefendimension lassen sich Risk Ruler speziell auf die Bedürfnisse von Produktionsplanern anpassen. Da durch die Wahl von produktionstechnischen Themenbereichen die adaptierten Fragen aus dem Fachbereich der Probanden stammen, können sich die Untersuchungsteilnehmer durch diese Anpassung gut mit dem Ergebnis des

## 7 Entscheidungstheoretisches Modell zur Ermittlung der Risikopräferenz

Risk Rulers identifizieren. Ein beispielhafter Risk Ruler ist in Abbildung 7-2 dargestellt.

Aussagen	A	B	C	D	E
Ich betrachte riskante Situationen als Herausforderung.					
Auch bei großen Risiken bleibe ich gelassen.					
Ich gehe Unbekanntem aus dem Weg.					
Ich bevorzuge bekannte Lösungswege anstatt neue.					
Wenn es um Geld geht, bedenke ich immer alle Folgen.					

### Legende

A : trifft gar nicht zu      C : neutral      E : trifft vollkommen zu  
 B : trifft eher nicht zu      D : trifft überwiegend zu

Abbildung 7-2: *Beispielhafter Risk Ruler mit einer fünfstufig differenzierten Antwortmöglichkeit (in Anlehnung an ZUBER & GUTHIER 2003)*

Unter *MPL* sind eine Vielzahl von Preislisten-Experimenten zusammengefasst. Die aus den Experimenten abgeleitete RNF wird ermittelt, indem der Proband den Punkt seiner Indifferenz durch die Auswahl von Handlungsalternativen in einer Liste unterschiedlich riskanter Möglichkeiten offenbart. In der Liste werden verschiedene Entscheidungssituationen mit differenzierter Auszahlung angeführt. Während des Experiments werden dem Probanden nacheinander diverse Entscheidungssituationen vorgelegt, bei welchen jeweils eine Handlungsalternative ausgewählt werden muss (EWALD ET AL. 2012).

Eine der bekanntesten MPLs ist diejenige von HOLT & LAURY (2002). Diese als HLL bezeichnete Preisliste besteht aus insgesamt zehn Entscheidungssituationen, in denen jeweils eine Auswahl aus zwei Handlungsalternativen getroffen werden muss. Die Verteilung an Auswahlalternativen deckt hierbei ein gleichverteiltes, diskretes Spektrum ab: Angefangen von sehr konservativen Entscheidungssituationen mit einer relativ sicheren Auszahlung über eine moderate Chance auf die Auszahlung höherer Geldsummen bis hin zu sehr risikoreichen Auswahlalternativen. Ziel der HLL ist es, herauszufinden, bei welcher Entscheidungssituation die Testperson indifferent in Bezug auf die Handlungsalternativen ist. Die Anzahl an sicheren Entscheidungen in einer zehnstufigen Lotterieverteilung gibt den HLL-Wert an. Der HLL-Wert ist definiert als Indifferenzpunkt, bei welchem der

## 7.4 Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung

Proband von Auswahlalternative A zu B wechselt. Eine solche HLL ist beispielhaft in Tabelle 7-3 dargestellt. Darin entspricht der HLL-Wert der Nummer der entsprechenden Entscheidungssituation, bei der der Proband letztmalig Alternative A ausgewählt hat. Die berechnete Differenz der erwarteten Auszahlung (vgl. letzte Spalte in Tabelle 7-3) wird dem Probanden während der Versuchsdurchführung nicht offengelegt, da ansonsten Präferenzen zugunsten bestimmter Handlungsalternativen entstehen können (HOLT & LAURY 2002). Per Definition liegt bei einer zehnstufigen Auszahlungsmatrix (s. Tabelle 7-3) bei einem HLL-Wert  $< 4$  ein risikoaffines Verhalten, bei einem Wert HLL-Wert  $> 4$  eine risikoaverse Einstellung vor (HOLT & LAURY 2002, EWALD ET AL. 2012).

*Tabelle 7-3: Auszahlungsmatrix der HLL*

Entscheidungssituation	Handlungsalternativen		Differenz der erwarteten Auszahlungen
	A	B	
1	10 % Gewinn von 200 € 90 % Gewinn von 160 €	10 % Gewinn von 385 € 90 % Gewinn von 10 €	116,50 €
2	20 % Gewinn von 200 € 80 % Gewinn von 160 €	20 % Gewinn von 385 € 80 % Gewinn von 10 €	83,00 €
⋮	⋮	⋮	⋮
4	40 % Gewinn von 200 € 60 % Gewinn von 160 €	40 % Gewinn von 385 € 60 % Gewinn von 10 €	16,00 €
⋮	⋮	⋮	⋮
9	90 % Gewinn von 200 € 10 % Gewinn von 160 €	90 % Gewinn von 385 € 10 % Gewinn von 10 €	-151,50 €
10	100 % Gewinn von 200 € 0 % Gewinn von 160 €	100 % Gewinn von 385 € 0 % Gewinn von 10 €	-185,00 €

Die beiden vorgestellten Verfahren bilden die Grundlage für das Vorgehen zur Ermittlung der Risikopräferenz von Entscheidungsträgern während der Produktionsplanung. Dieses wird im nachfolgenden Abschnitt 7.4 vorgestellt.

## 7.4 Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung

Die für diese Arbeit relevanten Entscheidungsträger sind Produktionsplaner, welche täglich mit risikobehafteten Entscheidungen konfrontiert sind. In diesen Entscheidungssituationen spielt ihre Risikopräferenz eine entscheidende Rolle. Das zu entwickelnde Verfahren soll das Defizit im Rahmen der Produktionsplanung schließen, das laut KRAHNEN ET AL. (1997) darin besteht, dass es kaum geeignete

## 7 Entscheidungstheoretisches Modell zur Ermittlung der Risikopräferenz

Messmethoden zur Ermittlung der Risikopräferenz für reale Fragestellungen gibt. Leicht verständliche Selbsteinschätzungen unterliegen einer systematischen Wahrnehmungsverzerrung. Sehr komplexe Ansätze werden von Probanden nur schwer verstanden und bergen das Risiko, dass ein Risikoverhalten gemessen wird, welches mit der realen Risikopräferenz des Entscheidungsträgers nicht übereinstimmt (KRAHNEN ET AL. 1997). Der im Folgenden vorgestellte Ansatz soll nun die Messung einer möglichst realitätsnahen Risikopräferenz ermöglichen. Dies wird sichergestellt, indem verschiedene bereits vorhandene Ansätze kombiniert und adaptiert werden.

Der Ablauf des entwickelten Verfahrens gliedert sich in eine Vorbereitungsphase, in der die Haupt- und Nebeneinflussfaktoren der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers bestimmt werden. Anschließend erfolgt die Durchführung der TV. Danach findet die Auswertung der Ergebnisse sowie eine Einordnung des Probanden in RPK statt. Dieser Ablauf ist Abbildung 7-3 zu entnehmen

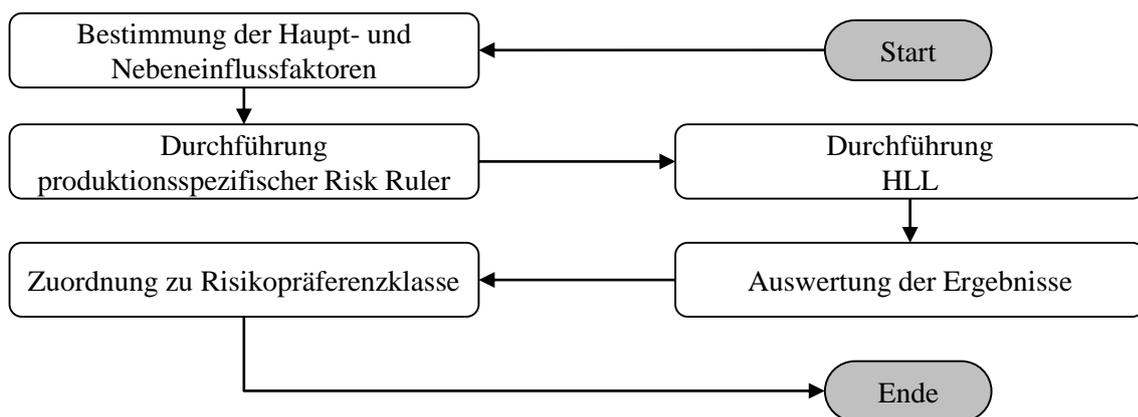


Abbildung 7-3: Ablauf des Verfahrens zur Risikopräferenzermittlung in der Produktionsplanung

Prinzipiell empfiehlt es sich, für die Risikopräferenzermittlung einen Leitfaden für Mitarbeiter und Führungskräfte anzufertigen und anzuwenden. Durch preisgegebene Informationen und deren anschließende Bewertung darf kein Mitarbeiter einen Nachteil befürchten. Die Information darf ausschließlich zum besseren Verständnis und zur Optimierung von Entscheidungsprozessen verwendet werden. Als weitere Voraussetzung für die Befragung müssen die jeweils geltenden staatlichen und unternehmensinternen Regeln zum Datenschutz eingehalten werden.

Bevor die Datenerfassung (Evaluation) der Probanden durchgeführt werden kann, sind die zu befragenden Personen auszuwählen. Neben den in der Produktionspla-

## 7.4 Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung

---

nung tätigen Entscheidern ist der Test auch durch deren Vorgesetzte zu durchlaufen. Somit ist eine Plausibilitätsprüfung des Testergebnisses möglich wodurch sichergestellt wird, dass das Testergebnis nicht gegensätzlich zur Risikopräferenz des Unternehmens ist. Bevor die Befragung startet, ist nach der Auswahl der einzubeziehenden Stakeholder auch deren explizite Zustimmung einzuholen. Zudem sind die Testpersonen über den zeitlichen Umfang und den Zweck der bevorstehenden Befragungen und Experimente zu informieren. Eine detaillierte Vorabinformation zu Inhalten einzelner Experimente ist nicht zu empfehlen, da dies unerwünschte Effekte nach sich ziehen könnte. Wird die Entscheidung direkt aus der Situation getroffen, bleibt für den Probanden weniger Zeit sich (vermeintliche) Strategien zu überlegen, um die Ergebnisse bewusst hinsichtlich einer gewünschten Zielgröße zu beeinflussen. Die Güte der in der Evaluation von unvoreingenommenen Probanden gesammelten Daten führt somit zu einem weniger verzerrten Risikoprofil.

Personenindividuelle Haupt- und Nebeneinflussfaktoren werden zu Beginn durch eine allgemeine Befragung erfasst. Aufgrund der unter anderem von JACKSON ET AL. (1972) eingeführten differenzierten Betrachtung der Risikopräferenz können einzelne Einflussfaktoren auf das Risikoverhalten identifiziert und klassifiziert werden. Für eine detaillierte Erläuterung sei auf entsprechende Literatur verwiesen, wie bspw. WIK ET AL. (2004), EWALD ET AL. (2012) oder SCHILDBERG-HÖRISCH (2018). Zu solchen individuellen Einflussfaktoren zählen z. B. soziodemografische Daten wie Alter, Geschlecht oder Bildungsgrad.

Im Anschluss an die allgemeine Befragung folgen zwei ausgewählte und, soweit möglich, für die Produktionsplanung adaptierte Verfahren. Mit Hilfe auf produzierende Unternehmen abgestimmter Risk Ruler werden die Merkmalsausprägungen des Probanden erfasst. Zu jeder Aussage wird die Festlegung des Probanden auf eine der fünf Antwortalternativen erfasst. Die Fragen sind hierbei mehrheitlich aus dem Bereich der Produktionsplanung zu wählen, sodass sich die zu untersuchende Person dem Untersuchungsgegenstand identifizieren kann. Diese Adaption des Verfahrens bietet eine erhöhte Sicherheit, dass die gemessene Risikoaversion auch mit den für die Produktionsplanung relevanten Risikodimensionen übereinstimmt. Die Aussagen, welche der Proband beurteilen muss, fokussieren die drei unterschiedlichen Phasen der operativen Produktionsplanung Losgrößen-, Kapazitäts- und Reihenfolgeplanung. Dazu müssen je drei Aussagen zur Losgrößen- und Kapazitätsplanung sowie vier zur Reihenfolgeplanung durch den Probanden evaluiert werden (s. Abbildung 7-4).

## 7 Entscheidungstheoretisches Modell zur Ermittlung der Risikopräferenz

Nach Abschluss des Risk-Ruler-Verfahrens ist eine Umrechnung der hierbei ermittelten Risikopräferenz in die für die Produktionsplanung entwickelten Risikopräferenzen durchzuführen. Die fünf Klassen von A bis E repräsentieren Werte auf einer Skala von eins bis fünf.

Planungsphase	Aussagen	A	B	C	D	E
Losgrößenplanung	Eine schwankende Materialqualität ist für die Bestimmung der Losgröße kaum relevant.					
	....					
Kapazitätsplanung	Ein hoher Krankenstand bei Produktionsmitarbeitern hat kaum gravierende Auswirkungen für die Einhaltung des Produktionsplans zur Folge.					
	....					
Reihenfolgeplanung	Ein Maschinenausfall stellt kein Problem für den Produktionsablauf dar.					
	....					

### Legende

A : trifft gar nicht zu      C : neutral      E : trifft vollkommen zu  
 B : trifft eher nicht zu      D : trifft überwiegend zu

Abbildung 7-4: Für die Produktionsplanung angepasster Risk Ruler mit einem Auszug der zu bewertenden Aussagen

Eine sehr risikoaverse Person erreicht somit minimal zehn Punkte, eine sehr risikoaffine Person maximal 50 Punkte bei Evaluierung der zehn Aussagen des Risk Rulers. Bei einer Punktedifferenz von 40 Punkten und fünf RPK für die Produktionsplanung ergibt sich eine Klassengröße von acht für die Ergebnisse des Risk Rulers je RPK (s. Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Klassifizierung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers durch den produktionsplanungsspezifischen Risk Ruler

Punktwert Risk Ruler	$10 \leq x < 19$	$19 \leq x < 27$	$27 \leq x < 35$	$35 \leq x < 43$	$43 \leq x \leq 50$
Risikopräferenzklasse	1	2	3	4	5

Im Anschluss an den Risk Ruler ist eine Risikopräferenzermittlung mittels HLL durchzuführen. Da dieser Test kaum modifiziert werden kann, ohne den von den Entwicklern gewünschten Mechanismus zu schwächen, wird dieses Verfahren

## 7.4 Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung

nicht auf die Produktion angepasst. Nach Durchführung der HLL ist eine Umrechnung der Ergebnisse in die jeweilige RPK notwendig. Wie im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt, ist ein Ergebnis der HLL mit einem Wert  $> 4$  typisch für risikoaverse Entscheider, ein Wert  $< 4$  typisch für risikoaffine Entscheider (s. Tabelle 7-5).

*Tabelle 7-5: Klassifizierung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers durch HLL*

Ergebnis HLL	$0 \leq x < 2$	$2 \leq x < 4$	$x = 4$	$4 < x < 8$	$8 \leq x \leq 10$
Risiko- präferenzklasse	1	2	3	4	5

### Ergebnisauswertung der Präferenztests und Klassifizierung der Risikopräferenz

Für die Zuordnung einer Person zu einer RPK sind die Ergebnisse der beiden Präferenztestverfahren zusammenzufassen. Zur Ermittlung eines Gesamtergebnisses aus den beiden Verfahren, sind die Einzelergebnisse zu einer RPK zu kombinieren. Dazu ist jedes der Einzelergebnisse aus den TV mit einem unternehmensindividuellen Gewichtungsfaktor  $\beta_{TV}$  zu versehen und so die konsolidierte Einordnung der RPK des Entscheiders gemäß Formel (7-1) zu ermitteln:

$$RPK_{ges} = \beta_{HLL} * RPK_{HLL} + \beta_{RR} * RPK_{RR} \quad (7-1)$$

mit  $RPK_{ges}$  Zusammengefasste RPK des Entscheiders

$RPK_{HLL}$  RPK des Entscheiders gemäß HLL

$RPK_{RR}$  RPK des Entscheiders gemäß Risk Ruler

$\beta_{HLL}$  Gewichtungsfaktor der HLL

$\beta_{RR}$  Gewichtungsfaktor des Risk Rulers

Auf diese Weise kann die RPK des Verantwortlichen ermittelt werden, sofern die in Formel (7-2) formulierte Voraussetzung erfüllt ist:

## 7 Entscheidungstheoretisches Modell zur Ermittlung der Risikopräferenz

---

$$\beta_{ges} = \beta_{HLL} + \beta_{RR} = 1 \quad (7-2)$$

mit	$\beta_{ges}$	Gesamtgewichtungsfaktor der TV
	$\beta_{HLL}$	Gewichtungsfaktor der HLL
	$\beta_{RR}$	Gewichtungsfaktor des Risk Rulers

Liegt die ermittelte zusammengefasste RPK zwischen zwei Werten der Klassifizierungsskala, wird dem Entscheider die risikoaversere RPK zugeordnet.

### Durchführungshäufigkeit der Risikopräferenzermittlung

Die Risikopräferenz gilt als sich veränderndes, nicht konstantes Merkmal einer Person (vgl. Abschnitt 2.4.3). Für eine optimale Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung muss definiert werden, wie häufig die Risikopräferenz einer Person ermittelt werden muss. Eine fixe Definition des Zeitraums bis zu einer erneuten Durchführung des Tests ist aufgrund der personen- und unternehmensindividuellen Randbedingungen nicht möglich. Allerdings können Indikatoren verwendet werden, um einen Wiederholungszeitpunkt für den Test zu definieren. Der Test ist in jedem Fall erneut zu absolvieren, sobald der Entscheider in der operativen Produktionsplanung wechselt. Eine weitere mögliche Frequenz wäre die Bemessung nach einem konkreten Zeitintervall von sechs Monaten (FREY ET AL. 2017).

## 7.5 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde ein Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz vorgestellt. Dazu wurden die zwei geeignetsten Verfahren aus der Entscheidungstheorie zur Adaption ausgewählt. Besonders wichtig war während der Analyse die Einfachheit der Verfahren, da diese schnell verständlich sein sollen und auch von Personen angewendet werden können sollen, die keine Vorkenntnisse im Bereich der Entscheidungstheorie besitzen. Im Anschluss wurde das Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung vorgestellt, das aus einer Kombination eines Risk Rulers und einer HLL besteht. Die Auswertung erfolgt durch eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Einzeltests, sodass eine Einordnung in eine von fünf RPK möglich ist. Im nächsten Kapitel erfolgt die Vorstellung der Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung der Risikopräferenz.

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

### 8.1 Übersicht

Das folgende Kapitel stellt die Methode zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz vor. Basierend auf den in den drei vorangegangenen Kapiteln dargelegten Systemelementen kann das Produktionsplanungsproblem formuliert werden, sodass sowohl Risiken als auch die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden.

Dafür wird zu Beginn des Kapitels der Ablauf der Methode zur Produktionsplanung erläutert (vgl. Abschnitt 8.2). Um effektiv sowohl die Risikopräferenz von Entscheidungsträgern als auch Risiken in der Produktionsplanung zu berücksichtigen muss der mögliche Wertebereich der Risikoträger eingeschränkt werden (vgl. Abschnitt 8.3). Die Einschränkung des Wertebereichs anhand einer Klassifizierung der vorherrschenden Risikosituation in der Produktion wird in Abschnitt 8.3 erläutert. Im darauffolgenden Abschnitt wird die Parametrierung des Risikoträgers auf Basis der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers erläutert. Abschließend wird die Zielfunktion für die operative Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz dargestellt (vgl. Abschnitt 8.5).

### 8.2 Ablauf der Methode zur operativen Produktionsplanung

Der Ablauf der Methode zur operativen Produktionsplanung erfolgt in verschiedenen aufeinanderfolgenden Schritten. Zu Beginn der Methode wird die *automatisierte Einschränkung des Wertebereichs der Risikoträger* durchgeführt. Dazu dienen die quantifizierten Risikoträger sowie die Klassen der Risikosituationen als Grundlage. Im Anschluss daran erfolgt die *Parametrierung der Risikoträger*. Dieser Schritt ermöglicht die explizite Berücksichtigung der Risikopräferenz des Produktionsplaners. Abschließend erfolgt die *Berechnung des Produktionsplans unter Berücksichtigung der Risikopräferenz*. Dies beinhaltet die Formulierung des Produktionsplanungsproblems, welches anhand der unternehmensindividuellen Randbedingungen zu spezifizieren ist. Die soeben dargestellten Schritte können Abbildung 8-1 entnommen werden.

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

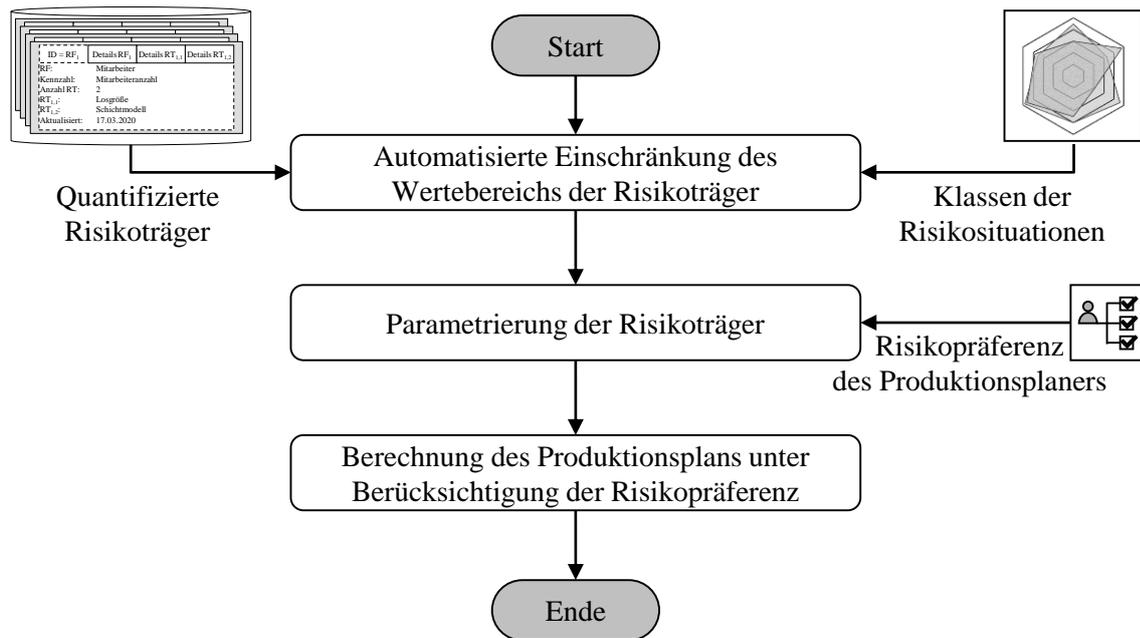


Abbildung 8-1: Bestandteile der Methode zur operativen Produktionsplanung

Im folgenden Abschnitt wird auf den ersten Schritt der Methode zur operativen Produktionsplanung eingegangen.

### 8.3 Automatisierte Einschränkung des Wertebereichs der Risikoträger

In Kapitel 6 wurde ein Vorgehen zur Quantifizierung und Aggregation der verschiedenen Risikofaktoren hinsichtlich ihrer Wirkung auf die einzelnen Risikoträger vorgestellt. Die Quantifizierung der Risikofaktoren und ihrer Wirkung dient als Grundlage für die Einschränkung des Wertebereichs des Risikoträgers anhand der aktuellen Risikosituation in der Produktion. Zur Einschränkung des Wertebereichs der relevanten Risikoträger ist eine vergleichende Risikobeurteilung durchzuführen. Hierfür wird zunächst eine Beurteilung der zum Planungszeitpunkt aktuellen Risikosituation in der Produktion anhand verschiedener Risikoparameter vorgenommen. Die für die aktuelle Situation ermittelte Risikoeinschätzung wird in einem nächsten Schritt mit den Kenngrößen früherer Risikosituationen verglichen. Anhand einer Zuordnung der aktuellen Risikoeinschätzung zu ihren Kenngrößen nach vergleichbaren Risikosituationen aus der Vergangenheit lässt sich nun vergleichend der situationsgerechte Wertebereich des jeweiligen Risikoträgers in der aktuellen Risikosituation bestimmen. Auf den so ermittelten Wertebereich ist

### 8.3 Automatisierte Einschränkung des Wertebereichs der Risikoträger

der jeweilige Risikoträger für die weiteren Schritte der Plangenerierung einzuschränken. Somit erfolgt die Berücksichtigung des Risikos bei der Generierung des Produktionsplans anhand situationsgerechter Planwerte der Risikoträger. Planwerte, die angesichts der aktuellen Produktionssituation für die Planung von vorneherein nicht in Betracht kommen, werden effektiv ausgesondert.

Die aktuelle Beurteilung der Produktion basiert auf der Ausprägung der für die Produktionsplanung relevanten Kennzahlen sowie einer darauf aufbauenden Klassifizierung. Solche relevanten Kennzahlen sind in Tabelle 8-1 beispielhaft zusammengefasst und können in Abhängigkeit von ihrer Auswirkung einzelnen Risikoträgern zugeordnet werden. Relevant sind in diesem Zusammenhang die Auswirkungen auf die für diese Arbeit betrachteten Risikoträger der Planungsphasen Losgrößen-, Kapazitäts- und Reihenfolgeplanung.

*Tabelle 8-1: Übersicht möglicher Kennzahlen zur Beurteilung der Risikosituation*

Nr.	Kennzahl	Art	Einheit/ Dimension	Wertebereich	Planungsphase	Risikoträger
1	Hauptnutzungszeit (HNZ)	Absolutzahl	h	[0;∞]	Reihenfolge	Bearbeitungszeit
2	Planbelegungszeit (PBZ)	Absolutzahl	h	[0;∞]	Reihenfolge	Bearbeitungszeit
3	Mittlere Lieferterminabweichung	Absolutzahl	h	[0; ∞]	Reihenfolge	Bearbeitungszeit
4	Durchsatz	Verhältniszahl	$\frac{Stk.}{h}$	[0;∞]	Reihenfolge	Bearbeitungszeit
5	Effektivität	Verhältniszahl	%	[0;100]	Kapazität	Schichtanzahl
6	Nutzgrad	Verhältniszahl	%	[0;100]	Kapazität	Schichtanzahl
7	OEE-Index	Verhältniszahl	%	[0;100]	Kapazität	Schichtanzahl
8	Verfügbarkeit	Verhältniszahl	%	[0;100]	Losgröße	Rüstzeit
9	Qualitätsrate	Verhältniszahl	%	[0;100]	Kapazität	Schichtanzahl

Die Klassifizierung der Risikosituation erfolgt anhand einer Analyse der Ausprägungen der unternehmensspezifisch als relevant festgelegten Kennzahlen auf Basis historischer Daten. Dazu werden mittels AGNES-Clusterverfahren verschiedene Klassen von Risikosituationen festgelegt. Die Festlegung erfolgt anhand der Ausprägung der Kennzahlen zur Beurteilung der Risikosituation. Der verwendete

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

---

Algorithmus ist ein hierarchisch agglomeratives Verfahren. Zu Beginn bildet jede Situation mit ihren relevanten Kennzahlen, welche den Merkmalen entsprechen, ein eigenes Cluster. Anschließend erfolgt eine kontinuierliche Zusammenfassung bis keine weitere Zusammenfassung der Klassen mehr möglich ist (RUNKLER 2010). Die Ähnlichkeit von Situationen wird über sog. Distanzmaße bestimmt, welche den Abstand zwischen zwei Merkmalen bilden. Zur Bestimmung der Distanz  $d$  zwischen zwei Punkten können unterschiedliche Maße verwendet werden. Für die Klassifizierung der Risikosituation wird die Distanz der Merkmale über die quadrierte Euklidische Distanz bestimmt. Diese berechnet sich gemäß Formel (8-1):

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (8-1)$$

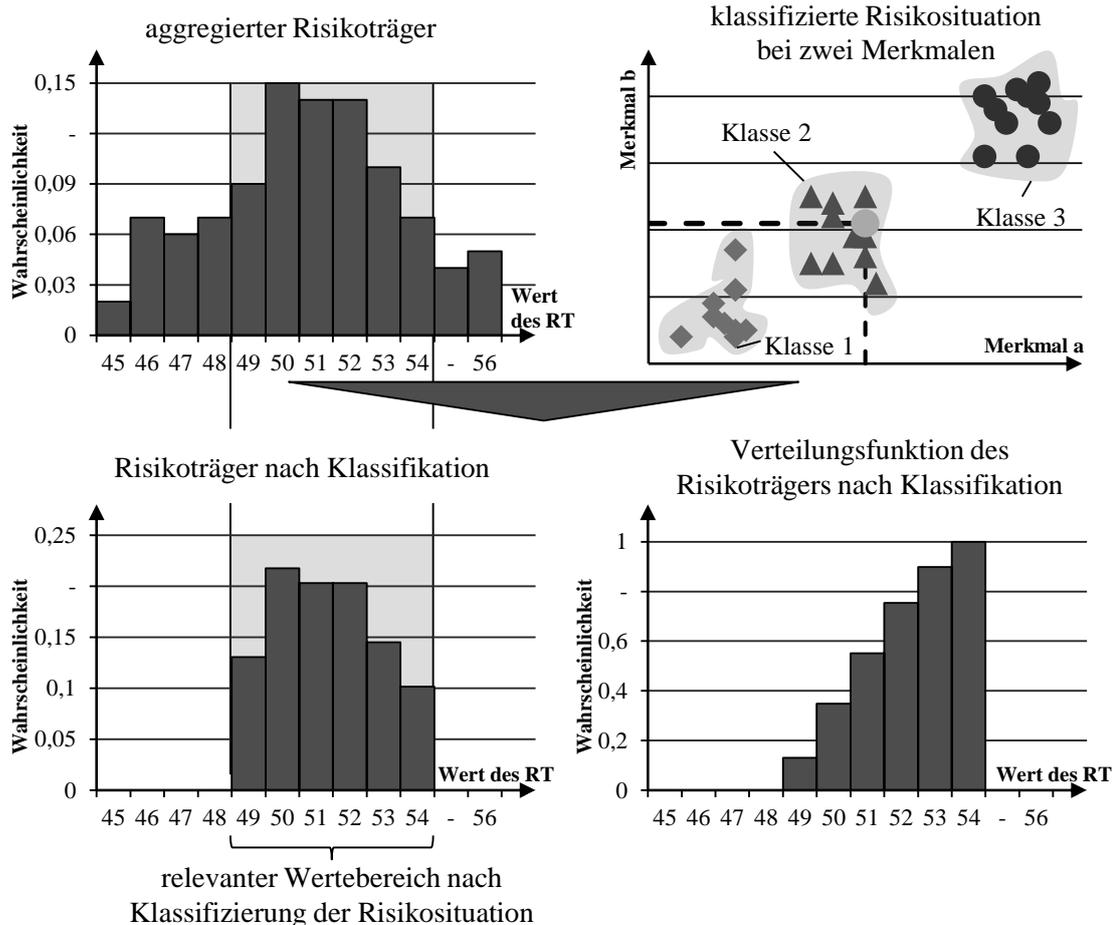
mit  $d(x, y)$  Distanz der Variablen

$n$  Anzahl der Merkmale

$x_i, y_i$  Wert der i-ten Variable

Nach der Klassifizierung der historischen Risikosituationen muss auch die aktuelle Risikosituation einer Klasse zugeordnet werden, um den Wertebereich des Risikoträgers einschränken zu können (s. *Abbildung 8-2*). Hierzu wird die Klasse ausgewählt, die den geringsten Abstand zur aktuellen Risikosituation hat. Basierend auf dieser Zuordnung findet eine Einschränkung des Wertebereichs des betrachteten Risikoträgers statt. Durch diese Einschränkung ist für die möglichen Werte des Risikoträgers für den Planungszeitpunkt ein bestimmter Bereich vorgegeben. Auch hierfür können die relevanten charakteristischen Größen wie Erwartungswert und Varianz des mit Unsicherheit behafteten Risikoträgers berechnet werden.

Die dem Produktionsplaner eigene Risikopräferenz wird im nächsten Schritt dazu verwendet, den möglichen Wertebereich eines Risikoträgers weiter einzuschränken, sodass ein Planwert als Inputgröße für die Produktionsplanung ermittelt werden kann. Ist aufgrund einer nicht ausreichend großen Datenmenge keine Einschränkung des Wertebereichs möglich, so sind alle Werte des Risikoträgers als zulässig anzusehen und im nächsten Schritt für die Parametrierung zu verwenden. Die finale Parametrierung der relevanten Risikoträger durch Integration der Risikopräferenz wird im nächsten Abschnitt dargestellt.



### Legende

- ◆ : Klasse 1 (RT = 44 - 52)
  - ▲ : Klasse 2 (RT = 49 - 54)
  - : Klasse 3 (RT = 51 - 60)
  - : aktuelle Risikosituation
- RT : Risikoträger

Abbildung 8-2: Eingegrenzter Wertebereich eines Risikoträgers

## 8.4 Parametrierung der Risikoträger

Zur Festlegung des Werts des Risikoträgers wird zuerst eine Entscheidungsregel für die Produktionsplanung ausgewählt, welche es erlaubt die Risikopräferenz bei der Bestimmung des Risikoträgerwerts zu berücksichtigen.

### Risikopräferenz in der Produktionsplanung

Risikopräferenzen sind bereits grundlegender Bestandteil von Untersuchungen in der Entscheidungstheorie. Auf diesem Gebiet haben sich daher bereits unterschiedliche Kriterien zur Berücksichtigung der Risikopräferenz in Entscheidungssituationen etabliert (LAUX ET AL. 2018). Mögliche Entscheidungskriterien werden im

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

---

folgenden Abschnitt kurz erläutert und anschließend auf ihre Eignung für die Produktionsplanung untersucht.

Häufig wird der Erwartungswert eines Ergebnisses als Entscheidungskriterium verwendet. Bei der Entscheidung nach der Erwartungswert-Regel (auch „ $\mu$ -Regel“ genannt) wird die Alternative ausgewählt, welche den maximalen Erwartungswert hat. Diese Entscheidungsregel ist eine einfache und bekannte Entscheidungsregel, die auch oft in betriebswirtschaftlichen Entscheidungsmodellen Anwendung findet. Nichtsdestotrotz gibt es auch Kritik an der  $\mu$ -Regel als Prinzip der Alternativenbestimmung in Entscheidungssituationen. Durch die alleinige Konzentration auf den Erwartungswert wird das Risiko einer Alternative, welches durch die Standardabweichung ausgedrückt werden kann, nicht berücksichtigt. (LAUX ET AL. 2018)

Das  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzip, als Entscheidungsprinzip, integriert neben dem Erwartungswert auch die Standardabweichung in die Entscheidung für eine Alternative. Durch die Berücksichtigung der Standardabweichung wird das Risiko berücksichtigt. Das  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzip ist nur ein Entscheidungsprinzip und keine Entscheidungsregel. Es ist durch den Anwender individuell festzulegen, welche Form die Präferenzfunktion des  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzips haben soll. Erst durch die Bestimmung der Verrechnung von Erwartungswert und Standardabweichung wird aus dem Entscheidungsprinzip eine Entscheidungsregel. Beispielhaft für eine Entscheidungsregel entsprechend des  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzips, ist folgende Präferenzfunktion gemäß Formel (8-2):

$$\text{Max } \Phi_i(\mu, \sigma) = \mu(a_i) - \rho * \sigma(a_i) \quad (8-2)$$

- mit
- $a_i$  Alternative i
  - $\mu(a_i)$  Erwartungswert der Alternative i
  - $\sigma(a_i)$  Standardabweichung der Alternative i
  - $\Phi_i$  Präferenzwert der Alternative i
  - $\rho$  Risikoaversionsparameter

Die Ausprägung des Risikoaversionsparameters und somit die Art der Standardabweichung lässt einen Rückschluss auf die Risikoeinstellung des Entscheiders zu. Ist der Risikoaversionsparameter negativ, kann der Entscheider als risikoaffin bezeichnet werden. Er misst einer Alternative mit gleichem Erwartungswert aber hö-

herer Standardabweichung einen höheren Wert zu als einer vergleichbaren Alternative mit geringerer Standardabweichung. Entsprechend entgegengesetzt verhält es sich mit Risikoaversionsparametern die größer null sind. Sie repräsentieren risikoaverse Entscheider. Ist der Risikoaversionsparameter gleich null, wird das Risiko nicht berücksichtigt und die Präferenzfunktion des Entscheidungswert-Varianz-Kriteriums entspricht der Erwartungswert-Regel. Der Entscheider ist somit risikoneutral. (LAUX ET AL. 2018)

Im Rahmen des Systems zur operativen Produktionsplanung soll die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers berücksichtigt werden. Dazu muss ein Entscheidungskriterium für dieses System die Risiken der alternativen Auswahlmöglichkeiten in die Entscheidungsregel integrieren. Weiterhin ist für die Akzeptanz des Entscheidungsprinzips durch den Entscheidungsträger eine einfache Nachvollziehbarkeit von Bedeutung. Diese Anforderungen werden durch das  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzip erfüllt, welches daher als Entscheidungsprinzip für die operative Produktionsplanung geeignet ist. Hierzu muss noch die Gestalt der Entscheidungsregel festgelegt werden. Dabei wird Formel (8-2) als Berechnungsvorschrift des Präferenzwerts einer Alternative festgelegt. Somit kann anhand des  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzips der Wert des Risikoträgers als Planungsparameter gemäß der Risikopräferenz des Entscheiders ausgewählt werden. Die Ausprägung des Faktors  $\rho$  wird dabei durch die Risikopräferenz des Entscheiders festgelegt.

Dazu bedarf es einer Zuordnung der RPK des Entscheidungsträgers zu Werten des Risikoaversionsparameters  $\rho$ . Prinzipiell ist zwischen risikoaversen, risikoneutralen und risikoaffinen Entscheidern zu differenzieren. Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt dargestellt entspricht das  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzip der  $\mu$ -Regel, wenn  $\rho=0$  gewählt wird. In diesem Fall werden keine Risiken berücksichtigt. Ein risikoneutraler Entscheider wird durch den Risikoaversionsparameter  $\rho=0$  in der Präferenzfunktion repräsentiert. Ihm wird die RPK drei zugeordnet (vgl. Abschnitt 7.2). Für die Zuordnung der RPK eins und zwei bzw. vier und fünf zu Werten des Risikoaversionsparameters größer bzw. kleiner null ist eine Differenzierung der Werte des Risikoaversionsparameters notwendig.

Der Betrag des Risikoaversionsparameters  $\rho$  ist nicht beschränkt, er kann also theoretisch jeden Wert annehmen. Für eine Verwendung im Rahmen der Präferenzwertbestimmung von Alternativen in der Produktionsplanung bedarf es jedoch einer Beschränkung. Für den Wertebereich des Risikoaversionsparameters wird das Intervall zwischen minus eins und eins festgelegt, um im Rahmen der Produkti-

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

onsplanung Alternativen auswählen zu können. Ist ein Entscheider also sehr risikoavers bzw.-affin wird der Risikoaversionsparameter mit eins bzw. minus eins festgesetzt. In diesem Fall wird der gesamte Wert der Standardabweichung als Maß für das Risiko berücksichtigt und hat somit den stärksten Einfluss auf den Präferenzwert der Alternative. Die RPK zwei und vier werden durch einen Risikoaversionsparameter in Höhe von 0,5 berücksichtigt, mit dem jeweiligen Vorzeichen für Risikoaversion (positiv) bzw. –affinität (negativ). Die Risikoaversionsparameter und ihr jeweiliger Wert, abhängig von der Risikopräferenz, können Tabelle 8-2 entnommen werden.

Tabelle 8-2: Zuordnung von RPK zu Werten des Risikoaversionsparameters des Entscheidungsprinzips

Risiko-präferenzklasse	1	2	3	4	5
Beschreibung	sehr risikoavers	risikoavers	risikoneutral	risikoaffin	sehr risikoaffin
Risikoaversionsparameter $\rho$	1	0,5	0	-0,5	-1

Die Zuordnung der RPK zu Risikoaversionsparametern erlaubt eine Berücksichtigung der Risikopräferenz in der operativen Produktionsplanung.

### Festlegung der Werte der Risikoträger

Der Planwert des Risikoträgers wird auf Basis der Entscheidungsregel unter Berücksichtigung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers festgelegt. Dazu bedarf es einer Normierung des Risikopräferenzparameters des Produktionsplaners auf den Wertebereich des zuvor eingeschränkten Risikoträgers anhand der Zuordnung zu einer Klasse (vgl. Abschnitt 8.3).

Die Risikopräferenz wird über den Risikopräferenzparameter  $\rho$  in der Entscheidungsregel abgebildet. Ein negativer Wert steht für Risikoaffinität, ein positiver für Risikoaversion. Risikoaversion bedeutet für die Festlegung des Werts für den Risikoträger, dass ein Wert für den Risikoträger zu wählen ist, welcher mit einer möglichst hohen Wahrscheinlichkeit, die meisten möglichen Werte eines Risikoträgers beinhaltet. Dazu werden der Erwartungswert des Risikoträgers und die Varianz herangezogen. Diese beiden Werte und die ermittelte Risikopräferenz werden in die Formel der Entscheidungsregel (vgl. Formel (8-2)) eingesetzt. Daraus

## 8.5 Berechnung des Produktionsplans unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

ergibt sich der Wert des Risikoträgers, welcher für die Planung im nächsten Schritt verwendet werden kann (s. Abbildung 8-3).

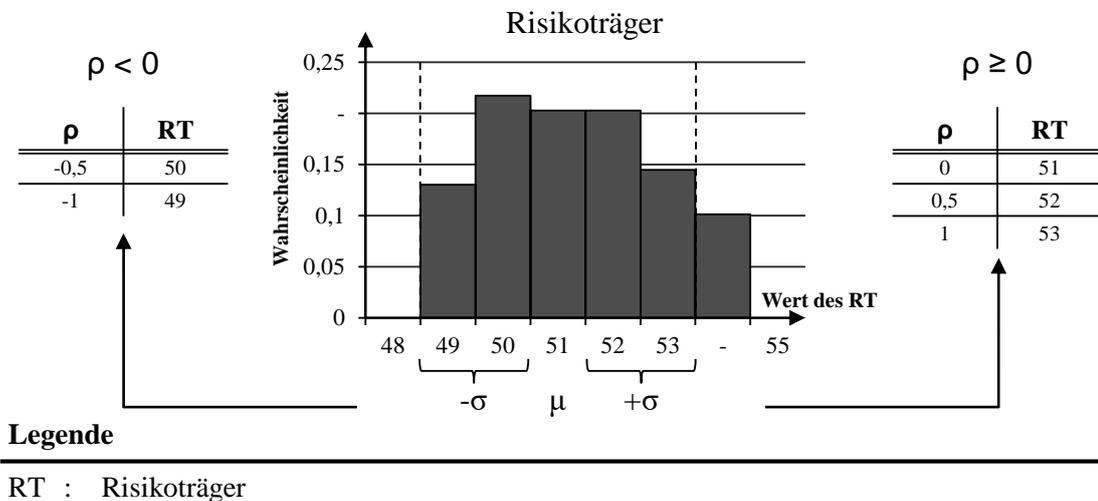


Abbildung 8-3: Werte des Risikoträgers nach der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers

Nach der Festlegung der Werte des Risikoträgers wird im folgenden Abschnitt 8.5 die Berechnung des Produktionsplans unter Berücksichtigung der Risikopräferenz vorgestellt.

## 8.5 Berechnung des Produktionsplans unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

Um eine automatisierte Einplanung der Aufträge zur Unterstützung des Produktionsplaners vor Ort zu ermöglichen, wird das Planungsproblem mathematisch formuliert und anschließend ein Verfahren ausgewählt, das die Lösung des Optimierungsproblems ermöglicht. Im Folgenden wird die Problemformulierung vorgestellt und das eingesetzte Verfahren zur Lösung dargelegt.

In dieser Arbeit wird für die stochastische Programmierung eine proaktive Methode verfolgt. Für eine umfassende Einführung in das Thema sei auf KALL & WALLACE (1997) verwiesen. Zufallsparameter beeinflussen die Entscheidungen während der Produktionsplanung, sind aber zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung noch unbekannt, weshalb sie als Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt werden.

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

---

Im Rahmen des hier betrachteten Ansatzes zur Berücksichtigung der Risikopräferenz ist eine stochastische Problemformulierung für das Optimierungsproblem notwendig. Daher werden nachfolgend die Zielfunktion der Problemstellung und anschließend die Nebenbedingungen dargestellt.

Es gibt verschiedene Ansätze, um ein solches stochastisches Entscheidungsproblem in ein lineares deterministisches Problem zu überführen. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Technik der Regressmodellierung.

Ein Regressproblem erzeugt ein deterministisches Äquivalent durch Anwendung eines zwei- oder mehrstufigen stochastischen Regressmodells, das einem linearen Programm ähnlich ist (KALL & WALLACE 1997). Es wird eine Regressvariable eingeführt, die die Constraintverletzung aufgrund des zufällig eingetretenen Ereignisses bewertet. Das Ereignis wird durch den Zufallsparameter repräsentiert. Da die Regressvariable von dem Zufallsfaktor abhängt, wird sie selbst zu einer Zufallsvariablen. Der Wert der Regressvariablen wird durch die Festlegung der Parameter auf der ersten Stufe und das eingetretene Szenario bestimmt. Der Wert der Regressvariablen beschreibt das Ausmaß der Constraintverletzung. Das Ziel ist es anschließend, die Gesamtkosten der Lösung des Grundmodells (erste Stufe) mit zusätzlichen Kosten zu erhöhen, wenn die betrachtete Nebenbedingung verletzt wird (zweite Stufe). Auf diese Weise optimiert das Modell einen Erwartungswert der Kosten, der sich aus dem Ergebnis der ersten Stufe und den minimierten Regresskosten zusammensetzt (KALL & WALLACE 1997, GEBHARD 2009).

Die Implementierung eines Modells zur Constraintprogrammierung (CP) ist am besten geeignet, um die Vielzahl an Inputdaten zu handhaben und Unsicherheiten zu berücksichtigen. Die CP ist ein Programmierparadigma zur Lösung komplexer kombinatorischer Probleme. Die Eigenschaften ermöglichen eine effiziente Lösungssuche und reduzieren den dafür notwendigen Rechenaufwand. Das Grundprinzip basiert auf der Definition von Beschränkungen (engl. Constraints), die innerhalb eines Constraint Satisfaction Problems (CSP) gelöst werden (HOFSTEDT & WOLF 2007, ROSSI ET AL. 2008, MALAPERT ET AL. 2012).

Ein CSP besteht aus einem Satz potenzieller Werte, die von jeder Variablen genommen werden können, genannt Variablendomäne, und einer Reihe von Einschränkungen, die die Variablen miteinander verbinden, sog. Constraints. Eine gültige Lösung für ein CSP ist die Zuweisung eines Wertes der Domäne an jede Variable unter Einhaltung der Beschränkungen. Um die Vorteile von CP zu nutzen, wird eine Kombination verschiedener Techniken eingesetzt. Ein wesentliches Merkmal ist die Constraint-Propagierung, die darauf abzielt, Constraints aktiv im

## 8.5 Berechnung des Produktionsplans unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

---

Lösungsprozess zu nutzen. Durch Constraint-Propagierung wird nicht nur die Gültigkeit eines Modells nachgewiesen, sondern es werden auch ungültige Werte aus der Variablen-domäne entfernt (Domain-Reduktion) sowie Inkonsistenzen aufgedeckt (BAPTISTE ET AL. 2001). Die Ausweitung von Beschränkungen reduziert die Größe der Variablen-domänen und überträgt die Informationen auf andere Beschränkungen. In dieser Form werden die Informationen über das gesamte Constraintnetzwerk verteilt, was den Suchraum für die Lösung einschränkt (ROSSI ET AL. 2008).

Das folgende Beispiel stellt diesen Ansatz beispielhaft dar. Unter Berücksichtigung der zwei Entscheidungsvariablen  $x \in \{5, \dots, 12\}$  und  $y \in \{2, \dots, 17\}$  sowie der beiden Formeln (8-3) und (8-4)

$$x + y = 17 \text{ und} \tag{8-3}$$

$$x - y = 5; \tag{8-4}$$

können die folgenden Vereinfachungen getroffen werden:

Unter der Annahme, dass  $y = 17$  ist, wird  $x = 5$  gewählt. Da aber dieser Wert für  $x$ , Gleichung (8-3) verletzt, kann  $y$  nicht 17 sein und wird als mögliche Lösung gestrichen. Ähnlich kann mit den Zahlen 16,15,14 und 13 verfahren werden. Auf die gleiche Art und Weise können auch die möglichen kleinsten  $y$ -Werte eingeschränkt werden. So kann der Wertebereich initial auf  $x \in \{5, \dots, 12\}$  und  $y \in \{5, \dots, 12\}$  angepasst werden. (IBM 2020)

Neben der Domänenreduktion wird durch Constraint-Propagierung auch die Konsistenz von Variablen untersucht. Eine Variable ist lokal konsistent, wenn alle anderen Variablen Werte annehmen können, welche die Randbedingungen erfüllen (ROSSI ET AL. 2008). CP verwendet das Verfahren des Backtracking, wenn inkonsistente Variablen erkannt werden. Dabei wird bis zu dem letzten gültigen Wert zurückgegangen, der der Variablen zugewiesen wurde, um die Verletzung der Beschränkung aufzulösen.

Im Gegensatz zur lokalen Inkonsistenz werden global inkonsistente Variablen nicht immer identifiziert. Globale Inkonsistenz herrscht, wenn mehr als eine Einschränkung durch den Wert der Variablen verletzt wird. Globale Einschränkungen erstrecken sich über eine Sequenz von Variablen und nutzen Informationen aus Teilproblemen, um weitere Inkonsistenzen im Modell aufzudecken (ROSSI ET AL. 2008, MALAPERT ET AL. 2012). Im Folgenden wird das Optimierungsproblem des betrachteten Produktionsplanungsproblems als Constraint-System formuliert.

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

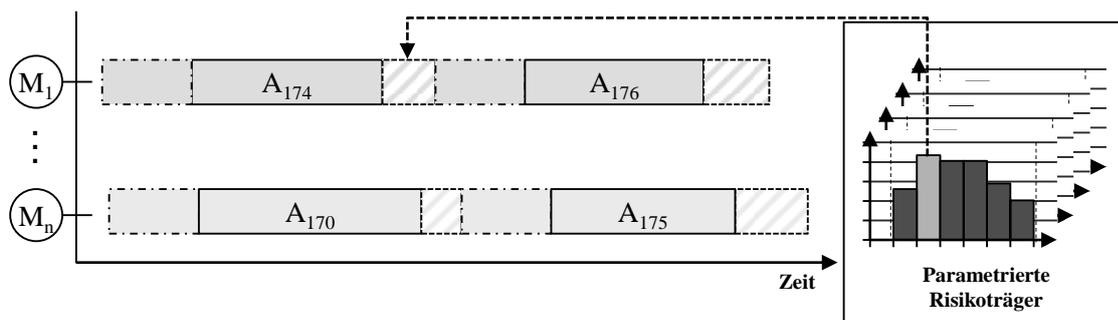
### Zielfunktion des Produktionsplanungsmodells

Ziel des Planungsmodells ist die zeitminimale und somit kostenminimale Festlegung der Produktionsaufträge. Die Zielfunktion setzt sich aus den Rüst-, Bearbeitungs- und Verspätungskosten in der jeweiligen betrachteten Planungsperiode zusammen. Werden Aufträge vor dem geplanten Liefertermin fertiggestellt, entstehen Kosten welche im Term der Verspätungskosten berücksichtigt werden. Ziel ist somit die Minimierung der in Formel (8-5) dargestellten Kostenfunktion.

$$\min. K^{Ges} = K^B + K^R + K^V \quad (8-5)$$

mit  $K^{Ges}$  Gesamtkosten der Fertigung  
 $K^B$  Bearbeitungskosten  
 $K^R$  Rüstkosten  
 $K^V$  Verspätungskosten

Das Ergebnis der Lösung des Minimierungsproblems für die Reihenfolgeplanung sei beispielhaft in der nachfolgenden Abbildung 8-4 dargestellt. Dieser ist zu entnehmen, dass jedem Bearbeitungszeitanteil auf einer Maschine ein risikospezifischer Anteil der Bearbeitungszeit hinzuaddiert wird. Die Länge dieses Zeitanteils ist das Ergebnis Parametrierung des Risikoträger. Diese beruht sowohl auf der aktuellen Risikosituation sowie der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers.



#### Legende

	: Standardbearbeitungszeitanteil		: Rüstzeitanteil
	: Risiko und präferenzspezifischer Bearbeitungszeitanteil		: Maschine x

Abbildung 8-4: Beispielhafte Darstellung des Ergebnisses der Reihenfolgeplanung

## 8.5 Berechnung des Produktionsplans unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

---

Zur besseren Lesbarkeit werden vor der detaillierten Darstellung der einzelnen Kostenfaktoren relevante Variablen in Tabelle 8-3 eingeführt, welche für alle in diesem Abschnitt dargestellten Terme gültig sind:

*Tabelle 8-3: Übersicht der für die Funktionsterme verwendeten Variablen*

<b><i>Parameter</i></b>	
$A$	Menge A der möglichen Kombinationen von Maschinen und Aufträgen
$J = \{1, \dots, J_{\max}\}$	Menge einzuplanender Aufträge J
$M = \{1, \dots, M_{\max}\}$	Menge zur Verfügung stehender Maschinen M
$T$	Menge an Zeiteinheiten der betrachteten Planungsperiode T
$\xi \in \Xi$	Menge der Szenarien der Werkzeugverfügbarkeit $\Xi$
$\theta \in \Theta$	Menge der Szenarien der Wartungsdauer $\Theta$
$jc_a$	Mögliche Zuordnung von Aufträgen j zu Maschinen in Tupel A
$mc_a$	Mögliche Zuordnung von Maschinen m zu Aufträgen in Tupel A
$\omega_{\xi}^j$	Wahrscheinlichkeit von Szenario $\xi$ für Auftrag j
$\omega_{\theta}^m$	Wahrscheinlichkeit $\omega$ von Szenario $\theta$ auf Maschine m
<b><i>Entscheidungsvariablen</i></b>	
$y_j(\xi, \theta)$	Dauer des Auftrags j in Szenarien $\xi$ und $\theta$
$x_{am}(\xi, \theta)$	Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen m in Szenarien $\xi$ und $\theta$
$seq_m(\xi, \theta)$	Reihenfolge der Aufträge auf Maschine m in Szenarien $\xi$ und $\theta$

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

---

### Bearbeitungskosten

Die Bearbeitungskosten  $K^B$ , die sich durch die Bearbeitung eines Auftrags ergeben, setzen sich gemäß Formel (8-6) aus verschiedenen Komponenten zusammen:

$$K^B = \sum_{m \in M} cm_m * \left( \sum_{j \in J} \sum_{\xi \in \Xi} \sum_{\substack{a \in A: \\ jc_a=j \\ mc_a=m}} \sum_{\theta \in \Theta} \omega_{\xi}^j * \omega_{\theta}^m * (sizeOf(x_{am}(\xi, \theta))) \right) \quad (8-6)$$

mit  $cm_m$  Maschinenstundensatz je Maschine  $m$

$sizeOf(x_{am}(\xi, \theta))$  Bearbeitungszeit des Auftrags  $j$  auf Maschine  $m$  der Szenarien  $\xi$  und  $\theta$

### Rüstkosten

Die Rüstkosten  $K^R$  ergeben sich aus der Dauer des Rüstvorgangs sowie den Maschinenkosten nach Formel (8-7):

$$K^R = cs_m * \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{\xi \in \Xi} \sum_{\substack{a \in A: \\ jc_a=j \\ mc_a=m}} \sum_{\theta \in \Theta} \omega_{\xi}^j * \omega_{\theta}^m * sv_m(\xi, \theta) \quad (8-7)$$

mit  $cs_m$  Rüstkostensatz für Maschine  $m$

$sv_m(\xi, \theta)$  Sequenzvariable  $sv$  für Maschine  $m$  in Abhängigkeit der Szenarien  $\xi$  und  $\theta$

Die Sequenzvariable  $sv_m(\xi, \theta)$  stellt sicher, dass Rüstkosten nur berücksichtigt werden, wenn zwei Aufträge direkt hintereinander auf einer Maschine bearbeitet werden und dadurch ein Werkzeugwechsel notwendig wird.

### Verspätungskosten

Die Kosten für eine zu späte Fertigstellung eines Auftrags ergeben sich aus den Kosten, die im nachgelagerten Produktionsschritt mangels pünktlicher Bereitstellung der Bauteile entstehen können. Das sind bspw. Ausfallkosten, weil der nachfolgende Montageschritt unterbrochen werden muss, um auf die noch nicht fertig

## 8.5 Berechnung des Produktionsplans unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

gestellten Teile zu warten. Aber auch eine Fertigstellung der Bauteile vor dem geplanten Liefertermin führt zu einer Erhöhung der Kosten, da die Bauteile ungeplant gelagert werden müssen. Diese Zusammenhänge sind durch die Verspätungskosten  $K^V$  berücksichtigt und setzen sich wie folgt (s. Formel (8-8)) zusammen:

$$K^V = \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{\xi \in \Xi} \sum_{\substack{a \in A: \\ jc_a = j \\ mc_a = m}} \sum_{\theta \in \Theta} \omega_{\xi}^j * \omega_{\theta}^m * c_{ET,j}(\xi, \theta) \quad (8-8)$$

mit  $c_{ET,j}(\xi, \theta)$  Kosten für verspätete bzw. verfrühte Fertigstellung des Auftrags  $j$  in den Szenarien  $\xi$  und  $\theta$

### Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen garantieren, dass den Entscheidungsvariablen keine ungültigen Werte zugewiesen werden können. Sie sind in den Formeln (8-9) bis (8-14) spezifiziert (s. Tabelle 8-4).

Tabelle 8-4: Übersicht der Nebenbedingungen (Formeln (8-9) bis (8-14))

$noOverlap(seq_m(\xi, \theta), setup, 1)$	$\forall m \in M,$ $\forall \xi \in \Xi, \forall \theta \in \Theta$	(8-9)
$if(\xi > 0 \ \& \ \theta > 0)$	$\forall m \in M,$	(8-10)
$sameSequence(seq_m(1,1), seq_m(\xi, \theta))$	$\forall \xi \in \Xi, \forall \theta \in \Theta$	
$alternative(y_j(\xi, \theta), all$ $(a \in A: jc_a = j, m \in M: m = mc_a) x_{am}(\xi, \theta))$	$\forall j \in J, \forall \xi \in \Xi,$ $\forall \theta \in \Theta$	(8-11)
$y_j(\xi, \theta) \geq 0$	$\forall j \in J, \forall \xi \in \Xi,$ $\forall \theta \in \Theta$	(8-12)
$x_{am}(\xi, \theta) \geq 0$	$\forall a \in A, \forall m \in M,$ $\forall \xi \in \Xi, \forall \theta \in \Theta$	(8-13)
$seq_m(\xi, \theta) \geq 0$	$\forall m \in M, \forall \xi \in \Xi,$ $\forall \theta \in \Theta$	(8-14)

## 8 Methode zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung des Risikos

---

Die Bedingung in Formel (8-9) stellt sicher, dass die auf einer Maschine eingeplanten Aufträge sich nicht überlappen. Des Weiteren wird durch diese Bedingung sichergestellt, dass Rüstkosten bei zwei aufeinander folgenden Aufträgen eingeplant werden.

Im Hinblick auf die stochastische Optimierung sind Sequenzvariablen Variablen der ersten Stufe, während Fertigstellungszeiten bzw. Verzögerungskosten Variablen der zweiten Stufe sind. Dass die Variablen der ersten Stufe für alle Szenarien gleichbleiben, gewährleistet Formel (8-10). Eine weitere Beschränkung aus Formel (8-11) stellt sicher, dass für jede Intervallvariable  $y_j(\xi, \theta)$  genau eine optionale Variable  $x_{am}(\xi, \theta)$  gefunden werden kann. Der Vollständigkeit halber werden die Formeln (8-12) bis (8-14) für die Integrität und Nicht-Negativität der Entscheidungsvariablen angegeben.

### 8.6 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde die Methode zur Produktionsplanung unter Berücksichtigung des operativen Risikos und der Risikopräferenz vorgestellt. Die Methode besteht aus den Bausteinen *Maßnahmen zur Berücksichtigung von Risiken* in der Produktionsplanung, *Risikopräferenz in der Produktionsplanung* und *operative Produktionsplanung*. Zur Berücksichtigung der Risikopräferenz wurde das  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzip ausgewählt, um die Alternative mit der höchsten Präferenz bestimmen zu können. Das  $\mu$ - $\sigma$ -Prinzip berücksichtigt über einen Risikoaversionsparameter, der aus der Risikopräferenzmessung abgeleitet werden kann, die am besten geeigneten Werte der Risikoträger für den Entscheidungsträger. Über die eingeführte Berechnungsvorschrift kann dem Entscheidungsträger eine Entscheidungsregel vorgegeben werden. Die aus diesen Methodenschritten zur Verfügung stehenden Parameter erlauben anschließend eine Berücksichtigung ebendieser während der operativen Produktionsplanung. Dazu wurde für die betrachteten Planungsphasen eine Zielfunktion formuliert.

## 9 Technische Umsetzung und Validierung

### 9.1 Übersicht

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz anhand eines konkreten Anwendungsfalls zu validieren. Dazu wird in Abschnitt 9.2 zunächst das Anwendungsbeispiel beschrieben. In Abschnitt 9.3 wird insbesondere die Anwendung der einzelnen Systembausteine erläutert. Im Anschluss daran erfolgt die simulationsbasierte Umsetzung und Validierung des Systems (vgl. Abschnitt 9.4). Abschließend wird in diesem Kapitel eine Bewertung des Systems in Bezug auf die in Abschnitt 4.2 abgeleiteten Anforderungen sowie hinsichtlich der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen vorgenommen (vgl. Abschnitt 9.5).

### 9.2 Beschreibung des betrachteten Produktionssystems

Für die prototypische Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz sowie für dessen simulationsbasierte Umsetzung wird der Produktionsprozess eines Haushaltsgeräteherstellers betrachtet. Im Fokus der Betrachtungen steht dabei der Umformprozess auf zwei hydraulischen Pressen. Auf diesen wird das Ausgangsmaterial in Form von Coils in mehreren Prozessschritten zu Bauteilen der Haushaltsgeräte umgeformt. Insgesamt werden auf den beiden Pressenanlagen 28 unterschiedliche Bauteile gefertigt.

#### Anwendungsszenario

Die Herausforderung des betrachteten Produktionsabschnitts besteht darin, den Kundenbedarf an Bauteilen termingerecht zu bedienen. Die Bauteile werden sowohl von internen (= nachfolgende Prozessschritte) als auch von externen Kunden aus dem Werksverbund (= andere Standorte) benötigt. Gleichzeitig gibt es ungeplante Maschinenstillstände auf beiden Pressen, v. a. aufgrund von Werkzeugstörungen, sodass häufig nicht mit der ursprünglich geplanten Kapazität produziert werden kann. In der Folge kann bei längeren Störungen der Kundenbedarf nicht gedeckt werden. Solche Maschinenausfälle werden aktuell durch den Produktionsplaner über eine manuelle Anpassung des Produktionsplans nachträglich berücksichtigt.

## 9 Technische Umsetzung und Validierung

Das System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz trägt in diesem Kontext dazu bei, die Planungsabläufe zu beschleunigen, indem bereits ein risikoorientierter Produktionsplan bereitgestellt wird. Zudem wird die durch den Produktionsplaner derzeit nur unbewusst in die Planungsentscheidung eingebrachte Risikopräferenz durch das entwickelte Vorgehen gemessen und explizit berücksichtigt. Die Berücksichtigung erfolgt durch die Anpassung der Risikoträger im Optimierungsmodell bei der Generierung des Produktionsplans. Dadurch wird eine hohe Akzeptanz des durch das System generierten Produktionsplans beim Produktionsplaner sichergestellt und in der Folge die Einhaltung der logistischen Zielgrößen verbessert.

### Produktionssystem

Das betrachtete Produktionssystem besteht aus den beiden hydraulischen Pressen sowie dem vorgelagerten Coillagerbereich zur Versorgung der Pressen mit dem benötigten Ausgangsmaterial. Ferner betrachtet werden das Werkzeuglager sowie das den Pressenanlagen nachgelagerte Bauteillager. Dieses dient als Zwischenlager für die Versorgung der sich anschließenden Montage sowie als Versandlager für Bauteile, die zu externen Kunden verschickt werden. Die beschriebenen Bereiche des Produktionssystems können der folgenden Abbildung 9-1 entnommen werden.

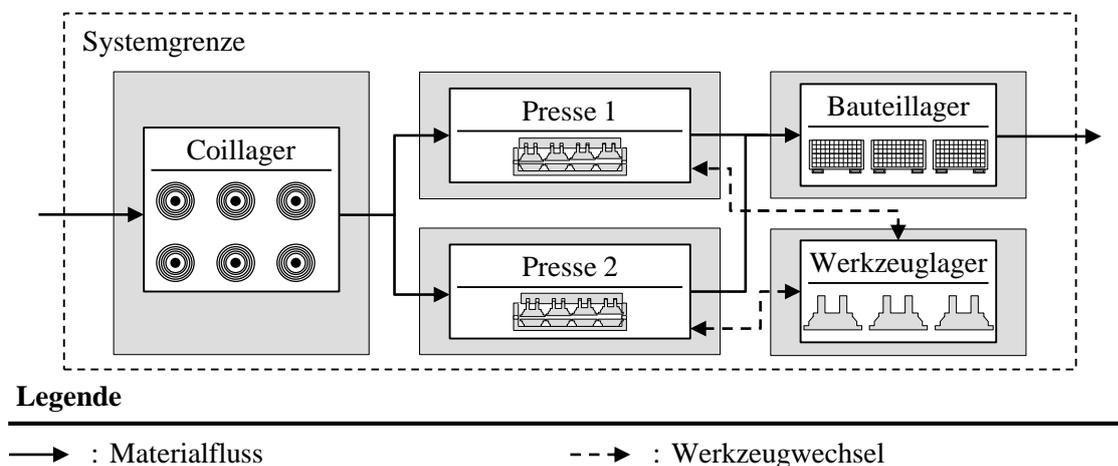
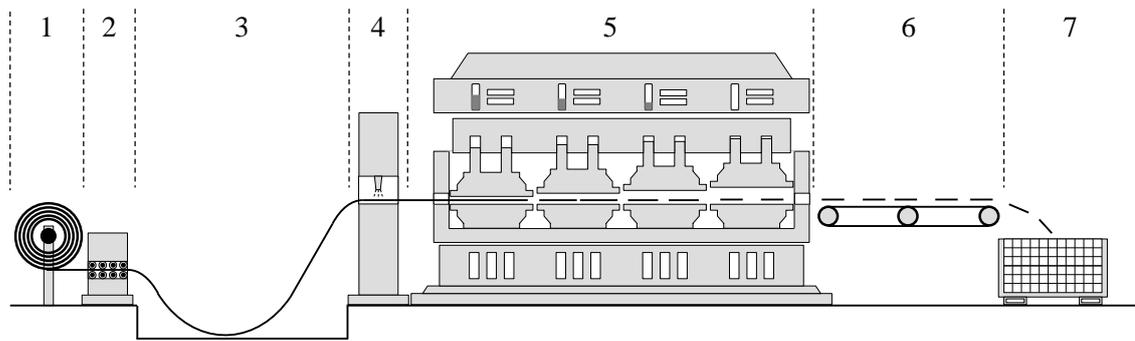


Abbildung 9-1: Betrachteter Produktionsabschnitt

Aus dem Coillager wird bei Bedarf, d. h. im Falle eines Produktwechsels auf der Anlage oder nach Verbrauch des vorherigen Coils, ein neues Coil mittels Kran in eine der beiden Pressenanlagen transportiert. Dort wird das Coil auf der sog. Coil-Haspel befestigt, von der kontinuierlich das Material vom Coil abgewickelt wird. Von der Coil-Haspel wird das Material über eine Ausrichtstation, eine

## 9.2 Beschreibung des betrachteten Produktionssystems

Schlaufengrube sowie eine Befettungsanlage in die Presse geführt. Die Schlaufengrube dient zum Ausgleich der Länge zwischen dem kontinuierlich abgewickelten Coil und dem mit einem diskreten Vorschub geförderten Material in der Presse. Die Umformung findet nach der Befettung des Materials in einem mehrstufigen Prozess statt. Anschließend wird das fertige Bauteil über ein Förderband in dafür vorgesehene Ladungsträger gefördert (s. Abbildung 9-2).



### Legende

1: Coil-Haspel	3: Schlaufengrube	5: Presse	7: Ladungsträger
2: Ausrichtstation	4: Befettungsanlage	6: Förderband	

Abbildung 9-2: Schematische Darstellung der Produktionsschritte in der Pressenanlage

Durch eine automatisierte Bauteilzählung wird bei Erreichen des Fassungsvermögens des Ladungsträgers über eine Weiche auf dem Förderband ein anderer Ladungsträger angesteuert. Die Bereitstellung der leeren Ladungsträger und der Abtransport der vollen Behälter zu speziellen Logistikflächen erfolgt manuell durch den Anlagenbediener. Der Weitertransport in das Bauteillager wird von eigens dafür verantwortlichen Mitarbeitern vorgenommen.

Es existiert eine feste Zuordnung von Bauteilen zu Werkzeugen. Nur in wenigen Ausnahmefällen können durch Umbauten am Werkzeug mehrere Produkte mit einem Werkzeug hergestellt werden. Ansonsten kann mit einem Werkzeug genau ein Produkt gefertigt werden. Auch existiert nur jeweils ein Werkzeug eines jeden Typs. Lediglich für die beiden mit der höchsten Stückzahl produzierten Bauteile existiert jeweils ein Ersatzwerkzeug. Die Werkzeuge sind größtenteils auch nur einer bestimmten Presse fest zugeordnet und können nicht auf der jeweils anderen Presse eingebaut werden.

### **Aktueller Ablauf der operativen Produktionsplanung**

Der operative Produktionsplan für die beiden Pressen wird derzeit manuell erstellt. Die Bedarfsprognose für die Montagelinie und die Fälligkeiten bestimmter Komponenten für die Versorgung externer Kunden sind bekannt. Der Produktionsplan wird für mehrere Wochen im Voraus generiert. Dabei werden die Verfügbarkeit der Werkzeuge, die Dringlichkeit der Aufträge sowie der vorhandene Lagerbestand vom Produktionsplaner manuell berücksichtigt. Informationen zu diesen Daten liegen vor. Unter diesen Randbedingungen besteht ein Entscheidungsspielraum des Verantwortlichen bei der Gestaltung des Produktionsplans. Die Nutzung des Gestaltungsspielraums bei der Ausgestaltung des Produktionsplans ist abhängig von der Erfahrung des Planers.

Nachdem ein Plan erstellt wurde, ist dieser für die Maschinenbediener an der Anlage bindend und wird nur bei schwerwiegenden Störungen angepasst. Eine explizite Berücksichtigung von Risiken findet bei der manuellen Planung nicht statt. Jedoch sind in den verwendeten Planzahlen durch Produktivitätsfaktoren implizit Maschinenstillstände und Werkzeugausfälle berücksichtigt.

Im Folgenden wird die Anwendung des entwickelten Systems im beschriebenen Anwendungsfall dargestellt.

### **9.3 Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz**

#### **9.3.1 Allgemeines**

Als Anwendungsfall des entwickelten Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz wird die reale, beschriebene Produktionsumgebung des Haushaltsgeräteherstellers herangezogen. Dazu werden bedarfsorientiert die einzelnen Schritte des entwickelten Systems durchlaufen. Es wird explizit darauf geachtet, bereits im Unternehmen vorhandene Vorarbeiten zu nutzen, um den Aufwand der Anwendung des entwickelten Systems für das Unternehmen so gering wie möglich zu halten. Zu solchen Vorarbeiten zählen bspw. bereits durchgeführte Systemmodellierungen oder erstellte Prozessschaubilder.

Die Anwendung der einzelnen Systemelemente wird in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert. Nach der Risikoidentifikation und Systemmodellierung (vgl. Abschnitt 9.3.2) erfolgt die Risikoquantifizierung und die Ermittlung der Risikopräferenz des Produktionsplaners (vgl. Abschnitt 9.3.3). Abschließend erfolgt die Anpassung des aufgezeigten Produktionsplanungsproblems (vgl. Abschnitt 8.5) an die Randbedingungen des Anwendungsfalls (vgl. Abschnitt 9.3.4).

### **9.3.2 Risikoidentifikation und Systemmodellierung**

Zur Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Beachtung der Risikopräferenz werden zunächst die vorhandenen Risiken im Unternehmen identifiziert.

Die Identifikation relevanter Risikofaktoren erfolgt nur für den zuvor beschriebenen Betrachtungsbereich. Dieser ist auf die beiden Umformprozesse der beiden Pressen, den direkt vorgelagerten Bereich Coillager und die sich anschließenden Bereiche Bauteil- und Werkzeuglager (vgl. Abschnitt 9.2) beschränkt. Nach der Festlegung des Betrachtungsbereichs erfolgt die Beschreibung des zu analysierenden Systems. Dabei kann auf bereits vorhandene Anlagenbeschreibungen zurückgegriffen werden. Im Übrigen wird die Prozessbeschreibung in Workshops zusammen mit den Experten durchgeführt. Die Identifikation der Risikofaktoren erfolgt dann ausgehend von der Modellierung des Produktionsabschnitts. Durch Brainstorming-Workshops mit den Prozessverantwortlichen können verschiedene Risikofaktoren identifiziert und charakterisiert werden:

Der Risikofaktor *Maschinenstörung* unterbricht den Produktionsablauf, kann aber kurzfristig durch den Anlagenbediener ohne weitere Unterstützung behoben werden. Der Risikofaktor *Maschinenausfall* hat einen relativ längeren Wirkhorizont, ist jedoch noch immer als kurzfristig einzuordnen. Die Behebung des Ausfalls einer Presse ist nur durch Instandhaltungspersonal möglich. Teilweise kann es während solcher schwerwiegenden Störungen auch notwendig werden, Um- und Ausbauten von Komponenten der Pressen vorzunehmen.

Die Risikofaktoren hinsichtlich des Werkzeugs können ähnlich wie bei Maschinen in *Werkzeugstörungen* und *-ausfälle* unterschieden werden. Auch hier kann bei einer Störung die Behebung direkt an der Anlage im eingebauten Zustand erfolgen. Tritt ein Ausfall auf, muss das Werkzeug ausgebaut und die Fehleridentifikation und -behebung im eigens dafür vorgesehenen Instandhaltungsbereich durchgeführt werden.

Ein weiterer Risikofaktor ist die *Materialqualität*, welche unzureichend sein kann. In diesem Fall steht nicht ausreichend Material für die Produktion zur Verfügung. Genauso verhält es sich mit dem Risikofaktor *Materialausfall*, wenn also Material nicht geliefert wurde. Nichtsdestotrotz werden die beiden Risikofaktoren im betrachteten Unternehmen einzeln erfasst, da es für die langfristige Behebung der Risiken einen Unterschied darstellt, welcher der beiden Risikofaktoren auftritt. Die beiden Risiken wirken mittelfristig auf die Losgröße. In der Losgrößenrechnung kann die Unsicherheit hinsichtlich der Menge des für die Produktion zur Verfügung stehenden Ausgangsmaterials am effektivsten berücksichtigt werden.

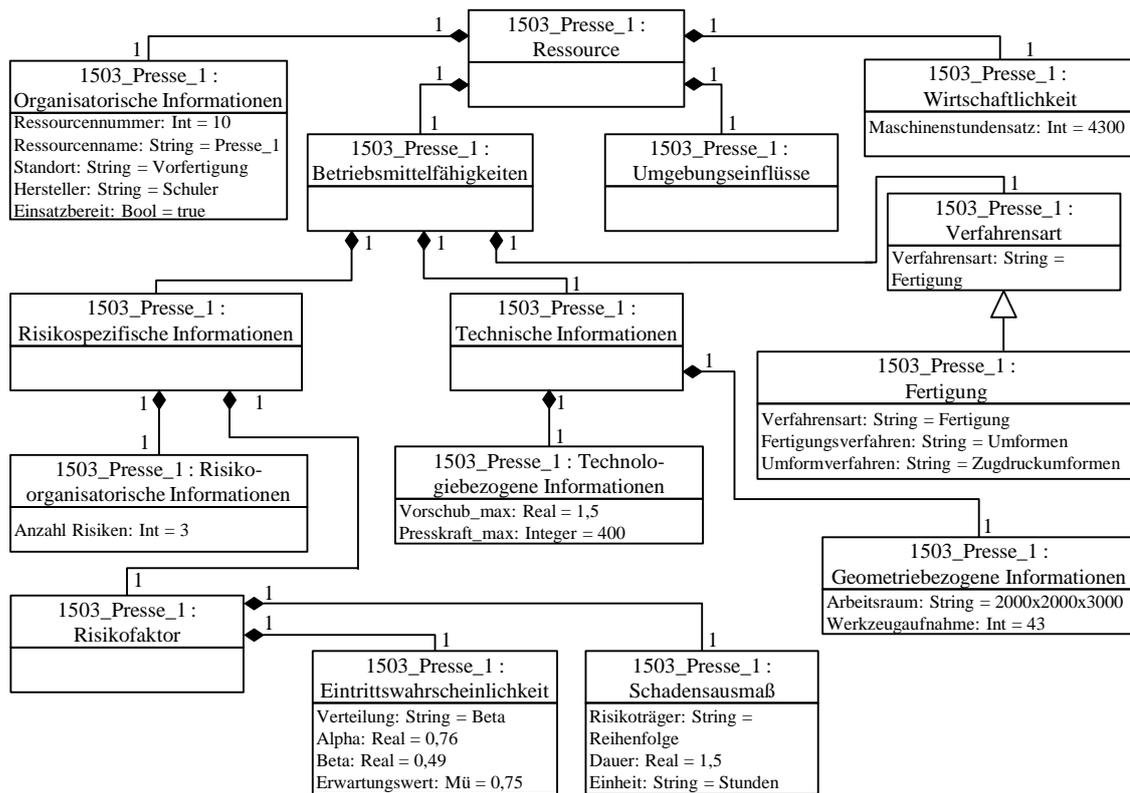
Ein weiterer identifizierter Risikofaktor ist der *Personalausfall*. Wenn Mitarbeiter an den Produktionsressourcen unerwartet ausfallen, hat dies vor allem kurzfristige Auswirkungen auf den Produktionsablauf. Ist der Ausfall längerfristig, kann dies zumeist durch Änderungen der Personaleinsatzplanung behoben werden und tritt somit nicht mehr als Risikofaktor in Erscheinung.

### **Ressourcenmodellierung**

Neben der Identifikation der Risiken ist vor allem auch eine Modellierung der Ressourcen und Aufträge notwendig, um eine operative Planung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz durchführen zu können. Dazu werden die verschiedenen Systembestandteile gemäß dem in Abschnitt 5.3.3 dargestellten Vorgehen modelliert. Exemplarisch wird die Modellierung anhand eines Ausschnitts des Ressourcenmodells einer Presse dargestellt (s. Abbildung 9-3).

Die für die Modellierung notwendigen Informationen werden aus unterschiedlichen Quellen bezogen. Grundlage für die Modellierung sind für die technischen Daten, z. B. Arbeitsraum, die Herstellerinformationen sowie für ablaufspezifische Informationen, z. B. Standort, Maschinenstundensatz, die betrieblichen Informationssysteme.

## 9.3 Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz



### Legende

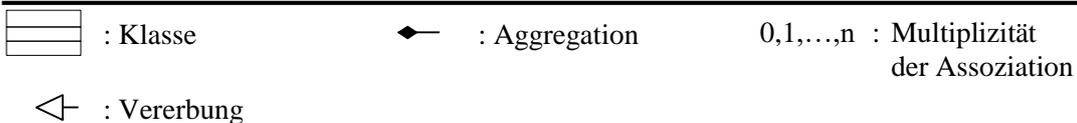


Abbildung 9-3: Ausschnitt der Ressourcenmodellierung von Presse 1 des Produktionsabschnitts

### Auftragsmodellierung

Für die Auftragsmodellierung dienen kundenneutrale Produktionsaufträge, die mit den für den spezifischen Auftrag relevanten Bewegungsdaten initialisiert werden. Die Modellierung der Aufträge erfolgt anhand des in Abschnitt 5.3.5 vorgeschlagenen Vorgehens. Die beispielhafte Modellierung eines Produktionsauftrags kann Abbildung 9-4 entnommen werden.

### Weitere Modellierungsschritte

Die Beschreibung des betrachteten Prozesses und des fokussierten Produktionsabschnitts erfolgt durch die in Abschnitt 5.3.2 bzw. 5.3.4 eingeführte Prozess- bzw. Produktionssystemmodellierung (s. Abbildung 12-2 bzw. 12-3 im Anhang). Grundlage hierfür sind die Informationen der durchgeführten Experten-Workshops. Nach der erfolgten Modellierung der relevanten Systembestandteile folgen

## 9 Technische Umsetzung und Validierung

die Analyse der identifizierten Risiken und die Ermittlung der Risikopräferenz der für die Produktionsplanung verantwortlichen Mitarbeiter.

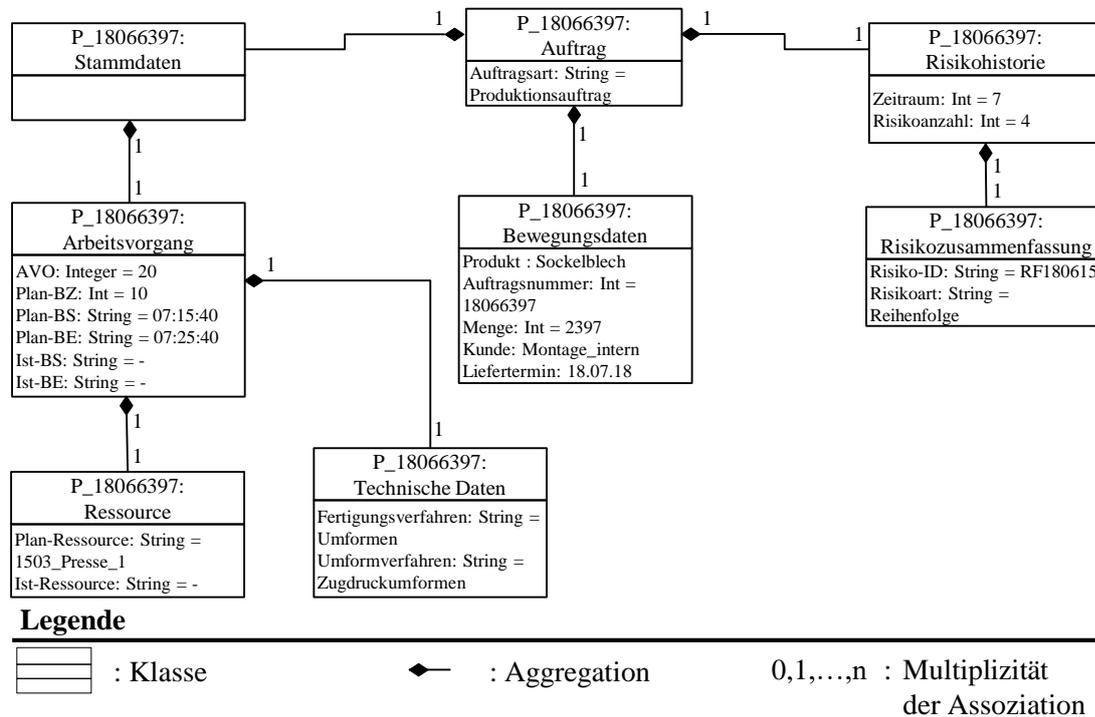


Abbildung 9-4: Ausschnitt der Auftragsmodellierung

### 9.3.3 Risikoquantifizierung und -präferenzermittlung

Die Quantifizierung der Risiken erfolgt anhand der in den betrieblichen Informationssystemen enthaltenen Daten. Im betrachteten Unternehmen sind nur teilweise ausreichend Daten zu den vorhandenen Risikofaktoren vorhanden. Somit muss zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Risikofaktoren und deren Auswirkung auf den Risikoträger auch auf Expertenschätzungen zurückgegriffen werden. Für Risikofaktoren, zu welchen Daten vorhanden sind, wurde der Betrachtungshorizont auf zwölf Monate eingegrenzt. Nach Bestimmung des möglichen Schadens durch die identifizierten Risikofaktoren sind im nächsten Schritt die Abhängigkeiten der Risiken untereinander zu identifizieren, zu bewerten und daraus resultierende Abweichungen von der Zielgröße zu quantifizieren.

Die Datenbasis im betrachteten Produktionsbereich ist nicht ausreichend groß, um eine verlässliche Aussage über die Korrelation verschiedener Risikofaktoren treffen zu können. Dementsprechend wird für die Beurteilung der Abhängigkeiten der Risiken auf eine Expertenschätzung zurückgegriffen. Dazu werden die Experten befragt, woraus der Mittelwert der Korrelationen der identifizierten Risikofaktoren

### 9.3 Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

resultiert. Das Ergebnis dieser Expertenschätzung für den Risikoträger Bearbeitungszeit, welcher im Rahmen der Reihenfolgeplanung berücksichtigt wird, dient als Grundlage der MCS zur Aggregation der Risikofaktoren (s. Abbildung 9-5).

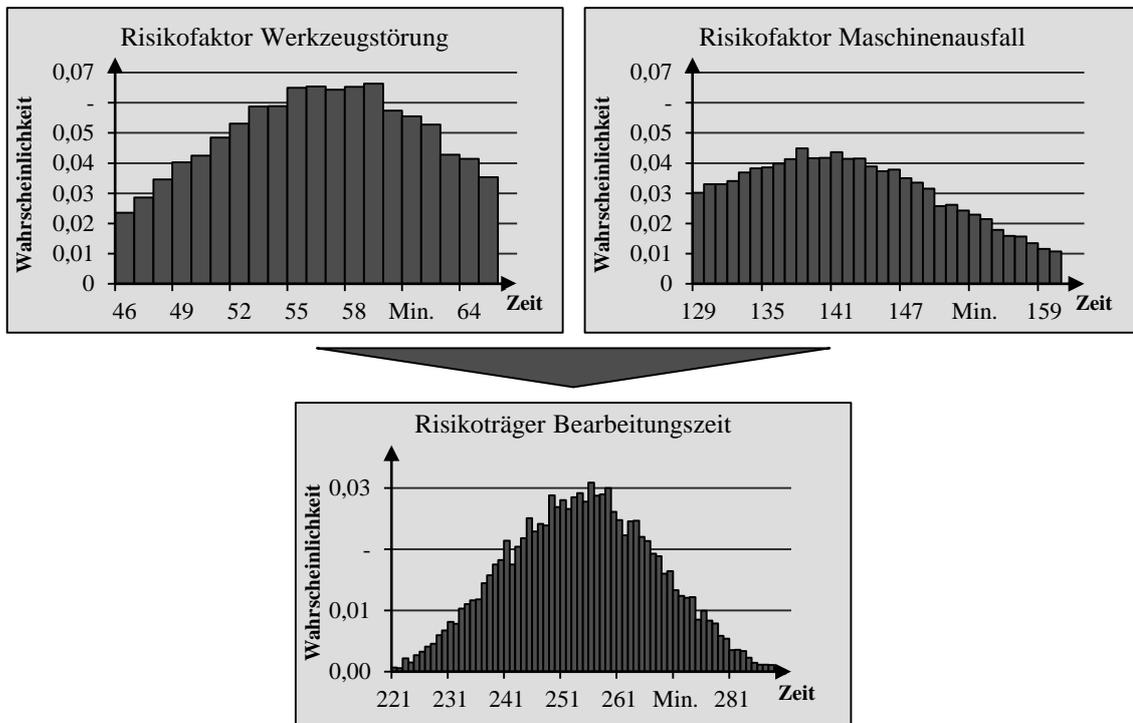


Abbildung 9-5: Quantifizierte Risikofaktoren und deren Schadensausmaß für den Risikoträger Bearbeitungszeit

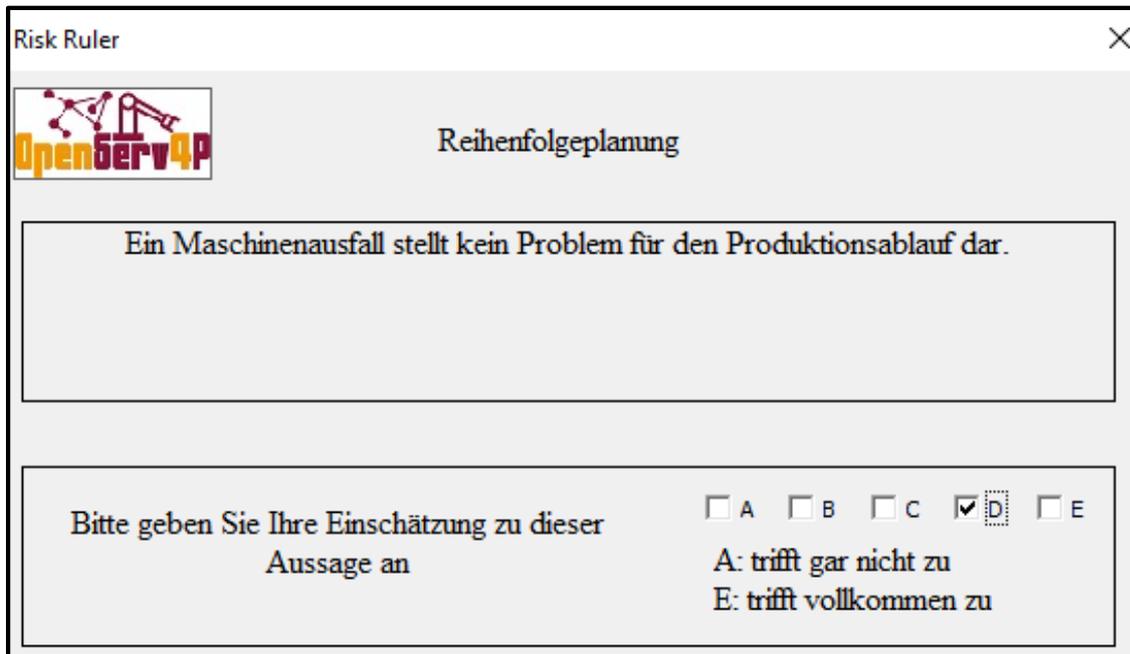
Parallel zur erfolgten Risikoaggregation kann die Risikopräferenz der Verantwortlichen für die Produktionsplanung ermittelt werden. Dazu werden die Verfahren zur Präferenzermittlung mit der relevanten Personengruppe durchlaufen. Die Probanden müssen im ersten Schritt, bei der Durchführung des Risk Rulers, einen fest definierten Fragenkatalog ausfüllen, wobei auf Fragen und Statements entsprechend der persönlichen Risikoeinstellung zu antworten ist. Bei der Zusammenstellung der Fragen und Statements wird auf eine ausreichende Tiefendimension geachtet (vgl. Abschnitt 7.3.3).

Der Proband entscheidet für jedes Szenario, inwiefern die dargestellte Aussage seiner Risikopräferenz entspricht. Dazu wird auf ein eigenentwickeltes Softwaretool zurückgegriffen, welches die selbständige Risikopräferenzermittlung durch den Nutzer ermöglicht (s. Abbildung 9-6). In Abhängigkeit von den gewählten

## 9 Technische Umsetzung und Validierung

---

Aussagen wird dem Entscheider eine RPK zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt auf Basis der fünfstufigen Skala, welche in Abschnitt 7.4 eingeführt wurde.



The screenshot shows a window titled "Risk Ruler" with a close button in the top right corner. On the left side, there is a logo for "OpenServ4P" featuring a stylized red and yellow figure. The main title of the window is "Reihenfolgeplanung". Below the title, there is a text box containing the statement: "Ein Maschinenausfall stellt kein Problem für den Produktionsablauf dar." At the bottom of the window, there is a section for evaluation. It contains the text "Bitte geben Sie Ihre Einschätzung zu dieser Aussage an" followed by five radio buttons labeled A, B, C, D, and E. The radio button for D is selected. Below the radio buttons, there are two lines of text: "A: trifft gar nicht zu" and "E: trifft vollkommen zu".

Abbildung 9-6: Programmausschnitt zur Bestimmung der Risikopräferenz mittels Risk Ruler

Nach Ermittlung der Risikopräferenz durch den Risk Ruler, erfolgt zur Absicherung des Ergebnisses die Bestimmung der Risikopräferenz mit Hilfe der HLL (s. Abbildung 9-7).

### 9.3 Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz

Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung

Lotterie A	Lotterie B
2.00 €   1.60 €	3.85 €   0.10 €
<input checked="" type="radio"/>    10 %   90 %	<input type="radio"/>    10 %   90 %
<input checked="" type="radio"/>    20 %   80 %	<input type="radio"/>    20 %   80 %
<input checked="" type="radio"/>    30 %   70 %	<input type="radio"/>    30 %   70 %
<input type="radio"/>    40 %   60 %	<input checked="" type="radio"/>    40 %   60 %
<input type="radio"/>    50 %   50 %	<input type="radio"/>    50 %   50 %
<input type="radio"/>    60 %   40 %	<input type="radio"/>    60 %   40 %
<input type="radio"/>    70 %   30 %	<input type="radio"/>    70 %   30 %
<input type="radio"/>    80 %   20 %	<input type="radio"/>    80 %   20 %
<input type="radio"/>    90 %   10 %	<input type="radio"/>    90 %   10 %
<input type="radio"/>    100 %   0 %	<input type="radio"/>    100 %   0 %

  
 OpenServ4P – offene, intelligente Services für die Produktion

Abbildung 9-7: Programmausschnitt zur Bestimmung der Risikopräferenz mittels HLL

Auf Basis der Ergebnisse der beiden TV sowie der Formel zur Verrechnung dieser Ergebnisse kann die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers für die operative Produktionsplanung im betrachteten Unternehmen wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 RPK_{ges} &= \beta_{RR} * RPK_{RR} + \beta_{HLL} * RPK_{HLL} = \\
 &0,5 * 2 + 0,5 * 3 = 2,5
 \end{aligned}$$

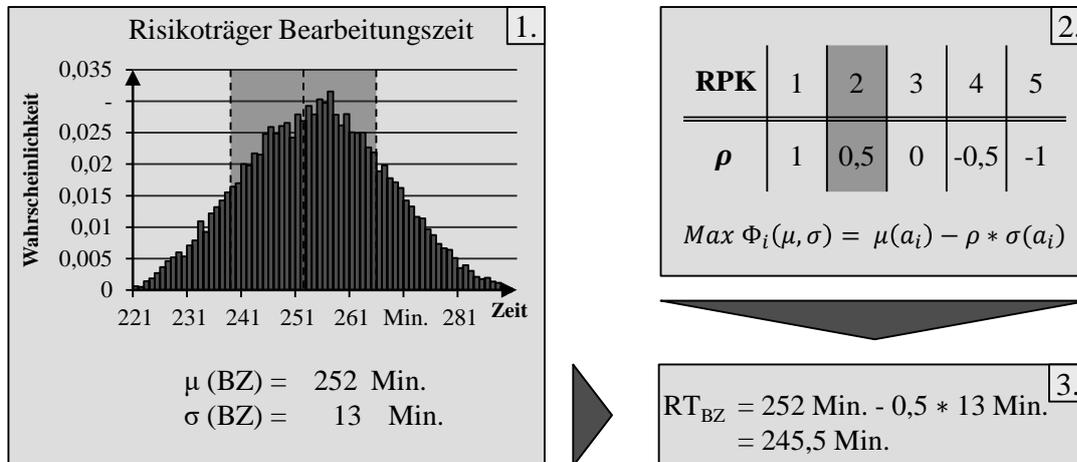
Der Gewichtungsfaktor  $\beta_{TV}$  für die Relevanz der Ergebnisse der TV lautet jeweils 0,5. Die ermittelte RPK ist somit der Klasse 2, „risikoavers“, zuzuordnen. Dieser Parameter ist während der folgenden operativen Produktionsplanung an geeigneter Stelle zu berücksichtigen.

#### 9.3.4 Operative Produktionsplanung

Zu Beginn erfolgt die Einordnung der aktuellen Risikolage in der Produktion in eine der zuvor festgelegten Klassen von Risikosituationen auf Basis einer Clusteranalyse zur Einschränkung des Wertebereichs des Risikoträgers. Die Analyse erfolgt anhand der festgelegten Kennzahl *Auslastung* des betrachteten Produktionssystembereichs. Nach der Klassifizierung steht ein eingeschränkter Wertebereich

## 9 Technische Umsetzung und Validierung

für den Risikoträger Bearbeitungszeit zur Verfügung. Diese Einschränkung sowie die zuvor ermittelte RPK erlauben die Anpassung des Risikoträgers auf Basis der Entscheidungsregel (s. Abbildung 9-8).



### Legende

BZ : Bearbeitungszeit

RT : Risikoträger

Abbildung 9-8: Parametrierter Risikoträger Bearbeitungszeit

Der angepasste Risikoträger Bearbeitungszeit dient als Eingangsgröße für das Produktionsplanungsproblem welches im Folgenden für den Anwendungsfall adaptiert wird.

Gemäß der Notation von GRAHAM ET AL. (1979) kann ein Planungsproblem in einem Tripel aus  $\alpha | \beta | \gamma$  dargestellt werden. Dabei wird mit  $\alpha$  die Maschinenumgebung beschrieben, mit  $\beta$  der Job, also der Auftrag und mit  $\gamma$  das Optimierungskriterium. Das betrachtete Planungsproblem kann gemäß der Notation mit  $R2 | pmtn, d_j, p_j \sim beta(p, q), s_{jk}, r-pa \sim normal(\mu, \sigma^2) | E(f_{max})$  beschrieben werden.

Das in Abschnitt 8.5 eingeführte Produktionsplanungsmodell ist an die Gegebenheiten des Anwendungsbeispiels anzupassen. Dies wird zum einen über die Parametrierung der Eingangsdaten in den verschiedenen Termen erreicht. Dazu sind bspw. die unternehmensindividuellen Maschinenstunden- bzw. Rüstkostensätze für die Berechnung der Rüst- und Bearbeitungskosten zu hinterlegen. Zum anderen werden auch die Nebenbedingungen angepasst, sodass sie auf den Anwendungsfall zutreffen (s. Tabelle 9-1).

Tabelle 9-1: Werte der in den Formeln verwendeten Variablen

<i>Parameter</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Wert</i>
J	Anzahl einzuplanender Aufträge	60
M	Anzahl zur Verfügung stehender Maschinen	2
T	Zeiteinheiten der betrachteten Planungsperiode	6

Die Berücksichtigung der Entscheidungspräferenz erfolgt über die Parametrierung der Beschränkungen. Dies geschieht durch Berücksichtigung verschiedener Szenarien der Bearbeitungszeit aufgrund der jeweiligen Verfügbarkeit der Pressen bzw. der darauf eingesetzten Werkzeuge. Die Bearbeitungszeit wurde bereits im Rahmen der Risikoquantifizierung als relevanter Risikoträger des betrachteten Produktionsbereichs identifiziert (vgl. Abschnitt 9.3.3).

Eine CP-Anwendung kann innerhalb der Softwareumgebung IBM ILOG CPLEX Optimization Studio<sup>®</sup> genutzt werden. Dort werden Formulierungen für vordefinierte Einschränkungen und Entscheidungsvariablen, die auf Planungsprobleme zugeschnitten sind, bereits zur Verfügung gestellt. Aufbauend auf diesen, wurde das oben beschriebene Problem formuliert und gelöst.

## 9.4 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

### 9.4.1 Allgemeines

Die Nutzenquantifizierung des entwickelten Systems zur operativen Produktionsplanung wird mittels einer Simulation realisiert. Diese eignet sich nach VDI-Richtlinie 3633 insbesondere dazu, dass „(...) *das zeitliche Ablaufverhalten komplexer technischer Systeme untersucht und beurteilt* (...)“ werden kann. Gerade diese Eigenschaft spielt auch im Zusammenhang mit der Berücksichtigung von Risiken eine elementare Rolle, da diese zeitveränderlich sind und eine rein statische Betrachtung zu falschen Ergebnissen führen würde. Die Durchführung der notwendigen Simulationsstudien erfolgt mit der Simulationssoftware Plant Simulation<sup>®</sup>. Plant Simulation<sup>®</sup> ist eine ereignisdiskrete Simulationssoftware und ist somit ideal für die Abbildung von Logistik- und Produktionssystemen geeignet (ELEY 2012).

## 9 Technische Umsetzung und Validierung

Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung und Validierung des Systems zur operativen Produktionsplanung detailliert. Dabei wird zu Beginn der Aufbau des Simulationsmodells beschrieben (vgl. Abschnitt 9.4.2). Anschließend werden die in der simulationsbasierten Evaluierung betrachteten Szenarien erläutert und die erzielten Ergebnisse dargestellt und diskutiert (vgl. Abschnitt 9.4.3).

### 9.4.2 Simulationsmodell und -szenarien

Das im Rahmen des Forschungsprojekts OpenServ4P entstandene Simulationsmodell kann zur Abbildung der Fertigung der in Abschnitt 9.2 beschriebenen Bauteile auf zwei unterschiedlichen Pressenanlagen verwendet werden. Dieses Simulationsmodell wird zur Validierung des Vorgehens zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz eingesetzt. Zur Verifizierung des Simulationsmodells werden verschiedene Experimente durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass das Modell die Realität mit einer ausreichend hohen Genauigkeit abbildet. So ist in Abbildung 9-9 beispielhaft der Vergleich der Produktionsmenge in der Realität sowie im Rahmen der Simulation für einen Zeitraum von sechs Wochen dargestellt.

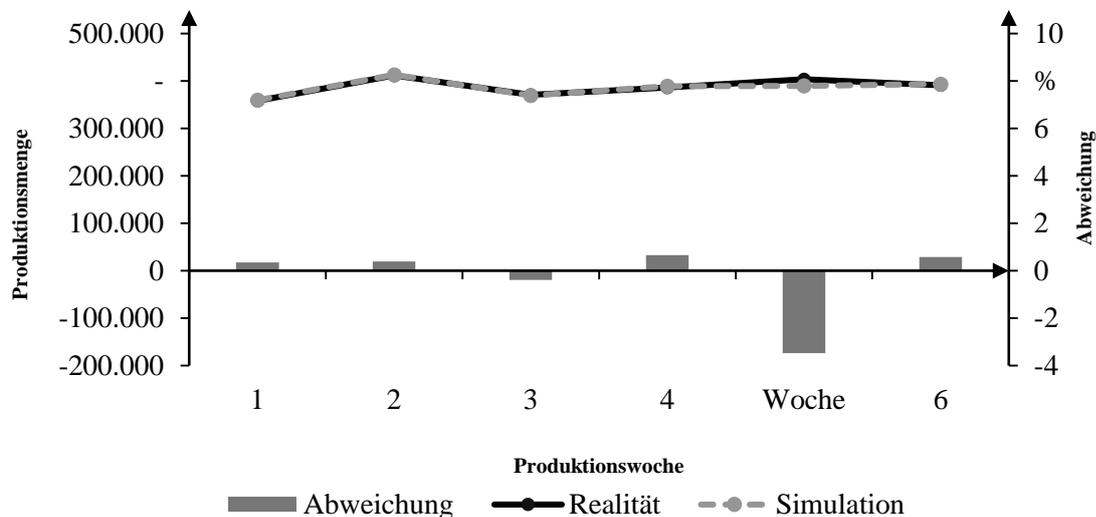


Abbildung 9-9: Verifizierung des Simulationsmodells anhand des Vergleichs mit Realdaten

Der eine Verlauf zeigt die aus Realdaten ermittelte Produktionsmenge, der andere die sich aus der Simulation ergebende Produktionsmenge. Im Vergleich wird erkennbar, dass die Ausbringungsmengen in der Realität und der Simulation mit einer Differenz von maximal 4 % nur leicht voneinander abweichen. Das Modell ist

somit für den Anwendungsfall ausreichend verifiziert und kann zur Validierung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz herangezogen werden.

Das Simulationsmodell wird zur Validierung des Systems mit Realdaten verknüpft, welche den zu Beginn des Simulationszeitraums vorherrschenden Zustand des Produktionssystems widerspiegeln. Basierend auf diesem Produktionszustand, z. B. Abnutzungsvorrat der Presswerkzeuge, aktuell bearbeitete Aufträge, und dem für die Planungsperiode vorhandenen Auftragsbestand werden verschiedene Simulationsszenarien durchgeführt. Das Simulationsmodell führt dabei keine eigenständige Planung durch, sondern ist auf die Initialisierung mit einem Produktionsplan für den betrachteten Produktionszeitraum angewiesen. Anhand dieses Produktionsplans entscheiden sich auch die für die Validierung in Betracht gezogenen Simulationsszenarien (s. Tabelle 9-2). Außer dem jeweiligen Produktionsplan gibt es keine weiteren Unterschiede zwischen den Simulationsmodellen der betrachteten Szenarien.

*Tabelle 9-2: Konfiguration der Simulationsszenarien*

	Referenzszenario	Szenario I	Szenario II
<b>Risikoberücksichtigung</b>	implizit	nein	ja
<b>Risikopräferenzberücksichtigung</b>	nein	nein	ja

### Referenzszenario

Im Referenzszenario wird ein Produktionsplan gemäß dem aktuell angewendeten Vorgehen zur Produktionsplanung erzeugt. Bei diesem werden Risiken nur implizit durch Produktivitätskennzahlen berücksichtigt.

### Szenario I

In Szenario I wird der Produktionsplan mittels eines herkömmlichen Algorithmus erzeugt. Bei diesem werden Risiken nicht explizit berücksichtigt. Als herkömmlicher Algorithmus wurde in diesem Fall das Prinzip „frühester Liefertermin zuerst“ zur Bestimmung der Auftragsreihenfolge auf den beiden Pressen ausgewählt. Die Zuordnung von Aufträgen, die auf beiden Pressen gefertigt werden können, erfolgt dabei unter Berücksichtigung der Auslastung der beiden Pressenanlagen.

### Szenario II

In Szenario II werden Risiken sowie die Risikopräferenz des Produktionsplaners bei der Generierung des Produktionsplans für die Pressen berücksichtigt. In Abhängigkeit von den Risiken, die sich bspw. durch Abnutzung der Werkzeuge über den Produktionszeitraum hinweg verändern, wird die Reihenfolge der Aufträge so gewählt, dass die Liefertermine eingehalten werden können.

#### 9.4.3 Ergebnisse der Simulation

Für den Vergleich der Simulationsszenarien wird die für die Phase der Reihenfolgeplanung relevante Zielgröße der Liefertermintreue als Bewertungsgrundlage herangezogen. Im Referenzszenario kann eine Liefertermintreue in Höhe von 90,8 % erreicht werden. Wird das Prinzip „frühester Liefertermin zuerst“ (Szenario I) angewendet, so ist einer Liefertermintreue in Höhe von 90,1 % realisierbar. Für Szenario II, in dem das in dieser Arbeit entwickelte System zu operativen Produktionsplanung angewendet wird, kann eine Liefertermintreue in Höhe von 93,4 % erreicht werden. Dies stellt eine Verbesserung der fokussierten Zielgröße um 2,6 % dar (vgl. Abbildung 9-10).

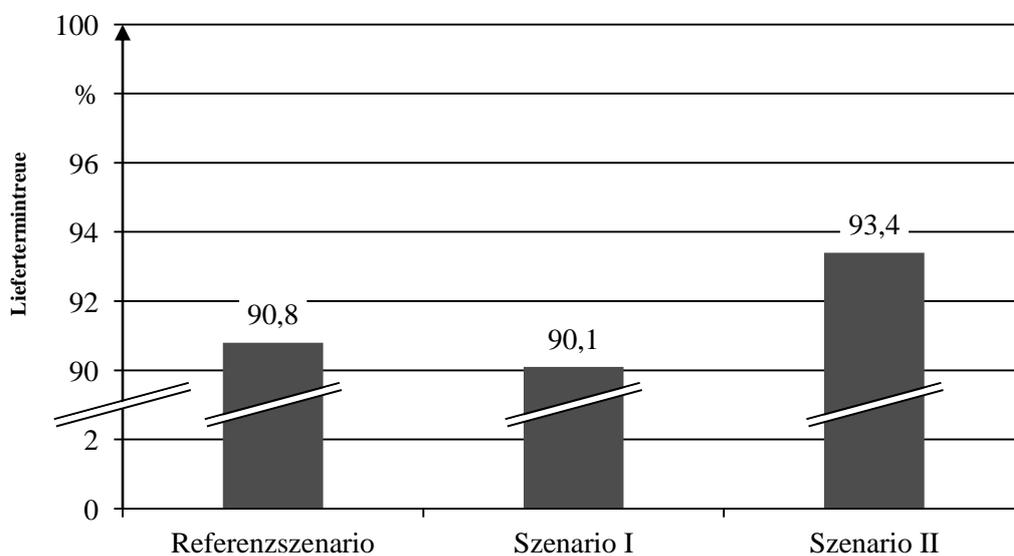


Abbildung 9-10: Liefertermintreue in den Simulationsszenarien

Vergleicht man die Zahl der fertiggestellten Aufträge so kann auch hier eine Verbesserung in Szenario II verglichen mit dem Referenzszenario bzw. Szenario I festgestellt werden (vgl. Abbildung 9-11).

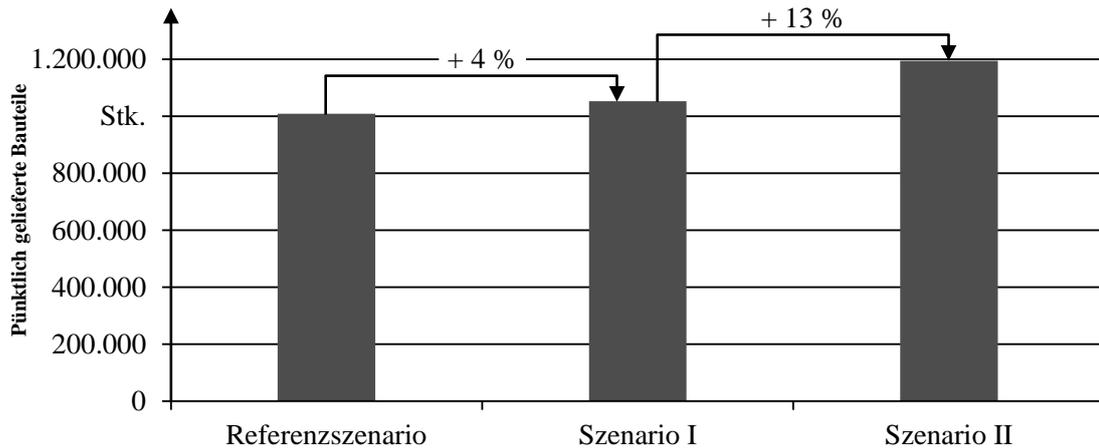


Abbildung 9-11: Anzahl fertigestellter Aufträge in den Simulationsszenarien

Die Erhöhung der Anzahl fertigestellter Aufträge sowie die Verbesserung der Liefertermintreue lassen sich auf die frühzeitige Berücksichtigung der identifizierten Risiken und der Risikopräferenz des Produktionsplaners bereits in der operativen Planungsphase zurückführen.

## 9.5 Bewertung des Systems zur operativen Produktionsplanung

### 9.5.1 Allgemeines

Im folgenden Abschnitt wird eine Bewertung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz durchgeführt. Dazu wird zunächst eine Bewertung des Systems hinsichtlich der in Kapitel 4 abgeleiteten Anforderungen vorgenommen (vgl. Abschnitt 9.5.2). Anschließend wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, welche exemplarisch zeigt, nach welcher Nutzungsdauer das System unter anzunehmenden Randbedingungen einen wirtschaftlichen Mehrwert für das Unternehmen generiert (vgl. Abschnitt 9.5.3).

### 9.5.2 Anforderungsbezogene Bewertung

In diesem Abschnitt wird das entwickelte System hinsichtlich der in Kapitel 4 abgeleiteten Anforderungen bewertet. Bevor eine Bewertung der spezifischen An-

forderungen erfolgt, bedarf es einer kritischen Beurteilung des entwickelten Systems hinsichtlich der allgemeinen Anforderungen, welche unabhängig vom Anwendungsfall gelten.

### Allgemeine Anforderungen

Die Anforderung an die *Transparenz* des entwickelten Systems wird erfüllt. Für den Anwender ist in jedem Baustein des Systems ersichtlich, welche Daten benötigt werden und wie diese Daten verwendet werden, um die Zielstellung des jeweiligen Bausteins zu erreichen. Dies ist insbesondere auch darauf zurückzuführen, dass für die Modellierung der Systemelemente sowie für die Identifikation und Bewertung der Risiken im Ausgangspunkt etablierte Methoden verwendet wurden, die dann für das System adaptiert wurden. Weiterhin wurde durch die Darstellung der Wirkzusammenhänge die Abhängigkeit der einzelnen Bausteine deutlich gemacht. Dies führt zu einer erhöhten Nachvollziehbarkeit und Akzeptanz des Systems beim Anwender.

Die *Adaptierbarkeit und Skalierbarkeit* des Systems stellt sicher, dass dieses auf andere Anwendungsdomänen übertragbar und nicht auf die Systemgrenze des betrachteten Anwendungsfalls beschränkt ist. Das vorliegende System zur operativen Produktionsplanung wurde mit Fokus auf die Fertigung entworfen, jedoch ist eine Adaption auf andere Bereiche wie etwa Logistikprozesse ohne größeren Aufwand möglich. Eine Grundlage sowohl für die Adaptierbarkeit als auch die Skalierbarkeit bildet die generische Modellierung des betrachteten Systems.

Die Forderung nach der *Durchgängigkeit des Datenmodells* wird vom entwickelten System berücksichtigt und kann somit als erfüllt angesehen werden. Für die Speicherung der risikorelevanten Daten, welche aus einer Vielzahl unterschiedlicher Informationssysteme des Unternehmens stammen, eignen sich die entworfenen Datenmodelle und dienen zugleich als Grundlage für alle weiteren Schritte zur Integration der Risiken und der Risikopräferenz in die Produktionsplanung.

### Spezifische Anforderungen

Neben allgemeinen Anforderungen an das System wurden auch spezifische, für den Anwendungsfall der Produktionsplanung relevante Anforderungen definiert. Die kritische Beurteilung des Systems hinsichtlich der jeweiligen Anforderung kann den folgenden Absätzen entnommen werden.

Die Grundlage des Systems ist die Möglichkeit der *Analyse des vorhandenen Risikos* im betrachteten Produktionssystem. Der Anwender wird durch Vorschläge

zu möglichen Methoden sowie Vorlagen zur Dokumentation von Risiken bei der Identifikation eben solcher unterstützt. Auch die Analyse der Risiken wird mittels des Verfahrens, bspw. durch die Einführung einer Risikodatenbank, und anhand der Definition von Risikoklassen vereinfacht. Die formulierte Anforderung der Analyse des vorhandenen Risikos kann somit als erfüllt angesehen werden.

Eine Voraussetzung zur zielgerichteten Handhabung von Risiken im betrachteten System ist die *Beschreibung des Risikoniveaus des Produktionssystems*. Die Modellierung der zu betrachteten Systemelemente erfolgt auf Basis der UML-Notation. Die Konzeption der Modellierung stellt sicher, dass jedem Element risikorelevante Informationen zugeordnet werden können. Weiterhin ist durch die Erfassung von Korrelationen der Risikofaktoren untereinander klar, welche Auswirkungen ein Risikofaktor auf die zu betrachtenden Zielgrößen hat. Insgesamt ist somit festzustellen, dass die Anforderung der Beschreibung des Risikoniveaus des Produktionssystems durch das entwickelte System erfüllt ist.

Die *Ermittlung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers* ist ein entscheidender Bestandteil zur Sicherstellung der Effektivität des entwickelten Systems. Die Konzeptionierung berücksichtigt daher ein Vorgehen, welches es ermöglicht, die Risikopräferenz zu ermitteln. Um den Aufwand für den Anwender möglichst gering zu halten, wird durch ein intuitives Softwaretool sichergestellt, dass die relevanten Informationen schnell und zielgerichtet abgefragt werden können.

Die *Integration der risikorelevanten Informationen in die Produktionsplanung* ermöglicht die Berücksichtigung des Risikos und der Risikopräferenz bei der Erstellung und Anpassung des Produktionsplans. Durch die Zuordnung der identifizierten Risikofaktoren zu übergeordneten Risiken, welche aufgrund ihrer Charakteristika, wie bspw. dem Wirkhorizont, Planungsphasen eindeutig zugeordnet werden, wird eine Berücksichtigung des Risikos gewährleistet. Darüber hinaus ist auch eine Einbeziehung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers in den Planungsphasen sichergestellt. Die beiden Anforderungen Ermittlung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers und Integration der risikorelevanten Informationen in die Produktionsplanung werden somit durch das Vorgehen erfüllt. Neben der Erfüllung der dargestellten Anforderungen wird im nächsten Schritt auch die Erfüllung der Wirtschaftlichkeit des entwickelten Systems überprüft.

### 9.5.3 Wirtschaftliche Bewertung

Ergänzend zur anforderungsbezogenen Bewertung ist auch eine wirtschaftliche Bewertung zur Beurteilung der Effizienz des entwickelten Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz erforderlich. Auf Basis einer statischen Investitionsrechnung wird die Amortisationsdauer des entwickelten Systems bestimmt. Dies ist die Zeitspanne, der es bedarf, um die für die Anschaffung und Implementierung notwendigen Aufwände durch generierte Kosteneinsparungen zurückzugewinnen (GÖTZE 2014). Für die Realisierung des Systems müssen *Investitionskosten* aufgewendet werden, welche sich einerseits in *Sachkosten* zur Anschaffung von Standardlösungen und andererseits in die erforderlichen *Personalkosten* zur Softwareanpassung sowie zur initialen Ermittlung der risikorelevanten Informationen gliedern lassen (s. Tabelle 9-3). Als Berechnungsgrundlage wird das in Abschnitt 9.2 beschriebene Produktionssystem verwendet.

Tabelle 9-3: *Einmalige Kosten zur Realisierung des Systems zur operativen Produktionsplanung (Expertenschätzung)*

	Position	Art	Menge/ Anzahl PT	Stück- kosten	Kosten
<b>Sachkosten</b>	S1	Lizenz Optimierungssoftware	1	15.000,00 €	15.000,00 €
	S2	IT-Hardware (PC, Bildschirm, etc.)	1	1.500,00 €	1.500,00 €
	Summe der Sachkosten				16.500,00 €
<b>Personalkosten</b>	P1	Produktionssystemmodellierung	20	1150,00 €	23.000,00 €
	P2	initiale Risikoidentifikation und -analyse	25	1150,00 €	28.750,00 €
	P3	Risikopräferenzmessung	0,5	1150,00 €	575,00 €
	P4	Schulung Produktionsplaner	5	1150,00 €	5.750,00 €
	Summe der Personalkosten				58.075,00 €
<b>Gesamtsumme der einmaligen Kosten</b>					<b>74.575,00 €</b>

#### Legende

PT: Personentag(e)

Zur Realisierung des Systems zur operativen Produktionsplanung sind Anschaffungskosten für die Optimierungssoftware sowie den Solver zu berücksichtigen. Dieser erlaubt eine Automatisierung der Produktionsplanung. Da das entwickelte System vorwiegend ein Softwaresystem ist, fallen nur geringe Hardwarekosten an.

Insgesamt fallen *Sachkosten* für den zu Grunde liegenden Anwendungsfall in Höhe von 16.500,00 € an.

Des Weiteren sind einmalige *Personalkosten* zu berücksichtigen. Dazu gehören Aufwände zur Systembeschreibung und -modellierung sowie zur anschließenden Risikoidentifikation und -bewertung. Auch für die Messung der Risikopräferenz der Produktionsplaner sowie für die Schulung dieser Personengruppe zum Umgang mit dem dargestellten System fallen insgesamt einmalige Personalkosten in Höhe von 58.075,00 € an. Insgesamt belaufen sich die *einmaligen Kosten* für das System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz somit auf 74.575,00 €.

Die *laufenden Betriebskosten* setzen sich für den zu Grunde liegenden Anwendungsfall aus mehreren Positionen zusammen. Zum einen fallen Lizenzgebühren für die eingesetzte Software an. Des Weiteren müssen verschiedene Analysen in Zusammenhang mit der Risikoidentifikation kontinuierlich durchgeführt werden. Auch die Risikopräferenzmessung ist mehrmals im Jahr durchzuführen. Daneben muss eine Pflege der Risikodatenbank erfolgen. Diese Aufwände werden insgesamt als jährliche laufende Betriebskosten mit 18.600,00 € veranschlagt (vgl. Tabelle 9-4).

*Tabelle 9-4: Laufende jährliche Betriebskosten (Expertenschätzung)*

	Position	Art	Menge/ Anzahl PT	Kosten pro Einheit	Kosten
<b>Betriebskosten</b>	B1	Lizenzgebühren Software	1	2.000,00 €	2.000,00 €
	B2	Aktualisierung Risikoanalyse	10	1.200,00 €	12.000,00 €
	B3	Aktualisierung Risikopräferenz	2	1.150,00 €	2.300,00 €
	B4	Pflege Risikodatenbank	2	1.150,00 €	2.300,00 €
<b>Summe Betriebskosten pro Jahr</b>					<b>18.600,00 €</b>

**Legende**

PT: Personentag(e)

Die Amortisationsdauer ist dabei der Quotient aus den Investitionskosten und der jährlichen Einsparung abzüglich der Betriebskosten, also der Netto-Einsparung. Zur Abschätzung des quantitativen Nutzens werden die Ergebnisse der Simulationsstudie aus Abschnitt 9.4.3 herangezogen. Diese Simulationsstudien basieren auf dem für die wirtschaftliche Betrachtung zu Grunde gelegten Produktionssze-

## 9 Technische Umsetzung und Validierung

---

nario. Der Nutzen ergibt sich aus der Verbesserung der Liefertermintreue und damit einer Verringerung der Strafzahlungen für eine verspätete Lieferung in Höhe von ca. 15 % des Verkaufspreises. Der durchschnittliche Stückpreis der auf den beiden Pressenanlagen gefertigten Teile beträgt ca. 0,35 €. Bei Veranschlagung von 15 % des Stückpreises als Strafzahlung belaufen sich die jährlichen Einsparungen auf Basis des Produktionszeitraums somit auf 42.000,00 €.

Nach MÜLLER (2019A) ergibt sich gemäß den Formeln (9-1) und (9-2) somit eine Amortisationsdauer von ca. 3,2 Jahren:

$$\begin{aligned} t_{Amortisation} &= \frac{\text{Investitionskosten [€]}}{\text{durchschnittl. jährlicher Nutzen} \left[ \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \right]} & (9-1) \\ &= \frac{75.400,00 \text{ €}}{23.400,00 \text{ €}} \approx 3,2 \text{ Jahre,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{mit durchschnittlicher jährlicher Nutzen} & (9-2) \\ &= \text{Einsparung p. a. - laufende Betriebskosten p. a.} \\ &= 42.000,00 \text{ €} - 18.600,00 \text{ €} = 23.400,00 \text{ €}. \end{aligned}$$

Die gewöhnliche Nutzungsdauer eines Softwaresystems wird im Allgemeinen mit fünf Jahren angegeben (BMF 2005). Eine Amortisation des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglich, da die gewöhnliche Nutzungsdauer des Systems die Amortisationszeit von ca. 3,2 Jahren nicht übersteigt. Des Weiteren ist auf mögliche Skaleneffekte hinzuweisen, die durch eine Erweiterung des Systems auf andere Produktionsbereiche erzielt werden können.

### 9.5.4 Leitfaden für die betriebliche Anwendung

Für die Anwendung des entwickelten Systems in der allgemeinen betrieblichen Praxis soll der nachfolgend dargestellte Leitfaden dienen, welcher sich maßgeblich aus dem Ablauf des prototypischen Einsatzes des Systems für den beschriebenen Anwendungsfall (vgl. Abschnitt 9.3) ableitet.

In einem ersten Schritt haben die Risikoidentifikation im konkret betrachteten Produktionssystem sowie dessen anschließende Modellierung zu erfolgen. Dazu sind Daten erforderlich, die einerseits die Elemente sowie die Abläufe des Systems konkretisieren und andererseits Informationen zu im betrachteten Bereich vorhandenen Risiken und relevanten Risikoträgern liefern können. Soweit verfügbar, kann

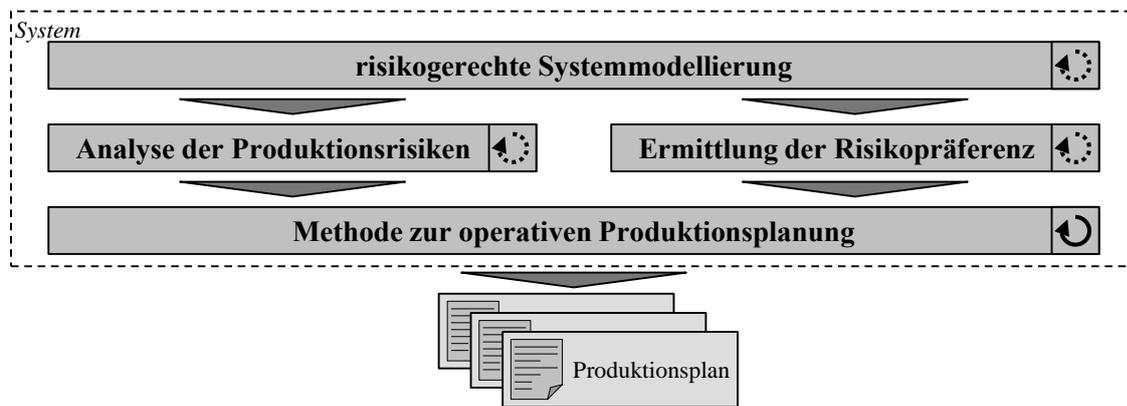
hierfür auf bereits vorliegende Daten und Dokumentationen zurückgegriffen werden, etwa eine Datenbank, in der bereits in dem System aufgetretene Störungen erfasst sind, oder Schichtbücher für einzelne Systemelemente wie bspw. Ressourcen. Im Übrigen sind die erforderlichen Daten im Rahmen der Risikoidentifikation und Systemmodellierung erstmals zu erheben (vgl. Kapitel 5).

Als nächstes sind die Analyse der Risiken (vgl. Kapitel 6) und die Ermittlung der Risikopräferenz des jeweiligen Entscheidungsträgers (vgl. Kapitel 7) durchzuführen. Diese beiden Aktivitäten können parallel ablaufen. Die Bestimmung der Auswirkungen eines bestimmten Risikos erfolgt dabei durch die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Risikos und die Festlegung des zu erwartenden Schadensausmaßes. Auch hier kann auf bereits vorhandene Informationen zurückgegriffen werden, soweit solche vorliegen. Falls dies nicht der Fall ist, kann insbesondere die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikofaktors durch Anwendung der PERT-Schätzung zweckmäßig bestimmt werden (vgl. Abschnitt 6.3). Mittels Risikoaggregation sind in einem nächsten Schritt die zuvor kategorisierten Risikofaktoren zusammenzufassen, um deren Auswirkung auf einzelne Risikoträger bestimmen zu können. Dies lässt sich mittels einer MCS realisieren. Für solche Simulationen steht sowohl kostenpflichtige Software, wie bspw. das *Microsoft Excel* basierte *@Risk* der Firma Palisade, wie auch kostenfreie Software, wie etwa *R*, zur Verfügung (RAYCHAUDHURI 2008, ROBERT & CASELLA 2010). Die Ermittlung der Risikopräferenz erfolgt anhand einer Kombination aus Risk Ruler und HLL. Hierbei ist der Risk Ruler unternehmensspezifisch anzupassen. Zur Vorbereitung der Risikopräferenzermittlung sind die Fragen des Risk Rulers an den spezifischen Planungsaufgaben des Unternehmens auszurichten. Abhängig von bestimmten Kriterien, wie etwa der vorliegenden Fertigungsart oder der Produktstruktur, werden im konkreten Unternehmen unter Umständen nur bestimmte Phasen der operativen Produktionsplanung bei Generierung des unternehmensspezifischen Produktionsplans durchlaufen (SCHUH ET AL. 2012B). Solche unternehmensspezifischen Randbedingungen sind bei der Generierung des Risk Rulers zu berücksichtigen. Hinweise für die Gestaltung von Risk Rulern finden sich bspw. in SPREMANN (2014).

Anschließend erfolgt die Anwendung der Methode zur operativen Produktionsplanung. In den vorbereitenden Schritten der Methode werden die zuvor ermittelten Wertebereiche der Risikoträger nach Maßgabe der aktuellen Risikosituation eingeschränkt (vgl. Abschnitt 8.3). Der so ermittelte Wertebereich der Risikoträger erfährt zur finalen Parametrierung noch eine weitere Einschränkung, indem die

## 9 Technische Umsetzung und Validierung

Risikopräferenz des Entscheidungsträgers explizit berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt 8.4). Auf Grundlage dieser vorselektierten Planwerte kann nun ein Produktionsplan generiert werden, der die Einhaltung der Zielgrößen bestmöglich sicherstellt und gleichzeitig bereits an der individuellen Risikopräferenz des Entscheidungsträgers ausgerichtet ist. Auf Grundlage dieses Produktionsplans kann anschließend die Produktion der Aufträge durchgeführt werden. Für die Generierung jedes neuen Plans ist die Methode zur operativen Produktionsplanung jeweils situationsspezifisch anzuwenden. Die der Methode vorangehenden Systemelemente müssen hingegen nur bei Bedarf erneut durchlaufen werden, wenn sich etwa die Risikosituation geändert hat oder die Präferenz des Entscheidungsträgers aufgrund seines an Erfahrungen und neue Erkenntnisse angepassten Wertesystems. Die Abfolge der einzelnen Anwendungsschritte zur Umsetzung des Systems in der betrieblichen Praxis kann der nachfolgenden Abbildung 9-12 entnommen werden.



### Legende

↻: kontinuierliche Anwendung

⌚: wiederholte Anwendung im Bedarfsfall

Abbildung 9-12: Abfolge der Anwendungsschritte zur Umsetzung des Systems

## 9.6 Fazit

In Kapitel 9 wurde die Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz dargestellt. Es wurden die Umsetzung und Validierung des Systems anhand eines realen Anwendungsfalls erläutert. Basierend auf der Durchführung von Simulationsstudien mit unterschiedlichen Produktionsszenarien konnte der Nutzen des entwickelten Systems dargestellt werden. Der praktische Nutzen wurde durch die aufgrund der Berücksichtigung der individuellen Risikopräferenz während der Produktionsplanung erzielte Steigerung der Termintreue belegt. Weiter konnte die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung den ökonomisch sinnvollen Einsatz des Systems aufzeigen.

# 10 Schlussbetrachtung

## 10.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der kontinuierlich wachsenden Bedeutung der vom Kunden wahrgenommenen Logistikleistung eines Unternehmens, die sich durch Liefertreue und Lieferzeit in Kennzahlen ausdrücken lässt, ist eine erfolgreiche und leistungsstarke PPS von zentraler Bedeutung. Ein wesentliches Merkmal einer solchen PPS ist die Fähigkeit, die vereinbarten Liefertermine zu erfüllen. Es muss vermieden werden, dass unvorhergesehene Ereignisse in der Produktion zu signifikanten Terminabweichungen führen bzw. auftretende Störungen nur mit hohem Aufwand kompensiert werden können. Einen großen Einfluss auf die Kompensationsfähigkeit eines Systems hinsichtlich unvorhergesehener Ereignisse in der Produktion hat die operative Produktionsplanung. Durch ein Verfahren zur antizipativen Berücksichtigung von Risiken im operativen Produktionsplanungsprozess des Unternehmens können frühzeitig Maßnahmen zur Handhabung von Risikofaktoren ergriffen werden, bevor sich Risiken durch Störung des Produktionsablaufs manifestieren.

Hierzu bedarf es einer Unterstützung des Planungsverantwortlichen bei der Analyse der Risiken und deren Berücksichtigung in der Planung. Der Umgang von Unternehmen mit Risiken und deren Auswirkungen ist in jedem Unternehmen individuell und bedarf daher der gesonderten Betrachtung. Dies ist insbesondere auch dem Freiraum geschuldet, den jeder Entscheidungsträger in der Planung hat. Die Nutzung dieses Gestaltungsfreiraums in der Planung wird durch die persönliche Risikopräferenz des Entscheidungsträgers maßgeblich beeinflusst. Somit muss die persönliche Risikopräferenz explizit Berücksichtigung finden. Dazu bedarf es eines Verfahrens, das die Risikopräferenz von Entscheidungsträgern in der Produktionsplanung misst und in geeigneter Form bereitstellt, um die Daten zur ermittelten Risikopräferenz für die Planung nutzbar zu machen.

Basierend auf dieser Ausgangssituation und Motivation erfolgt eine Zusammenfassung der zu betrachtenden Grundlagen und eine Analyse des aktuellen Stands der Forschung und Technik. Letztere konzentriert sich vornehmlich auf Ansätze zum Risikomanagement im Kontext von Industrieunternehmen. Daneben werden auch Partialsysteme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung analysiert. Einen weiteren Schwerpunkt bilden Ansätze zur Berücksichtigung der Risikopräferenz von Entscheidungsträgern. Anschließend werden die

## 10 Schlussbetrachtung

---

Anforderungen an das System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz definiert und die Elemente *Risikogerechtes Systemmodell*, *Quantifizierte Risiken*, *Risikopräferenz des Entscheidungsträgers* und *Methode zur risikoorientierten Produktionsplanung* als Bausteine des entwickelten Systems festgelegt.

Die *Risikoidentifikation* besteht aus einem kombinierten Verfahren verschiedener etablierter Werkzeuge und baut auf einer zuvor durchzuführenden Definition des Produktionssystems auf. Die Klassifizierung der Risikofaktoren ermöglicht bereits frühzeitig eine Zuordnung zu den von den möglichen Auswirkungen betroffenen Risikoträgern und Planungsphasen. Das risikogerechte Produktionssystemmodell für die Produktionsplanung besteht aus unterschiedlichen Teilmodellen. Es wurden auf Basis von in der UML-Notation bereits vorhandenen Klassen vier Teilmodelle entworfen. Das *Ressourcenmodell*, das *Prozessmodell*, das *Produktionssystemmodell* sowie das *Auftragsmodell* ermöglichen eine Berücksichtigung der relevanten Informationen für die Produktionsplanung. Ergänzt werden diese Modelle durch eine *Risikodatenbank*, in der die risikorelevanten Informationen für die Produktionsplanung abgelegt werden.

Das Vorgehen zur *Analyse von Produktionsrisiken* detailliert die Modellierung der Risikofaktoren mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen sowie die Bestimmung vorhandener Interdependenzen. Sind diese Größen bestimmt wird mittels einer MCS ein aggregiertes Risiko für die betrachteten Risikoträger generiert.

In einem weiteren Schritt wird ein Vorgehen entworfen, das die *Ermittlung der Risikopräferenz in der Produktionsplanung* ermöglicht. Dazu werden zwei unterschiedliche, bereits etablierte Verfahren kombiniert. Die Auswahl der Verfahren basiert auf einer Bewertung anhand verschiedener Kriterien aus der Entscheidungstheorie. Maßgeblich für den Anwendungsfall der Produktionsplanung sind dabei die leichte Verständlichkeit der Verfahren und eine hohe Reliabilität der Testergebnisse.

Anschließend werden die entwickelten Systemelemente zu einem Vorgehen kombiniert, das es gemäß der in Kapitel 4 abgeleiteten Anforderungen erlaubt, Risiken und die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers in der operativen Produktionsplanung zu berücksichtigen. Dazu wird der Wertebereich der Risikoträger im betrachteten Produktionssystem auf Basis einer Klassifizierung der zum Planungszeitpunkt aktuellen Situation in der Produktion eingeschränkt. Darauf aufbauend kann durch eine Entscheidungsregel der Wertebereich des jeweiligen Risikoträ-

gers unter Einbeziehung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers für die Produktionsplanung festgelegt werden. Die festgelegten Wertebereiche dienen als Grundlage für die anschließende Lösung des erarbeiteten Produktionsplanungsproblems durch CP.

Bei Anwendung des Systems zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz auf einen realen Anwendungsfall erweist sich die Umsetzung des Systems als technisch machbar. Die simulationstechnische Abbildung verschiedener Szenarien belegt, dass das entwickelte System durch Berücksichtigung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers zu einer Erhöhung der Liefertermintreue beiträgt. Durch die Bestimmung der für die Planungsaufgaben relevanten Risikofaktoren und die darauf basierende Einschränkung des Lösungsraums für die Risikoträger auf Grundlage der aktuellen Risikosituation im Produktionssystem gelingt die Generierung eines Produktionsplans, der die Erreichung der logistischen Zielgrößen in gesteigertem Maße sicherstellt. Indem neben aktuell im Produktionssystem vorhandenen Risiken auch die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers situationsgerecht abgebildet wird, kann eine erhöhte Akzeptanz des systemseitig generierten Produktionsplans gewährleistet werden. Aktuell in der Praxis häufig vorgenommene nachträgliche manuelle Anpassungen durch den Planer aufgrund fehlender Akzeptanz für das Planungsergebnis lassen sich dadurch reduzieren. Nachteilige Auswirkungen auf die Erreichung der logistischen Zielgrößen, die andernfalls mit kurzsichtigen Umplanungsentscheidungen verbunden wären, werden in der Folge gezielt verhindert. Mit dem entwickelten System ist dem Planer folglich ein Instrument zur risikobasierten Plangenerierung an die Hand gegeben, mit dem nicht nur eine optimierte Zielerreichung, sondern auch eine Erhöhung der Effizienz des Produktionsplanungsprozesses realisierbar wird. Bei einer auf den Simulationsstudien aufbauenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erweist sich die Umsetzung des Systems zudem als ökonomisch sinnvoll. Zur Umsetzung des entwickelten Systems in der betrieblichen Praxis kann auf den erstellten verallgemeinernden Anwendungsleitfaden zurückgegriffen werden.

## 10.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden Risikofaktoren betrachtet, welche ihren Ursprung vor allem im betrachteten Produktionssystem selbst haben und sich auch vornehmlich in eben diesem auswirken.

## 10 Schlussbetrachtung

---

Vor dem Hintergrund der steigenden Relevanz von Energiekosten für produzierende Unternehmen scheint es sinnvoll, diese im Bereich der operativen PPS als zusätzliches Risiko zu berücksichtigen und so den Anwendungsbereich des hier entwickelten Systems um ein externes Risiko zu erweitern. Energetische Randbedingungen, wie bspw. die Zuverlässigkeit der Vorhersage verfügbarer Energiemengen aus Photovoltaikanlagen, könnten dann als weitere Risikofaktoren in die Risikoanalyse einbezogen werden.

Weiter werden für die Risikoanalyse im Rahmen des entwickelten Systems vornehmlich Risikoträger und -faktoren betrachtet. Die Analyse berücksichtigt jedoch nicht die Ursachen von Risiken, da diese häufig nicht innerhalb der Betrachtungsgrenze eines Produktionssystems liegen. An dieser Systemgrenze besteht ein Ansatzpunkt für weitere Forschungsarbeiten, um auch Risikoursachen in die Risikoanalyse einbeziehen zu können.

Grundsätzlich kann eine Betrachtung externer Risiken unter dem Aspekt einer zunehmenden Vernetzung von Wertschöpfungsstufen einen wissenschaftlichen Mehrwert generieren. Neben einer Erweiterung der Systemgrenze kommt auch die Betrachtung anderer Planungsphasen, wie etwa der taktischen oder strategischen Produktionsplanung, als Ansatz in Betracht, um weitere Risiken in die Planungsentscheidung einfließen lassen zu können.

Eine weitere Zielsetzung für künftige Arbeiten könnte die Erhöhung der Transparenz des Systems darstellen. Dazu bietet sich bspw. eine detaillierte Aufbereitung der Entscheidungen im Ablauf des Produktionsplanungsalgorithmus an. Eine solche benutzerindividuelle Darstellung der relevanten Informationen birgt weiteres Potenzial, die Akzeptanz und damit die Umsetzungstreue der einzelnen Mitarbeiter in Bezug auf die Planung zu erhöhen und so die Erreichung der logistischen Zielgrößen des Unternehmens weiter zu verbessern.

Neben der präventiven Berücksichtigung von Risiken sind auch reaktive Strategien zur Handhabung von Unsicherheiten unter Berücksichtigung der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers in der Produktion möglich. Vor allem im Bereich der Produktionssteuerung gibt es Ansatzpunkte für die Berücksichtigung von Risiken, die sich unvorhersehbar entwickeln und daher nicht präventiv berücksichtigt werden können.

## 11 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011.  
ISBN: 978-3-44642-595-8.

ALEMANY ET AL. 2015

Aleman, M. M.; Ortiz, A.; Boza, A.; Fuertes-Miquel, V. S.: A model-driven decision support system for reallocation of supply to orders under uncertainty in ceramic companies. *Technological and Economic Development of Economy* 21 (2015) 4, S. 596-625.

BAKER 2014

Baker, K. R.: Minimizing earliness and tardiness costs in stochastic scheduling. *European Journal of Operational Research* 236 (2014) 2, S. 445-452.

BAPTISTE ET AL. 2001

Baptiste, P.; Pape, C.; Nuijten, W.: *Constraint-Based Scheduling. Applying Constraint Programming to Scheduling Problems*. New York: Springer 2001. ISBN: 978-1-46135-574-8. (International Series in Operations Research & Management Science 39).

BARTHOLOMAE & WIENS 2016

Bartholomae, F. W.; Wiens, M.: *Spieltheorie. Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler 2016.  
ISBN: 978-3-83494-419-1.

BECHARA ET AL. 1994

Bechara, A.; Damasio, A. R.; Damasio, H.; Anderson, S. W.: Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition* 50 (1994) 1-3, S. 7-15.

BECKER ET AL. 1964

Becker, G. M.; DeGroot, M. H.; Marschak, J.: Measuring utility by a single-response sequential method. *Behavioral science* 9 (1964) 3, S. 226-232.

BENMANSOUR ET AL. 2012

Benmansour, R.; Allaoui, H.; Artiba, A.: Stochastic single machine scheduling with random common due date. *International Journal of Production Research* 50 (2012) 13, S. 3560-3571.

### BERTSCHE & LECHNER 2004

Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. 3 Aufl. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-54020-871-2. (VDI-Buch).

### BINSWANGER 1980

Binswanger, H. P.: Attitudes Toward Risk: Experimental Measurement in Rural India. American Journal of Agricultural Economics 62 (1980) 3, S. 395-407.

### BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.M.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. London: Springer 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4.

### BMBF 2018

BMBF: quadrika. quality data based risk assessment for industry 4.0. <[http://www.softwaresysteme.pt-dlr.de/media/content/Infoblatt\\_quadrika.pdf](http://www.softwaresysteme.pt-dlr.de/media/content/Infoblatt_quadrika.pdf)> - 14.04.2018.

### BMF 2005

BMF: Bilanzsteuerrechtliche Beurteilung von Aufwendungen zur Einführung eines betriebswirtschaftlichen Softwaresystems (ERP-Software) BMF vom 18.11.2005. <<https://esth.bundesfinanzministerium.de/esth/2016/C-Anhaenge/Anhang-09/XII/inhalt.html>> - 14.02.2020.

### BRAMBRING 2017

Brambring, F.: Steigerung der Datenintegrität in der Produktionssteuerung. Diss. RWTH Aachen (2017). Aachen: Apprimus 2017. ISBN: 978-3-86359-537-1. (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 2017, Band 25).

### BRANDA ET AL. 2016

Branda, M.; Novotný, J.; Olstad, A.: Fixed interval scheduling under uncertainty – A tabu search algorithm for an extended robust coloring formulation. Computers & Industrial Engineering 93 (2016), S. 45-54.

### BREDOW 2014

Bredow, M. v.: Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie. Diss. Techn. Univ. München (2012). München: Utz 2014. ISBN: 978-3-83164-337-0. (Forschungsberichte iw 281).

### BUSERT & FAY 2018

Busert, T.; Fay, A.: Information Quality Dimensions for Identifying and Handling Inaccuracy and Uncertainty in Production Planning and Control. In: IEEE (Hrsg.): 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), ETFA. Turin, 04.09. - 07.09.: IEEE 2018, S. 581-588. ISBN: 978-1-53867-108-5.

### CHARNESS ET AL. 2013

Charness, G.; Gneezy, U.; Imas, A.: Experimental methods: Eliciting risk preferences. *Journal of Economic Behavior & Organization* 87 (2013), S. 43-51.

### CHO ET AL. 2018

Cho, J.; Lim, G. J.; Kim, S. J.; Biobaku, T.: Liquefied natural gas inventory routing problem under uncertain weather conditions. *International Journal of Production Economics* 204 (2018), S. 18-29.

### CROSETTO & FILIPPIN 2012

Crosetto, P.; Filippin, A.: The 'Bomb' Risk Elicitation Task. *SSRN Electronic Journal* (2012) 517, S. 1-29.

### CROSETTO & FILIPPIN 2017

Crosetto, P.; Filippin, A.: The Sound of Others: Surprising Evidence of Conformist Behavior. *Southern Economic Journal* 83 (2017) 4, S. 1038-1051.

### CUHLS 2019

Cuhls, K.: Die Delphi-Methode – eine Einführung. In: Niederberger, M. et al. (Hrsg.): *Delphi-Verfahren in den Sozial- und Gesundheitswissenschaften*. Wiesbaden: Springer 2019, S. 3-31. ISBN: 978-3-65821-656-6.

### CZUCHRA 2010

Czuchra, W.: *UML in logistischen Prozessen. Graphische Sprache zur Modellierung der Systeme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010. ISBN: 978-3-83480-796-0.

### DAHMEN 2002

Dahmen, J. W.: *Prozeßorientiertes Risikomanagement zur Handhabung von Produktrisiken*. Diss. RWTH Aachen (2002). Aachen: Shaker 2002. ISBN: 3-83220-835-6. (Berichte aus der Produktionstechnik 20).

### DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschpralinen? Berlin: Springer 2009.  
ISBN: 978-3-64200-633-3. (VDI-Buch).

### DAS & LASHKARI 2015

Das, K.; Lashkari, R. S.: Risk readiness and resiliency planning for a supply chain. International Journal of Production Research 53 (2015) 22, S. 6752-6771.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT 2012: FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Deutsche Gesellschaft für Qualität. 5. Aufl. Berlin: Beuth 2012. ISBN: 3-41032-333-3.  
(Qualitätsplanung, Qualitätslenkung 13-11).

### DIEDERICHS 2012

Diederichs, M.: Risikomanagement und Risikocontrolling. 3. Aufl. München: Franz Vahlen 2012. ISBN: 978-3-80064-222-9.  
(Finance competence).

### DIN ISO 31000

DIN ISO 31000: Risikomanagement: Grundsätze und Leitlinien. Berlin: Beuth 2011.

### DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren. Berlin: Beuth 2003.

### DIN EN ISO 13849-1

DIN EN ISO 13849-1: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen. Berlin: Beuth 2015.

### DOMSCHKE ET AL. 1997

Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. 2. Aufl. Berlin: Springer 1997. ISBN: 3-54063-560-2.  
(Springer-Lehrbuch).

### DYCKHOFF & SPENGLER 2010

Dyckhoff, H.; Spengler, T. S.: Produktionswirtschaft. Eine Einführung. 3. Aufl. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-64213-683-2.  
(Springer-Lehrbuch).

### EISENFÜHR & WEBER 2003

Eisenführ, F.; Weber, M.: Rationales Entscheiden. 4. Aufl. Berlin: Berlin Heidelberg 2003. ISBN: 978-3-54044-023-9. (Springer-Lehrbuch).

### ELEY 2012

Eley, M.: Simulation in der Logistik. Berlin: Springer 2012.  
ISBN: 978-3-64227-372-8.

### ELYASI & SALMASI 2013

Elyasi, A.; Salmasi, N.: Due date assignment in single machine with stochastic processing times. International Journal of Production Research 51 (2013) 8, S. 2352-2362.

### ENGEL 2010

Engel, J.: Anwendungsorientierte Mathematik: Von Daten zur Funktion. Eine Einführung in die mathematische Modellbildung für Lehramtsstudierende. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-54089-086-7.  
(Mathematik für das Lehramt).

### ERBEN & ROMEIKE 2003

Erben, R.; Romeike, F.: Komplexität als Ursache steigender Risiken.  
In: Romeike, F. et al. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Risikomanagement. Chance für Industrie und Handel Methoden, Beispiele, Checklisten. Wiesbaden: Gabler 2003, S. 43-67. ISBN: 978-3-66305-716-1.

### EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung. 4. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 978-3-64262-640-1.  
(VDI-Buch).

### EWALD ET AL. 2012

Ewald, J.; Maart, S.; Mußhoff, O.: Messung der subjektiven Risikoeinstellung von Entscheidern: Existieren Methoden- und Personengruppenunterschiede? German Journal of Agricultural Economics 61 (2012) 3, S. 148-161.

### FAHRMEIR ET AL. 2016

Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. Berlin: Springer 2016. ISBN: 978-3-66250-371-3.

### FRANKE & HAX 2004

Franke, G.; Hax, H.: Finanzwirtschaft des Unternehmens und Kapitalmarkt. 5. Aufl. Berlin: Springer 2004. ISBN: 978-3-54040-644-0.  
(Springer-Lehrbuch).

FREY ET AL. 2017

Frey, R.; Pedroni, A.; Mata, R.; Rieskamp, J.; Hertwig, R.: Risk preference shares the psychometric structure of major psychological traits. *Science advances* 3 (2017) 10, S. e1701381.

GADATSCH 2020

Gadatsch, A.: Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: Eine Einführung für Studenten und Praktiker. 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2020. ISBN: 978-3-83482-428-8.

GEBHARD 2009

Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-83491-677-8.  
(Produktion und Logistik).

GENC 2015

Genc, E.: Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement. Diss. Techn. Univ. München (2015). München: Utz Herbert 2015.  
ISBN: 978-3-83164-525-1. (Forschungsberichte iw 308).

GERKE & HEILIG 1975

Gerke, W.; Heilig, K.: Das Polaritätendiagramm als Methode zur Bestimmung von Risikoneigung. *Psychologie und Praxis* 19 (1975) 3, S. 107-116.

GLEIBNER & WOLFRUM 2001

Gleißner, W.; Wolfrum, M.: Risiko: Grundlagen aus Statistik, Entscheidungs- und Kapitalmarkttheorie. In: Gleißner, W. et al. (Hrsg.): Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel. Methoden, Fallbeispiele, Checklisten. Wiesbaden: Gabler 2001, S. 139-174.  
ISBN: 978-3-32290-747-9.

GLEIBNER & WOLFRUM 2019

Gleißner, W.; Wolfrum, M.: Risikoaggregation und Monte-Carlo-Simulation. Wiesbaden: Springer 2019. ISBN: 978-3-65824-273-2.

GÖTZE 2014

Götze, U.: Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Aufl. Berlin: Springer 2014.  
ISBN: 978-3-64254-622-8. (Springer-Lehrbuch).

GRAHAM ET AL. 1979

Graham, R. L.; Lawler, E. L.; Lenstra, J. K.; Kan, A. H. G. Rinnooy: Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. *Annals of Discrete Mathematics* 5 (1979), S. 287-326.

GRASCHITZ 2017

Graschitz, S. M.: Prüfungsqualität und Risikopräferenzen. Diss. Universität Innsbruck (2015). Wiesbaden: Springer 2017. ISBN: 978-3-65817-749-2.

GUTENBERG 1963

Gutenberg, E.: Die Produktion. 9. Aufl. Berlin: Springer 1963.  
ISBN: 978-3-66237-169-5. (Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre 1).

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI 1989. ISBN: 3-18400-924-6.

HÄRTERICH 1987

Härterich, S.: Risk Management von industriellen Produktions- und Produktrisiken. Diss. Univ. Mannheim (1987). Karlsruhe: Versicherungswirtschaft 1987. ISBN: 3-88487-132-3. (Veröffentlichungen des Instituts für Versicherungswissenschaft der Universität Mannheim 37).

HÄRTLER 2016

Härtler, G.: Statistik für Ausfalldaten. Berlin: Springer 2016.  
ISBN: 978-3-66250-302-7.

HECKMANN ET AL. 2015

Heckmann, I.; Comes, T.; Nickel, S.: A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling. *Omega* 52 (2015), S. 119-132.

HEIN 2007

Hein, D.: Strategisches Risikomanagement im Maschinen- und Anlagenbau. Diss. RWTH Aachen (2007). Aachen: Shaker 2007.  
ISBN: 978-3-83226-733-9. (Berichte aus der Produktionstechnik 29).

HEINECKE 2013

Heinecke, G.: Resilient Automotive Production in Vulnerable Supply Networks. A Supply Chain Event Management System. Diss. ETH Zürich (2013). <<https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/77302/eth-7891-02.pdf?sequence=2&isAllowed=y>> - 28.04.2018.

HEINEN ET AL. 2008

Heinen, T.; Rimpau, C.; Wörn, A.: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, P. et al. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Hannover: PZH 2008, S. 19-33. ISBN: 978-3-93902-696-9.

HENG ET AL. 2019

Heng, Z.; Aiping, L.; Liyun, X.; Moroni, G.: Automatic Estimate of OEE Considering Uncertainty. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 630-635.

HIGBEE 1971

Higbee, K. L.: Expression of "Walter Mitty-ness" in actual behavior. *Journal of Personality and Social Psychology* 20 (1971) 3, S. 416-422.

HOFSTEDT & WOLF 2007

Hofstedt, P.; Wolf, A.: Einführung in die Constraint-Programmierung. Grundlagen, Methoden, Sprachen, Anwendungen. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-54023-184-4. (eXamen.press).

HÖLSCHER 2002

Hölscher, R.: Von der Versicherung zur integrativen Risikobewältigung: Die Konzeption eines modernen Risikomanagements. In: Hölscher, R. et al. (Hrsg.): Herausforderung Risikomanagement. Identifikation, Bewertung und Steuerung industrieller Risiken. Wiesbaden: Gabler 2002, S. 3-32. ISBN: 978-3-32282-373-1.

HOLT & LAURY 2002

Holt, C. A.; Laury, S. K.: Risk Aversion and Incentive Effects. *American Economic Review* 92 (2002) 5, S. 1644-1655.

HOLZMEISTER & PFURTSCHELLER 2016

Holzmeister, F.; Pfurtscheller, A.: oTree: The "bomb" risk elicitation task. *Journal of Behavioral and Experimental Finance* 10 (2016), S. 105-108.

HU & HU 2016

Hu, Z.; Hu, G.: A two-stage stochastic programming model for lot-sizing and scheduling under uncertainty. *International Journal of Production Economics* 180 (2016), S. 198-207.

### HUßLEIN & BREIDBACH 2015

Hußlein, T.; Breidbach, J.: Anwendung und Anwendbarkeit von Optimierungsalgorithmen in der Praxis. In: Claus, T. et al. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen. Berlin: Springer Gabler 2015, S. 227-239. ISBN: 978-3-66243-541-0.

### IBM 2020

IBM: Initial constraint propagation. <[https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P\\_12.8.0/ilog.odms.cpo.help/CP\\_Optimizer/Getting\\_started/topics/intro\\_solve\\_initialProp.html](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.8.0/ilog.odms.cpo.help/CP_Optimizer/Getting_started/topics/intro_solve_initialProp.html)> - 17.02.2020.

### INDERFURTH & VOGELGESANG 2013

Inderfurth, K.; Vogelgesang, S.: Concepts for safety stock determination under stochastic demand and different types of random production yield. European Journal of Operational Research 224 (2013) 2, S. 293-301.

### JABBARZADEH ET AL. 2018

Jabbarzadeh, A.; Haughton, M.; Pourmehdi, F.: A robust optimization model for efficient and green supply chain planning with postponement strategy. International Journal of Production Economics (2018) 214, S. 266-283.

### JACKSON ET AL. 1972

Jackson, D. N.; Hourany, L.; Vidmar, N. J.: A four-dimensional interpretation of risk taking. Journal of personality 40 (1972) 3, S. 483-501.

### KALL & WALLACE 1997

Kall, P.; Wallace, S. W.: Stochastic programming. Chichester: Wiley 1997. ISBN: 978-0-47195-158-2. (Wiley-Interscience series in systems and optimization).

### KARNER ET AL. 2019

Karner, M.; Glawar, R.; Sihm, W.; Matyas, K.: An industry-oriented approach for machine condition-based production scheduling. Procedia CIRP 81 (2019), S. 938-943.

### KIRSTE 2017

Kirste, M.: Dynamic lot sizing problems with stochastic production output. Diss. Universität Köln (2017). Norderstedt: Books on Demand 2017. ISBN: 978-3-74483-805-4.

### KLETTI & SCHUMACHER 2011

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-64213-844-7.

### KLÖBER-KOCH ET AL. 2016

Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Vorausschauende Produktionsplanung unter Beachtung des operativen Risikos. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 10, S. 602-606.

### KLÖBER-KOCH ET AL. 2017A

Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Predictive Production Planning Considering the Operative Risk in a Manufacturing System. Procedia CIRP 63 (2017), S. 360-365.

### KLÖBER-KOCH ET AL. 2017B

Klöber-Koch, J.; Pielmeier, J.; Grimm, S.; Brandt, M. M.; Schneider, M.; Reinhart, G.: Knowledge-Based Decision Making in a Cyber-Physical Production Scenario. Procedia Manufacturing 9 (2017), S. 167-174.

### KLÖBER-KOCH ET AL. 2018

Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Approach For Risk Identification And Assessment In A Manufacturing System. Procedia CIRP 72 (2018), S. 683-688.

### KNOCHE 2005

Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Diss. RWTH Aachen (2004). Aachen: Shaker 2005. ISBN: 3-83223-799-2. (Berichte aus der Produktionstechnik).

### KNOLL & BÖHM 2014

Knoll, M.; Böhm, M.: Praxisorientiertes IT-Risikomanagement. Konzeption, Implementierung und Überprüfung. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt 2014. ISBN: 978-3-89864-833-2.

### KOCA ET AL. 2015

Koca, E.; Yaman, H.; Selim Aktürk, M.: Stochastic lot sizing problem with controllable processing times. Omega 53 (2015), S. 1-10.

### KOGAN & WALLACH 1964

Kogan, N.; Wallach, M. A.: Risk taking. A study in cognition and personality. New York: Holt, Rinehart & Winston 1964. ISBN: 978-0-03045-720-3.

### KÖNIG 2007

König, R.: Management betrieblicher Risiken bei produzierenden Unternehmen. Diss.RWTH. Aachen (2007). <<http://publications.rwth-aachen.de/record/49989/>> - 12.07.2017.

### KÖNIGS 2017

Königs, H.-P.: IT-Risikomanagement mit System. Praxisorientiertes Management von Informationssicherheits-, IT- und Cyber-Risiken. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-65812-004-7.

### KRAHNEN ET AL. 1997

Krahn, J. P.; Rieck, C.; Theissen, E.: Messung individueller Risikoeinstellungen. Universität Frankfurt (1997). <[https://www.ifk-cfs.de/fileadmin/downloads/publications/wp/97\\_03.pdf](https://www.ifk-cfs.de/fileadmin/downloads/publications/wp/97_03.pdf)>.

### KREBS 2012

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. Diss. Techn. Univ. München (2011). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-83164-156-7. (Forschungsberichte iw 255).

### KURBEL & ENDRES 2005

Kurbel, K.; Endres, A.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2005. ISBN: 3-48657-578-3. (Handbuch der Informatik Anwendungen in Naturwissenschaften, Technik und Medizin 2).

### KURBEL 2016

Kurbel, K.: Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. 8. Aufl. Berlin: De Gruyter 2016. ISBN: 978-3-11044-169-7.

### LAUX ET AL. 2018

Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie. 10. Aufl. Berlin: Springer 2018. ISBN: 978-3-66257-817-9.

### LAVASTRE ET AL. 2012

Lavastre, O.; Gunasekaran, A.; Spalanzani, A.: Supply chain risk management in French companies. Decision Support Systems 52 (2012) 4, S. 828-838.

LEJUEZ ET AL. 2002

Lejuez, C. W.; Read, J. P.; Kahler, C. W.; Richards, J. B.; Ramsey, S. E.; Stuart, G. L.; Strong, D. R.; Brown, R. A.: Evaluation of a behavioral measure of risk taking: The Balloon Analogue Risk Task (BART). *Journal of Experimental Psychology: Applied* 8 (2002) 2, S. 75-84.

LI 2017

Li, H.: Stochastic Single-Machine Scheduling With Learning Effect. *IEEE Transactions on Engineering Management* 64 (2017) 1, S. 94-102.

LI ET AL. 2012

Li, Z.; Tirachini, A.; Hensher, D. A.: Embedding Risk Attitudes in a Scheduling Model: Application to the Study of Commuting Departure Time. *Transportation Science* 46 (2012) 2, S. 170-188.

LÖDDING 2016

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2016. ISBN: 978-3-66248-459-3. (VDI-Buch).

LÖDDING 2020

Lödding, H.: PPS-Report 2019. Studienergebnisse. Garbsen: TEWISS-Technik und Wissen GmbH 2020. ISBN: 978-3-95900-402-2.

LOOS 1999

Loos, P.: Grunddatenverwaltung und Betriebsdatenerfassung als Basis der Produktionsplanung und -steuerung. In: Corsten, H. et al. (Hrsg.): Einführung in das Produktionscontrolling. München: Vahlen 1999, S. 227-252. ISBN: 3-80062-322-6. (Controlling).

MALAPERT ET AL. 2012

Malapert, A.; Guéret, C.; Rousseau, L.-M.: A constraint programming approach for a batch processing problem with non-identical job sizes. *European Journal of Operational Research* 221 (2012) 3, S. 533-545.

MARCO 2018

Marco, A. de: Project Management for Facility Constructions. A Guide for Engineers and Architects. 2. Aufl. Berlin: Springer 2018. ISBN: 978-3-31975-431-4.

### MATA ET AL. 2011

Mata, R.; Josef, A. K.; Samanez-Larkin, G. R.; Hertwig, R.: Age differences in risky choice: a meta-analysis. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1235 (2011), S. 18-29.

### MAURER 2016

Maurer, S.: Frühaufklärung kritischer Situationen in Versorgungsprozessen. Diss. Techn. Univ. München (2015). München: Utz Herbert 2016. ISBN: 978-3-83164-554-1. (Forschungsberichte iw b 316).

### MENKHOFF & SAKHA 2017

Menkhoff, L.; Sakha, S.: Estimating risky behavior with multiple-item risk measures. *Journal of Economic Psychology* 59 (2017), S. 59-86.

### MEYER 2000

Meyer, R.: Entscheidungstheorie. Ein Lehr- und Arbeitsbuch. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2000. ISBN: 978-3-40922-249-5.

### MORYSON 2004

Moryson, R.-D.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung. Diss. ETH Zürich (2004). Düsseldorf: VDI 2004. ISBN: 978-3-18338-820-2. (Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 388).

### MOSLER 2017

Mosler, A.: Integrierte Unternehmensplanung. Anforderungen, Lösungen und Echtzeitsimulation im Rahmen von Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer 2017. ISBN: 978-3-65808-751-7.

### MÜLLER 2019A

Müller, D.: Investitionsrechnung und Investitionscontrolling. 2. Aufl. Berlin: Springer 2019. ISBN: 978-3-66257-609-0. (Springer-Lehrbuch).

### MÜLLER ET AL. 2013

Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-64231-945-7.

### MÜLLER ET AL. 2019B

Müller, T.; Kiesel, R.; Schmitt, R.: Automated and Predictive Risk Assessment in Modern Manufacturing Based on Machine Learning. In: Schmitt, R. et al. (Hrsg.): Advances in Production Research. Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Aachen, November 19-20, 2018. Cham: Springer International Publishing 2019, S. 91-100. ISBN: 978-3-03003-451-1.

### MUN 2010

Mun, J.: Modeling risk. Applying Monte Carlo risk simulation, strategic real options, stochastic forecasting and portfolio optimization. 2. Aufl. Hoboken: Wiley 2010. ISBN: 978-0-47059-221-2. (Wiley finance).

### MÜNKLER ET AL. 2010

Münkler, H.; Bohlander, M.; Meurer, S.: Sicherheit und Risiko. Über den Umgang mit Gefahr im 21. Jahrhundert. Bielefeld: transcript 2010. ISBN: 978-3-83761-229-5. (Sozialtheorie).

### NAGEL 2011

Nagel, J.: Risikoorientiertes Anlaufmanagement. Diss. Brandenburgische Techn. Universität Cottbus (2010). Wiesbaden: Gabler 2011. ISBN: 978-3-83493-087-3. (Beiträge zur Produktionswirtschaft).

### NIESEN ET AL. 2016

Niesen, T.; Houy, C.; Fettke, P.; Loos, P.: Towards an Integrative Big Data Analysis Framework for Data-driven Risk Management in Industry 4.0. In: Bui, T. X. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 5-8 January 2016, Kauai, Hawaii. Piscataway, NJ: IEEE 2016, S. 5065-5074. ISBN: 978-0-76955-670-3.

### NYHUIS & WIENDAHL 2012

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-54092-838-6.

### NYHUIS 2008

Nyhuis, P.: Produktionskennlinien – Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer 2008, S. 185-218. ISBN: 978-3-54075-641-5.

### NYHUIS ET AL. 2016

Nyhuis, P.; Mayer, J.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Engehausen, F.; Hempel, T.; Hünnekes, P.: Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen. Studienergebnisse. Garbsen: PZH 2016. ISBN: 978-3-95900-104-5.

### NYHUIS ET AL. 2017

Nyhuis, P.; Hübner, M.; Quirico, M.; Schäfers, P.; Schmidt, M.: Veränderung in der Produktionsplanung und -steuerung. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017, S. 31-50. ISBN: 978-3-44644-642-7.

### OEHLER & UNSER 2001

Oehler, A.; Unser, M.: Finanzwirtschaftliches Risikomanagement. Berlin: Springer 2001. ISBN: 978-3-54067-766-6. (Springer-Lehrbuch).

### OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Diss. Techn. Univ. München (2012). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-83164-206-9. (Forschungsberichte iw 265).

### PAPROCKA & SKOŁUD 2017

Paprocka, I.; Skołod, B.: A hybrid multi-objective immune algorithm for predictive and reactive scheduling. *Journal of Scheduling* 20 (2017) 2, S. 165-182.

### PENNINGS & SMIDTS 2000

Pennings, J. M.; Smidts, A.: Assessing the Construct Validity of Risk Attitude. *SSRN Electronic Journal* 46 (2000) 10, S. 1337-1348.

### PERGHER & ALMEIDA 2017

Pergher, I.; Almeida, A. T. de: A multi-attribute decision model for setting production planning parameters. *Journal of Manufacturing Systems* 42 (2017), S. 224-232.

### PERGHER & ALMEIDA 2018

Pergher, I.; Almeida, A. T. de: A multi-attribute, rank-dependent utility model for selecting dispatching rules. *Journal of Manufacturing Systems* 46 (2018), S. 264-271.

PETROVIC & DUENAS 2006

Petrovic, D.; Duenas, A.: A fuzzy logic based production scheduling/rescheduling in the presence of uncertain disruptions. *Fuzzy Sets and Systems* 157 (2006) 16, S. 2273-2285.

PFISTER ET AL. 2017

Pfister, H.-R.; Jungermann, H.; Fischer, K.: *Die Psychologie der Entscheidung. Eine Einführung*. 4. Aufl. Berlin: Springer 2017.  
ISBN: 978-3-66253-037-5.

PINEDO 2012

Pinedo, M. L.: *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems*. 4. Aufl. Boston, MA: Springer US 2012. ISBN: 978-1-46141-986-0.

PLESKAC ET AL. 2008

Pleskac, T. J.; Wallsten, T. S.; Wang, P.; Lejuez, C. W.: Development of an automatic response mode to improve the clinical utility of sequential risk-taking tasks. *Experimental and clinical psychopharmacology* 16 (2008) 6, S. 555-564.

QAZI ET AL. 2018

Qazi, A.; Dickson, A.; Quigley, J.; Gaudenzi, B.: Supply chain risk network management: A Bayesian belief network and expected utility based approach for managing supply chain risks. *International Journal of Production Economics* 196 (2018), S. 24-42.

RAHMANI ET AL. 2013

Rahmani, D.; Ramezani, R.; Fattahi, P.; Heydari, M.: A robust optimization model for multi-product two-stage capacitated production planning under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling* 37 (2013) 20-21, S. 8957-8971.

RAMEZANIAN & SAIDI-MEHRABAD 2013

Ramezani, R.; Saidi-Mehrabad, M.: Hybrid simulated annealing and MIP-based heuristics for stochastic lot-sizing and scheduling problem in capacitated multi-stage production system. *Applied Mathematical Modelling* 37 (2013) 7, S. 5134-5147.

RANDEN VAN ET AL. 2016

Randen van, H.; Bercker, C.; Fiendl, J.: *Einführung in UML. Analyse und Entwurf von Software*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016.  
ISBN: 978-3-65814-411-1.

### RATNAYAKE & ANTOSZ 2017

Ratnayake, R. C.; Antosz, K.: Risk-Based Maintenance Assessment in the Manufacturing Industry: Minimisation of Suboptimal Prioritisation. *Management and Production Engineering Review* 8 (2017) 1, S. 38-45.

### RAYCHAUDHURI 2008

Raychaudhuri, S.: Introduction to Monte Carlo simulation. In: Mason, S. J. (Hrsg.): 2008 Winter Simulation Conference, 2008 Winter Simulation Conference (WSC). Miami, FL, USA, 07.12.2008 - 10.12.2008. Piscataway, NJ: IEEE 2008, S. 91-100. ISBN: 978-1-42442-707-9.

### REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION 1991:

Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Steuerung Teil 1. REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation. 1. Aufl. München: Hanser 1991. ISBN: 3-44616-349-2.

### REINHART & ZÜHLKE 2017

Reinhart, G.; Zühlke, D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser 2017, S. XXXI-XXXVIII. ISBN: 978-3-44644-642-7.

### RIMPAU 2011

Rimpau, C.: Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte. Diss. Techn. Univ. München (2010). München: Utz 2011. ISBN: 978-3-83164-015-7. (Forschungsberichte iwB 239).

### ROBERT & CASELLA 2010

Robert, C.; Casella, G.: *Introducing Monte Carlo Methods with R*. New York: Springer 2010. ISBN: 978-1-44191-575-7. (Use R).

### ROGERS 1999

Rogers, R.: Dissociable Deficits in the Decision-Making Cognition of Chronic Amphetamine Abusers, Opiate Abusers, Patients with Focal Damage to Prefrontal Cortex, and Tryptophan-Depleted Normal Volunteers Evidence for Monoaminergic Mechanisms. *Neuropsychopharmacology* 20 (1999) 4, S. 322-339.

### ROGLER 2002

Rogler, S.: *Risikomanagement im Industriebetrieb. Analyse von Beschaffungs-, Produktions- und Absatzrisiken*. Habil. Universität Göttingen (1999). Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2002. ISBN: 978-3-82449-084-4. (Neue betriebswirtschaftliche Forschung 296).

### ROMEIKE & HAGER 2009

Romeike, F.; Hager, P.: Erfolgsfaktor Risiko-Management 2.0. Methoden, Beispiele, Checklisten; Praxishandbuch für Industrie und Handel. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-83490-895-7.

### ROMEIKE & HUTH 2016

Romeike, R.; Huth, M.: Struktur des Risikomanagements in der Logistik. In: Huth, M. et al. (Hrsg.): Risikomanagement in der Logistik. Konzepte - Instrumente - Anwendungsbeispiele. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer 2016, S. 49-84. ISBN: 978-3-65805-895-1.

### ROMEIKE 2003A

Romeike, F.: Der Prozess der Risikosteuerung und -kontrolle. In: Romeike, F. et al. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Risikomanagement. Chance für Industrie und Handel Methoden, Beispiele, Checklisten. Wiesbaden: Gabler 2003, S. 235-243. ISBN: 978-3-66305-716-1.

### ROMEIKE 2003B

Romeike, F.: Der Prozess des strategischen und operativen Risikomanagements. In: Romeike, F. et al. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Risikomanagement. Chance für Industrie und Handel Methoden, Beispiele, Checklisten. Wiesbaden: Gabler 2003, S. 147-161. ISBN: 978-3-66305-716-1.

### ROMEIKE 2003C

Romeike, F.: Risikoidentifikation und Risikokategorien. In: Romeike, F. et al. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Risikomanagement. Chance für Industrie und Handel Methoden, Beispiele, Checklisten. Wiesbaden: Gabler 2003, S. 165-182. ISBN: 978-3-66305-716-1.

### ROSSI ET AL. 2008

Rossi, F.; Beek van, P.; Walsh, T.: Constraint programming. In: van Harmelen, F. et al. (Hrsg.): Handbook of knowledge representation. 1. Aufl. Amsterdam: Elsevier 2008, S. 181-212. ISBN: 978-0-08055-702-1. (Foundations of artificial intelligence).

### RUGE ET AL. 2014

Ruge, P.; Birk, C.; Wermuth, M. (Hrsg.): Das Ingenieurwissen. Mathematik und Statistik. Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-64240-473-3.

### RUMPE 2011

Rumpe, B.: Modellierung mit UML. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-64222-412-6.

### RUNKLER 2010

Runkler, T. A.: Data Mining. Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010.

ISBN: 978-3-83480-858-5. (Computational intelligence).

### SARIN ET AL. 2014

Sarin, S. C.; Sherali, H. D.; Liao, L.: Minimizing conditional-value-at-risk for stochastic scheduling problems. *Journal of Scheduling* 17 (2014) 1, S. 5-15.

### SCHILDBERG-HÖRISCH 2018

Schildberg-Hörisch, H.: Are Risk Preferences Stable? *Journal of Economic Perspectives* 32 (2018) 2, S. 135-154.

### SCHIMMELPFENG 2001

Schimmelpfeng, K.: Risikomanagement in Industrieunternehmen.

In: Götze, U. et al. (Hrsg.): *Risikomanagement*. Berlin: Springer 2001, S. 277-297. ISBN: 978-3-64263-305-8. (Beiträge zur Unternehmensplanung).

SCHMITT & ZENTIS 2011 Schmitt, R.; Zentis, T.: New approach for risk analysis and management in medical engineering. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium et al. (Hrsg.): Proceedings / Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2011, Integrity (RAMS)*. Lake Buena Vista, FL, USA, 1/24/2011 - 1/27/2011. Piscataway, NJ: IEEE 2011, S. 1-6. ISBN: 978-1-42448-857-5.

### SCHNEEWEIß 1997

Schneeweiß, C.: *Einführung in die Produktionswirtschaft*. 6. Aufl. Berlin: Springer 1997. ISBN: 978-3-54062-585-8. (Springer-Lehrbuch).

### SCHNORRENBURG & GOEBELS 1997

Schnorrenberg, U.; Goebels, G.: *Risikomanagement in Projekten. Methoden und ihre praktische Anwendung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 1997. ISBN: 978-3-32283-064-7.

### SCHOLL 2001

Scholl, A.: *Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen - Konzepte und Methoden - experimentelle Untersuchungen*. Habil. Techn. Univ. Darmstadt (2001). Heidelberg: Physica 2001. ISBN: 978-3-79081-408-8.

### SCHUH & SCHMIDT 2014

Schuh, G.; Schmidt, C.: Grundlagen des Produktionsmanagements.  
In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Produktionsmanagement. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014, S. 1-62. ISBN: 978-3-64254-287-9.

### SCHUH ET AL. 2006

Schuh, G.; Klotzbach, C.; Hein, D.: Mit Risikomanagement in eine erfolgreiche Zukunft. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 9, S. 514-516.

### SCHUH ET AL. 2012A

Schuh, G.; Brandenburg, U.; Cuberq, S.: Aufgaben. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. 4 Aufl. Berlin: Springer 2012, S. 29-81. ISBN: 978-3-64225-422-2. (VDI-Buch).

### SCHUH ET AL. 2012B

Schuh, G.; Schmidt, C.; Helmig, J.: Prozesse. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. 4 Aufl. Berlin: Springer 2012, S. 109-194. ISBN: 978-3-64225-422-2. (VDI-Buch).

### SCHUH ET AL. 2013

Schuh, G.; Stich, V.; Meißner, J.; Rechke, J.; Schnittler, V.: Die Untersuchung im Überblick. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. Aachen: FiR 2013, S. 11-20. ISBN: 978-3-94302-415-9.

### SCHUH ET AL. 2014

Schuh, G.; Schmidt, C.; Schürmeyer, M.: Eigenfertigungsplanung und -steuerung. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Produktionsmanagement. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014, S. 197-234. ISBN: 978-3-64254-287-9.

### SCHUH ET AL. 2015

Schuh, G.; Reuter, C.; Hauptvogel, A.; Brambring, F.; Hempel, T.: Einleitung. In: Schuh, G. (Hrsg.): ProSense. Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojektes; Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik. Aachen: Apprimus 2015, S. 1-13. ISBN: 978-3-86359-346-9.

### SOUSA ET AL. 2015

Sousa, S.; Nunes, E.; Lopes, I.: Measuring and managing operational risk in industrial processes. FME Transaction 43 (2015) 4, S. 295-302.

### SPREMANN 2014

Spremann, K.: Risk Ruler-Taxonomie. In: Gaul, W. et al. (Hrsg.): Mathematische Methoden der Wirtschaftswissenschaften. Festschrift für Otto Opitz. Heidelberg: Physica 2014, S. 282-300. ISBN: 978-3-66212-434-5.

### STADTLER 1988

Stadtler, H.: Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung. Habil. Universität Hamburg (1987). Heidelberg: Physica 1988. ISBN: 978-3-79080-401-0. (Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft 23).

### STATISTA GMBH 2020A

STATISTA GMBH: Anteil der Wirtschaftssektoren an der Bruttowertschöpfung in 2019. <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36846/umfrage/anteil-der-wirtschaftsbereiche-am-bruttoinlandsprodukt/>> - 19.05.2020.

### STATISTA GMBH 2020B

STATISTA GMBH: Beschäftigte im produzierenden Gewerbe in Deutschland bis 2019. <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2190/umfrage/anzahl-der-erwerbstaetigen-im-produzierenden-gewerbe/>> - 19.05.2020.

### STATISTA GMBH 2020C

STATISTA GMBH: Exportquote im Maschinenbau in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2019. <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/235617/umfrage/exportquote-im-maschinenbau-in-deutschland/>> - 19.05.2020.

### STEINMETZ 2007

Steinmetz, M.: Risikosituation und -handhabung in der Produktion. Ein Konzept zur Verbesserung der Risikosituation. Diss. Techn. Univ. München. 1. Aufl: TCW Transfer-Centrum 2007. ISBN: 978-3-93723-671-1. (TCW Wissenschaft und Praxis 47).

### STEUL 2003

Steul, M.: Risikoverhalten privater Kapitalanleger. Implikationen für das Finanzdienstleistungsmarketing. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2003. ISBN: 978-3-82447-965-8. (Forschungsgruppe Konsum und Verhalten).

### SUDHOFF 2008

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Diss. Techn. Univ. München (2007). München: Utz 2008. ISBN: 3-83160-749-4. (Forschungsberichte iwv 208).

TEMPELMEIER & HILGER 2015

Tempelmeier, H.; Hilger, T.: Linear programming models for a stochastic dynamic capacitated lot sizing problem. *Computers & Operations Research* 59 (2015), S. 119-125.

TEMPELMEIER 2011

Tempelmeier, H.: A column generation heuristic for dynamic capacitated lot sizing with random demand under a fill rate constraint. *Omega* 39 (2011) 6, S. 627-633.

ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 5 (1976) 7, S. 304-309.

VAN LEIJENHORST ET AL. 2008

van Leijenhorst, L.; Westenberg, P. M.; Crone, E. A.: A developmental study of risky decisions on the cake gambling task: age and gender analyses of probability estimation and reward evaluation. *Developmental neuropsychology* 33 (2008) 2, S. 179-196.

VARGAS ET AL. 2016

Vargas, A.; Day, S.; Boza, A.; Ortiz, A.; Ludäscher, B.; Sacala, I.; Moisescu, M.: Decision-Making System and Operational Risk Framework for Hierarchical Production Planning. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics* 18 (2016) 3, S. 72-81.

VDI 1992

VDI (Hrsg.): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI 1992. ISBN: 978-3-18401-006-5.

VDI 2815-1

VDI 2815-1: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung – Einführung, Grundlagen. Berlin: Beuth 1978.

VDI 3633, Blatt 1

VDI 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen: Grundlagen. Berlin: Beuth 2014.

### VI & OBRIST 2018

Vi, C. T.; Obrist, M.: Sour Promotes Risk-Taking: An Investigation into the Effect of Taste on Risk-Taking Behaviour in Humans. *Scientific reports* 8 (2018) 1, S. 79-87.

### VICKREY 1961

Vickrey, W.: Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders. *The Journal of Finance* 16 (1961) 1, S. 8.

### WAGNER 2003

Wagner, B.: Prolegomena zu einer Ethik des Risikos. Grundlagen, Probleme, Kritik. Diss. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2003).  
<<https://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-2777/777.pdf>> - 23.04.2019.

### WEBER ET AL. 2002

Weber, E. U.; Blais, A.-R.; Betz, N. E.: A domain-specific risk-attitude scale: measuring risk perceptions and risk behaviors. *Journal of Behavioral Decision Making* 15 (2002) 4, S. 263-290.

### WEIG 2008

Weig, S.: Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten. Diss. Techn. Univ. München (2008). München: Utz 2008. ISBN: 978-3-83160-823-2. (Forschungsberichte iw 220).

### WERMUTH 2014

Wermuth, M.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. In: Ruge, P. et al. (Hrsg.): *Das Ingenieurwissen. Mathematik und Statistik*. Berlin: Springer 2014, S. 147-180. ISBN: 978-3-64240-473-3.

### WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016

Westkämper, E.; Löffler, C.: *Strategien der Produktion*. Berlin: Springer 2016. ISBN: 978-3-66248-913-0.

### WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 7. Aufl. München: Carl-Hanser 2010. ISBN: 978-3-44641-878-3.

### WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. *CIRP Annals* 56 (2007) 2, S. 783-809.

WIENDAHL ET AL. 2017

Wiendahl, H.-H.; Kluth, A.; Kipp, R.: Marktspiegel Business Software - MES - Fertigungssteuerung 2017/2018. 6. Aufl. Aachen: Trovarit 2017. ISBN: 978-3-93810-241-1.

WIK ET AL. 2004

Wik, M.; Aragie Kebede, T.; Bergland, O.; Holden, S. T.: On the measurement of risk aversion from experimental data. *Applied Economics* 36 (2004) 21, S. 2443-2451.

WIBLER 2006

Wißler, F. E.: Ein Verfahren zur Bewertung technischer Risiken in der Phase der Entwicklung komplexer Serienprodukte. Diss. Univ. Stuttgart (2006). Stuttgart, Heimsheim: Jost-Jetter 2006. ISBN: 3-93694-786-4. (IPA-IAO-Forschung und -Praxis 437).

WU ET AL. 2020

Wu, Z.; Sun, S.; Yu, S.: Optimizing makespan and stability risks in job shop scheduling. *Computers & Operations Research* 122 (2020).

YU 2001

Yu, K.-W.: Terminkennlinie. Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Diss. Univ. Hannover (2001). Düsseldorf: VDI 2001. ISBN: 3-18357-602-3. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik 576).

ZÄPFEL 2001

Zäpfel, G.: Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2001. ISBN: 3-48625-618-1. (Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

ZHU 2015

Zhu, S. X.: Dynamic replenishment from two sources with different yields, costs, and leadtimes. *International Journal of Production Economics* 165 (2015), S. 79-89.

ZUBER & GUTHIER 2003

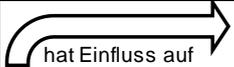
Zuber, M.; Guthier, M.: Verfahren zur Erhebung der Risikoeinstellung in der Kapitalanlageberatung. *Jahrbuch der Absatz- und Verbrauchsforschung* 49 (2003) 4, S. 361-384.

## 12 Anhang

### 12.1 Interaktionsmatrix

In einer Interaktionsmatrix wird unterschieden, ob es sich um eine wahrscheinliche Beziehung oder um eine Beziehung unter besonderen Bedingungen handelt. Bei wahrscheinlichen Beziehungen kommt es mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit zu einer Wechselwirkung zwischen den Objekten, in diesem Fall den Risiken. Von Beziehungen unter besonderen Bedingungen wird gesprochen, wenn die Wechselwirkungen mit einer deutlich geringeren Wahrscheinlichkeit auftreten oder es sich um Verkettungen von Ereignissen handelt. Zudem lassen sich in der Interaktionsmatrix Folgerisiken und Zusammenhänge, bei denen die Risiken zwar nicht direkt miteinander interagieren, aber deren Einzelschäden sich aufsummieren, darstellen. Bei den Informationen in der Interaktionsmatrix handelt es sich um rein qualitative Aussagen.

Tabelle 12-1: Beispielhafte Interaktionsmatrix in Anlehnung an KÖNIG (2007)

		Verkettung		Maschine		Personal		Lager		Information	
		Ausfall	Fehler	Ausfall	Qualität	Ausfall	Fehler	Ausfall	Qualität	Ausfall	Fehler
Verkettung	Ausfall										
	Fehler			▲	●						
Maschine	Ausfall										
	Qualität			▲							
Personal	Ausfall										
	Fehler	●	●	●	●			●	●	●	●
Lager	Ausfall										
	Qualität			▲	▲						
Information	Ausfall										
	Fehler		●	▲	●		●		●		

●	Wahrscheinliche Beziehung, starke Bindung zwischen den Risiken
▲	Beziehung unter besonderen Bedingungen, Schwache Bindung zwischen den Risiken

## 12.2 Beschreibung der verwendeten Verfahren zur Ermittlung der Risikopräferenz

### 12.2.1 Psychologische Verfahren

#### Subjektive psychologische Verfahren

Bei dieser Art von psychologischen Verfahren geben die Probanden eine Selbstauskunft über ihr Risikoprofil. Durch Fragebögen, direkte oder indirekte Fragen, Ratingskalen oder eine indirekte Selbsteinschätzung durch etwa Wahldilemma-Fragen werden die Probanden systematisch befragt, um hieraus Rückschlüsse auf deren Risikoeinstellung formulieren zu können. Testteilnehmer können hingegen auch durch Beantwortung von sogenannten Risk Rulern ihre individuelle Risikoausprägung selbst bewerten. Eine weitere Möglichkeit zur Selbsteinschätzung wird durch die von WEBER ET AL. (2002) vorgeschlagene DOSPERT-Skala gegeben.

Durch die Auswahl von Alternativen ist dem Testteilnehmer häufig auch bewusst, welche Auswirkung Angaben auf sein gemessenes Risikoprofil haben (ZUBER & GUTHIER 2003). Durch Verhaltensbeobachtung in zahlreichen Studien und Versuchen hat sich gezeigt, dass es Hinweise einer systematischen Fehleinschätzung des eigenen Risikoverhaltens gibt. Probanden nehmen ihr in der Realität gezeigtes Verhalten risikoaffiner wahr und bewerten ihr subjektiv abgegebenes Risikoprofil in einer Selbstauskunft somit tendenziell zu risikoaffin. HIGBEE (1971) bestätigt, dass das in Tests wiedergegebene vom tatsächlichen Verhalten abweicht. Die durch *subjektive psychologische Verfahren* ermittelte Risikobereitschaft (im Besonderen durch nicht-standardisierte Befragungen) sind somit von mittelmäßiger bis geringer Qualität. (KRAHNEN ET AL. 1997, PENNING & SMIDTS 2000)

#### Befragungen

Befragungen stellen durch eine Vielzahl an möglichen Ausprägungen ein einfaches subjektives psychologisches Verfahren dar, um die Risikoeinstellung von Probanden zu messen. Durch die geringen Anforderungen an die Testteilnehmer sind diese meist leicht anzuwenden. Dieser Vorteil geht jedoch auch mit den Nachteilen einer geringen Validität und Reliabilität einher.

Die klassische Befragung ist eine *direkte Selbsteinschätzung* durch direkte oder indirekte Fragen. Durch das Beantworten von bspw. Fragebögen oder Ratingskalen wird es im Experiment ermöglicht, die Probanden hinsichtlich des zu untersuchenden Merkmals zu evaluieren. Im Bereich der Kapitalanlageberatung

müssen gemäß § 31 des Wertpapierhandelsgesetzes (WpHG) Kreditinstitute deren Kunden nach deren Risikobereitschaft befragen. Entsprechend der hieraus ermittelten Erfahrung von Kunden mit Wertpapieren, deren Risikobewusstsein und weiteren Einflussgrößen wie etwa das Vermögen werden diese in Gruppen eingeteilt. § 31 WpHG gibt fünf Risikoklassen vor, welche aber individuell je nach Präferenz des Kreditinstituts angepasst werden können. Laut KRAHNEN ET AL. (1997) sind keine Untersuchungen bekannt, inwiefern die je nach Institut individuellen Fragebögen zur Kapitalanlageberatung die Gütekriterien von Persönlichkeitstest (Objektivität, Validität und Reliabilität) erfüllen.

Eine weitere Möglichkeit zur Gestaltung von Befragungen ist die *indirekte Selbsteinschätzung*. Hierbei wird nicht nach einer Merkmalsausprägung gefragt, sondern es werden Alternativsituationen vorgegeben. Diese häufig auch als Wahldilemma-Fragen gestalteten Befragungen zielen darauf ab, dass der Proband nicht sofort das zu untersuchende Merkmal erkennt. Dieses gesteckte Ziel einer hohen Validität ist jedoch kritisch zu bewerten, da die Art der Auswertung von Probanden häufig leicht durchschaubar ist (KRAHNEN ET AL. 1997). Als Vorbild für Wahldilemma-Fragebögen dient häufig der von KOGAN & WALLACH (1964) vorgestellte *Choice-Dilemma-Questionnaire*. Weitere Möglichkeiten zur indirekten Selbsteinschätzung werden durch Ratingskalen oder z. B. durch die Bewertung fiktiver Berufsbeschreibungen gegeben. Dem Probanden werden hierzu Beschreibungen unterschiedlicher Berufe mit deren entsprechender risikospezifischer Charakteristik vorgelegt. Durch die Bewertung der Attraktivität einzelner Profile kann indirekt auf die Risikoeinstellung des Untersuchungsteilnehmers geschlossen werden (KRAHNEN ET AL. 1997). Da bei der indirekten Selbsteinschätzung der subjektive Teil je nach Verfahren sehr geringgehalten wird, ist vor allem bei der indirekten Selbsteinschätzung der Übergang zu objektiven Fragen fließend.

Damit Testteilnehmer angehalten sind, anreizkompatibel zu antworten, schlägt BINSWANGER (1980) eine Erweiterung von Befragungen um die Komponente einer monetären Auszahlung vor. Durch den Anreiz einer monetären Belohnung sollen die Testteilnehmer angehalten werden, möglichst wahrheitsgemäße Antworten abzugeben und somit ihre wahren Risikopräferenzen offen zu legen. (BINSWANGER 1980, EWALD ET AL. 2012)

### DOSPERT-Skala

Die DOSPERT-Skala stellt, ähnlich wie der Risk Ruler, eine Selbsteinschätzung mit definierten Fragen dar. Die wie von WEBER ET AL. (2002) vorgestellte *domain-specific risk-taking scale (DOSPERT-Skala)* beinhaltet 40 Fragen zur Risikomesung. Die Entscheidung bei der Wahl von Auswahlalternativen erfolgt hierbei aus

der Beschreibung. Die Fragen teilen sich auf unterschiedliche Bereiche auf. So beinhaltet die DOSPERT-Skale von WEBER ET AL. (2002) jeweils acht Fragen bzw. Statements zu Risiken in den Bereichen Freizeit, Gesundheit, Soziales und Ethik. Jeweils vier weitere Fragen stammen aus dem Bereich des Glückspiels und der Geldanlage. (CHARNESS ET AL. 2013, MATA ET AL. 2011)

Durch die feste Anzahl an Fragen je Themengebiet ergibt sich ein relativ allgemeingültiges Risikoprofil eines Probanden, welches sich auch durch Abwandlung der Fragen innerhalb eines Themenbereichs noch vergleichen lässt. Werden die Statements zur Untersuchung spezifischer Risikoaversionen stark adaptiert und wird vom festen Fragenanteil je Themenblock wie bei WEBER ET AL. (2002) abgewichen, kann kein allgemeingültiges Risikoprofil mehr gemessen werden.

### **Objektive psychologische Verfahren**

Im Vergleich zu subjektiven psychologischen Tests muss bei einem *objektiven psychologischen Verfahren* der Proband sich nicht selbst beurteilen. Vielmehr wird unmittelbar das Verhalten einer Person erfasst und daraus dessen Risikoprofil abgeleitet (ZUBER & GUTHIER 2003). Der Proband sollte möglichst nicht bewusst wahrnehmen, dass er sich durch den Test selbst in Bezug auf sein Risikoverhalten bewertet. Wie bereits bei der indirekten Selbsteinschätzung angeführt, gibt es einen fließenden Übergang bei der indirekten Befragung von subjektiven psychologischen zu objektiv psychologischen Verfahren. So sind etwa Wahldilemma-Fragen beider Gruppen zuzuordnen.

#### Wahldilemma-Fragen

Bei *Wahldilemma-Fragen* handelt es sich dann um ein objektives psychologisches Verfahren, wenn dem Probanden Alternativsituationen zum Vergleich vorgegeben werden. Durch die Abwägung zwischen einer *mittelguten* aber sicheren Alternative, einer *besseren* und einer *schlechteren* Alternative gibt der Akteur seine Risikoaversion indirekt preis. Da die Entscheidungen je nach Risikodimension unterschiedlich sind, ist die Validität gering zu bewerten. So korreliert etwa eine Vorliebe für schnelles Autofahren nicht zwangsläufig mit einem hohen Risikobewusstsein an Kapitalmärkten.

#### Polaritätendiagramm von Gerke und Heilig

Dieses von GERKE & HEILIG (1975) vorgestellte siebenstufige *Polaritätendiagramm* dient der grafischen Darstellung individueller Risikoprofile. Durch Vergleich von Profillinien mit einem Durchschnittsprofil lässt sich die Risikoaversion einer Person oder Gruppe ableiten. Das Risiko wird mittels gegensätzlicher Pole

auf einer Skala durch den Probanden bewertet. Je stärker sich der Proband mit einem der Pole assoziiert, desto wahrscheinlicher wird seine Auswahl zu seiner risikoadäquaten Alternative tendieren. Gruppen von Profillinien können zu Risikogruppen zusammengefasst werden und die Probanden somit in Vergleichsgruppen ähnlicher Risikobereitschaft eingeteilt werden. Wie eine Auswertung des Polaritätendiagramm aussehen kann, ist in Abbildung 12-1 schematisch dargestellt. Die hierin gewählten beispielhaften Polaritäten sind immer Gegensätze, so etwa *leise – laut*, *konservativ – liberal*, *kalt – warm* und *zuverlässig – unberechenbar*. Zur Bestimmung der Risikoneigung wird aus einer repräsentativen Befragung ein Durchschnittsprofil ermittelt, welches ein risikoneutrales Verhalten darstellt. Werden die Punkte auf der Skala einer befragten Person zu einer Linie verbunden, kann man die Abweichung vom Durchschnittsprofil optisch leicht erkennen. Je nach Verschiebung handelt es sich um ein risikogeneigtes oder risikoaverses Profil. (ZUBER & GUTHIER 2003)

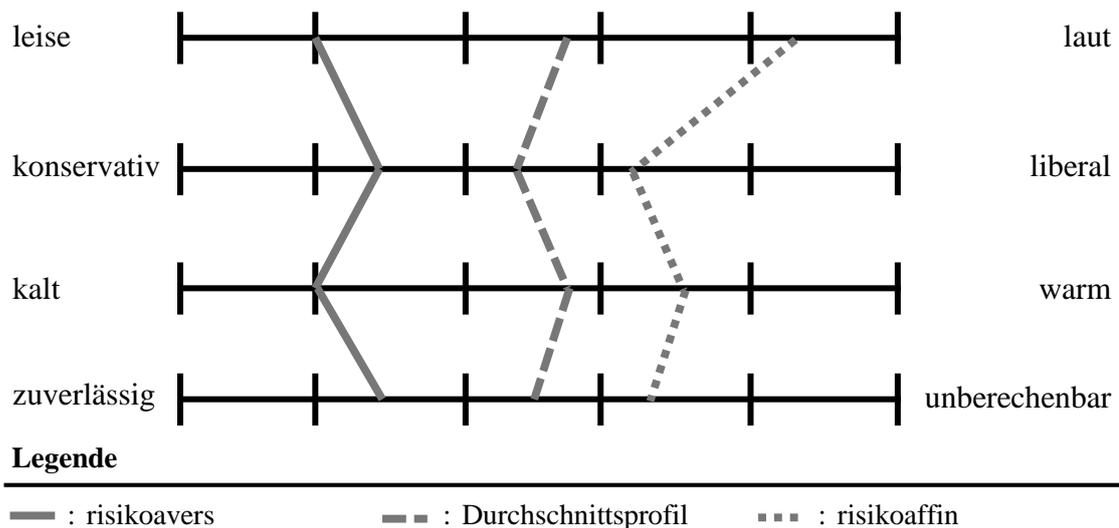


Abbildung 12-1: Polaritätendiagramm (Quelle: in Anlehnung an GERKE & HEILIG 1975)

Durch die prägnanten Auswahlmöglichkeiten kombiniert mit einem sehr einfachen Entscheidungsprozess ist diese Methode zur Risikobestimmung leicht anwendbar. Problematisch im Verständnis gestaltet sich jedoch der hohe Abstraktionsgrad der Statements, was jedoch den Vorteil hat, dass Probanden die Folgen von Antworten nur bedingt assoziieren. Dadurch wird die Neigung zu bewusst falsch abgegebenen Antworten reduziert. Die Güte des Tests ist somit höher als bei anderen vergleichbaren Verfahren. Diese hohe Tiefendimension des Polaritätendiagramms kann jedoch auch nachteilhaft sein. Einerseits können Probanden durch den hohen Abs-

traktionsgrad eine gewisse Abneigung entwickeln, andererseits ist die Risikoklassifikation durch das Polaritätendiagramm wenig detailreich. Auf die Untergliederung von Risiko in verschiedene Dimensionen wird bei diesem indirekten Verfahren nicht eingegangen. (GERKE & HEILIG 1975, ZUBER & GUTHIER 2003)

### Balloon Analogue Risk Task

Bei diesem psychologischen Verfahren handelt es sich um ein sehr abstrahiertes Experiment zur Risikomessung, bei dem die Entscheidung aus dem Experiment getroffen wird. Wie der englischsprachige Name *Balloon Analogue Risk Task* (*BART*) bereits andeutet, ist ein Ballon das zentrale Element dieses Tests. Vorzugsweise ist ein Luftballon vom Probanden aufzublasen. Je mehr Luft in den Ballon geblasen wird, desto höher ist die in Aussicht gestellte Auszahlung. Übersteigt die Menge an bereits gefüllter Luft einen kritischen Wert, so platzt der Ballon und die kumulierte Auszahlung ist gleich null. Die Testperson hat bei jedem Durchlauf keine Kenntnis, wann der Ballon explodieren wird, und bestimmt jeweils neu, wieviel Luft in diesen geblasen werden soll (LEJUEZ ET AL. 2002, MATA ET AL. 2011). Das Experiment kann real mit echten Luftballons durchgeführt werden, jedoch empfiehlt es sich, dies virtuell am Computer zur besseren Versuchsdurchführung und -auswertung umzusetzen.

Die Risikobereitschaft des Probanden wird im BART dadurch ermittelt, indem die Anzahl an Pumpstößen des nicht explodierten Ballons gemessen werden. Ergänzend hierzu kann die Zeit zwischen Pumpstößen (Pausenzeit zwischen Klicks am Computer) erfasst werden, wodurch Rückschlüsse etwa auf das Stresslevel des Untersuchungsteilnehmers gezogen werden können (VI & OBRIST 2018). CHARNESS ET AL. (2013) schlagen zudem vor, Ballone verschiedener Farben anstatt nur gleichfarbige Ballons zu verwenden. Beispielsweise können drei verschiedene Farben (blau, gelb und orange) eingesetzt werden, wobei jede Ballonfarbe eine individuelle zu erwartende Auszahlung und Wahrscheinlichkeit zu platzen besitzt (CHARNESS ET AL. 2013). Durch diese Modifikation wird ermöglicht, dass Probanden risikoäquivalente Alternativen auswählen können. Hierzu anzumerken ist jedoch, dass eine hohe Anzahl an zeitintensiven Durchläufen benötigt wird, bis die Testpersonen die Charakteristik jedes Ballons kennenlernen und dann entsprechend die Auswahl der Ballonfarbe an ihre Risikoeinstellung anpassen.

Der Hauptvorteil des BART ist, dass dieser Test generell ohne großen Erklärungsaufwand durchgeführt werden kann und damit leicht verständlich ist. Zudem wurde durch CHARNESS ET AL. (2013) nachgewiesen, dass die durch den Test ermittelte Risikobereitschaft stark mit der realen Risikobereitschaft, bspw. hinsicht-

lich Glücksspiel oder Drogenkonsum, korreliert. Außerdem wechselwirken die Ergebnisse sehr gut mit der durch Selbsteinschätzung abgegebenen Risikoeinstellung (CHARNESS ET AL. 2013).

Sehr ähnlich zum BART ist der von PLESKAC ET AL. (2008) vorgestellte *Angling Risk Task*. In diesem Test muss der Proband aus einem virtuellen See Fische angeln. Ihm ist dabei bewusst, dass er Fische einer bestimmten Farbe nicht angeln darf. Das Risikoverhalten wird danach gemessen, wie oft der Proband erneut versucht einen weiteren zufälligen Fisch aus dem Becken zu holen, um somit seine Auszahlung zu erhöhen. Bei jedem weiteren Versuch steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit, die falschfarbigen Fische zu erwischen. Wird ein Fisch der falschen Farbe geangelt, ist die kumulierte Auszahlung in dem jeweiligen Durchlauf verloren.

Ebenfalls ähnlich wie der BART ist der *Bomb Risk Elicitation Task* (BRET). Der von CROSETTO & FILIPPIN (2012) entwickelte Test beinhaltet ein Raster aus 5x5 Boxen mit jeweils einer gleichen Auszahlung je Box. Unter einer der 25 Boxen befindet sich jedoch eine Bombe, welche beim Aufdecken die bereits erspielte Auszahlung „vernichtet“. Es werden mit festem Zeitabstand (im Standard eine Sekunde) jeweils eine weitere Box zufällig aufgedeckt, bis der Proband durch eine Stopp-Taste seinen Gewinn sichert. Je risikoaffiner der Untersuchungsteilnehmer ist, desto mehr Boxen lässt er aufdecken, um seine Auszahlung zu maximieren. (CROSETTO & FILIPPIN 2012, HOLZMEISTER & PFURTSCHELLER 2016, CROSETTO & FILIPPIN 2017)

### Blackjack

Vielfach bekannt aus Casinos handelt es sich bei *Blackjack* um ein Kartenspiel, bei dem die Entscheidung aus der Beschreibung getroffen wird (MATA ET AL. 2011). Wie in der Spielbank bekommt die Testperson zwei zufällig gezogene Karten eines 52-Blatt-starken Satzes französischer Spielkarten. Ziel des Spiels ist es nun, dass der summierte Wert der gezogenen Karten möglichst nahe an der Zahl 21 ist, diese aber nicht übersteigen darf. Bei einer Summe größer als 21 ist das Spiel verloren. Die Summe des Blatts kann der Akteur dahingehend beeinflussen, indem er weitere Karten vom Croupier fordert.

Die Messung der Risikoeinstellung erfolgt dadurch, dass die Anzahl an gezogenen dritten Karten gemessen wird (MATA ET AL. 2011). Ebenfalls möglich wäre die Messung der Anzahl an einer vierten und weiteren gezogenen Karte, um dies als Datengrundlage für die Bestimmung der Risikoeinstellung zu verwenden.

### 12.2.2 Ökonomische Verfahren

Zur Bewertung der Risikoeinstellung werden in ökonomischen TV in der Regel ausschließlich monetäre Risiken berücksichtigt. Das meist durch Lotterievergleich ermittelte Risikoprofil wird häufig durch hypothetische Situationen während der Versuchsdurchführung erzeugt. Zur genaueren Unterteilung bietet es sich an, die hier aufgeführten ökonomischen Verfahren bezüglich deren Anreizkompatibilität zu unterteilen. Der Begriff der *Anreizkompatibilität* entspringt hierbei dem Bereich der Spieltheorie und beschreibt eine Eigenschaft des Experiments. Ein Spiel ist dann anreizkompatibel, wenn es die beste Strategie jedes Teilnehmers ist, den Regeln des Mechanismus zu folgen und zwar ungeachtet der Strategiewahl der Mitspieler. Wahrheitsgemäße Antworten des Probanden sind somit die beste Strategie, um die Auszahlung zu maximieren. (BARTHOLOMAE & WIENS 2016)

Den im Folgenden unter anreizkompatibel eingeordneten Verfahren wurde deren Anreizkompatibilität spieltheoretisch nachgewiesen. Die als nicht-anreizkompatibel klassifizierten Verfahren können jedoch auch unter bestimmten Voraussetzungen anreizkompatibel sein, da Abwandlungen oder Spezialfälle unter Umständen dieses Kriterium erfüllen. Im Einzelfall ist dieser Mechanismus nachzuweisen.

#### Nicht-anreizkompatible ökonomische Verfahren

Unter den *nicht-anreizkompatiblen ökonomischen* Verfahren sind neben Lotterien und Lotterievergleichen auch die Behavioral Investment Allocation Strategy (BIAS) zuzuordnen. Zusätzlich finden sich in dieser Gruppe multiple Preislisten (MPL), der Iowa Gambling Task (IGT) und der Cambridge Gambling Task (CGT). Im Folgenden werden diese Verfahren und deren bekannte Abwandlungen genauer beschrieben:

##### Lotterien und Lotterievergleiche

Die Geschichte von heutzutage bekannten *Lotterien* reicht zurück bis in das Spätmittelalter, als in Genua erstmals ein Verfahren zur fairen Auswahl des Genueser Konzils eingeführt wurde. Unter der Annahme gleicher Wahrscheinlichkeiten bei jeder Ziehung wurde ein Gremium aus Mitgliedern einflussreicher Patrizierfamilien gezogen. Die Regierung erkannte in diesem Mechanismus eine lukrative Einnahmequelle in Form von Glückspiel. Der Venezianer Casanova verbreitete diese Idee weit über die Grenzen der Erfinderstadt. (MÜNKLER ET AL. 2010)

In Bezug auf die Bestimmung von Risikoaversionen spielen Lotterien eine zentrale Rolle. Lotterien und Lotterievergleiche bilden die Grundlage vieler hieraus abgeleiteter Ansätze, durch deren Mechanismen individuelle Risikoprofile ermittelt

werden können. Da bei Lotterien die (potentielle) Auszahlung meist monetär erfolgt, sind Lotterien und Vergleiche derer mehrheitlich den ökonomischen Verfahren zuzuordnen. Da den meisten Probanden die Funktionsweise einfacher Lotterien bekannt ist, sind diese als Experiment meist leicht anwendbar und benötigen nur einen geringen Erklärungsaufwand.

Durch die Verwendung mehrerer Lotterien bietet sich die Möglichkeit, diese im Experiment vergleichen zu lassen. Der Proband wird gebeten, eine Auswahl aus vorgegebenen Lotterien zu treffen. Hierbei wird der Untersuchungsteilnehmer eine zu seinem Risikoprofil passende Lotterie auswählen. Durch einen systematischen Vergleich wird es ermöglicht, eine ordinale Rangreihenfolge zu bilden. Diese Gegenüberstellung dient dazu, das Sicherheitsäquivalent des Probanden herauszufinden, bei dem dieser indifferent hinsichtlich einer sicheren Auszahlung und der Lotterie ist. Lotterievergleiche beruhen im Allgemeinen auf der Erwartungsnutzentheorie (Bernoulli-Prinzip). (ZUBER & GUTHIER 2003, BARTHOLOMAE & WIENS 2016)

Je nach Mechanismus und Methodik des Lotterievergleichs kann in verschiedene Varianten unterschieden werden: Einerseits ist die *Sicherheitsäquivalentenmethode* häufig vorzufinden, bei der das Sicherheitsäquivalent einer vorgegebenen Lotterie bestimmt wird. Andererseits wird auch die *Wahrscheinlichkeitsäquivalentenmethode* oft angewendet. Hierbei wird die Wahrscheinlichkeit der Lotterie bestimmt, wobei die sichere, maximale und minimale Auszahlung vorgegeben sind (KRAHNEN ET AL. 1997). Bezüglich der Reliabilität und Validität sind Lotterievergleiche hinsichtlich ihrer Güte als schwach zu klassifizieren. Begründet wird dies durch das Auftreten zahlreicher Effekte wie etwa dem *Sicherheitseffekt* (*certainty effect*) oder *Reframing-Effekt*. Diese verursachen Abweichungen vom Bernoulli-Prinzip. (ZUBER & GUTHIER 2003)

### Behavioral Investment Allocation Strategy (BIAS)

Bei der *Behavioral Investment Allocation Strategy* (BIAS) handelt es sich um ein Verfahren zur Bewertung hypothetischer Kapitalanlagen, bei denen die Entscheidung aus dem Experiment getroffen wird. Das Ziel dieser Bewertung ist die Ableitung einer vollständigen RNF des Untersuchungsteilnehmers (ZUBER & GUTHIER 2003). Im Experiment muss der Proband ein Vermögen über zwei Aktien und eine Anleihe verteilen. Die Anleihe zahlt hierbei sicher und konstant über alle Versuchsreihen aus. Die Aktien sind in eine vorteilhafte und eine nachteilige Gruppe unterteilt. Unter Vorteilhaftigkeit einer Aktie ist zu verstehen, dass diese zu einem positiven Einkommen der Testperson beiträgt. Nach mehreren Durchläufen wird gemessen, wie oft der Proband eine risikobehaftete Aktie gewählt hat.

Durch einen Vergleich mit einem rationalen Entscheider mit gleichem Lernfortschritt in der Aufgabe kann die Risikoeinstellung einer Person bewertet werden. Das Risikopotential einzelner Aktien kann bei der BIAS bei verschiedenen Versuchsdurchläufen variiert werden. (MATA ET AL. 2011)

### Iowa Gambling Task (IGT)

Der *Iowa Gambling Task* (IGT) ist ein psychologisches Experiment mit Karten, bei dem die Testperson die Entscheidung aus dem Experiment trifft. Der von BECHARA ET AL. (1994) erstmals vorgestellte Test wurde ursprünglich entwickelt, um Schädigungen und Fehlfunktionen bestimmter Hirnregionen und ein damit im Vergleich zu gesunden Menschen verändertes Verhalten festzustellen.

Der IGT eignet sich auch für die Bestimmung individueller Risikoaversionen, da reale Entscheidungssituationen nachgebildet werden und aus den Entscheidungen der Probanden Rückschlüsse auf deren Risikoeinstellung gezogen werden können. Während der Durchführung versuchen die Testpersonen ihre erwartete Auszahlung zu maximieren, indem sie eine Karte aus vier Kartenstapeln (Stapel A bis D) auswählen. Die Stapel sind hierbei in zwei Gruppen zu jeweils zwei Karten eingeteilt: Die Stapel A und B besitzen eine hohe mögliche Auszahlung (z. B. 100 € pro Karte), jedoch sind auch verhältnismäßig viele Karten mit einer Strafzahlung enthalten. Die Stapel C und D stehen zwar für eine niedrigere Auszahlung (z. B. nur 50 € pro Karte), jedoch sind die Anzahl an Karten mit Strafzahlungen deutlich geringer als in den Stapeln A und B. Für Spieler dieses Experiments ist es vorteilhaft, nur Karten von den Decks A und B zu wählen. Der kumulierte Gewinn ist hierdurch deutlich höher als durch die Wahl von Karten der Stapel C und D. Da den Spielern diese Charakteristik der Stapel nicht mitgeteilt wird, müssen sie dies durch wiederholtes Ziehen von Karten aus verschiedenen Stapeln selbst erlernen. Die Bestimmung der Risikoeinstellung basiert darauf, dass risikoaffine Spieler tendenziell häufiger Kartenstapel mit einer potentiell hohen Auszahlung wählen. (BECHARA ET AL. 1994, MATA ET AL. 2011)

### Cambridge Gambling Task (CGT)

Beim *Cambridge Gambling Task* (CGT) handelt es sich um ein Experiment, bei dem die Entscheidung aus der Beschreibung getroffen wird. Die Aufgabe besteht darin, dass der Teilnehmer den Ort eines Tokens (Spielstein) zu bestimmen hat. Der Token wird gleichverteilt und zufällig hinter einer von insgesamt sechs Boxen versteckt, wobei diese entweder die Farbe Rot oder Blau besitzen. Der Anteil der roten Boxen wird im Verhältnis zu den blauen während der Spieldurchläufe variiert. So ändert sich das Verhältnis rot zu blau von 1:5, 2:4 bis hin zu 5:1. Bei jedem

Durchgang muss durch den Probanden bestimmt werden, hinter welcher Gruppe von Kisten er den Spielstein vermutet. Jeder Auswahl wird ein potentieller Gewinn bzw. Verlust zugerechnet. Die Messung der Risikobereitschaft erfolgt, indem die Anzahl der Entscheidungen zugunsten der Kistenfarbe mit dem niedrigeren Anteil im jeweiligen Durchlauf gemessen wird. (ROGERS 1999, MATA ET AL. 2011)

Eine Abwandlung des CGT ist der von VAN LEIJENHORST ET AL. (2008) entwickelte *Cake Gambling Task*. Hierbei muss eine von zwei Sorten von Stücken eines sechsteiligen Kuchens ausgewählt werden. Bei jedem Durchlauf wird der Anteil der Kuchensorten und deren potentieller Gewinn vom Computer zufällig neu generiert. Der Proband entscheidet bei jedem Durchlauf neu, welche der beiden meist farblich gekennzeichneten Sorten er bevorzugt. Je nach Anteil der Stücksorte und deren Gewinnpotential lässt sich die Risikoaversion des Probanden ermitteln. Ein Vorteil dieser Abwandlung im Vergleich zum originalen CGT ist die bessere visuelle Darstellungsmöglichkeit in Form eines Kuchens, welche tendenziell von Probanden leichter und schneller verstanden wird. Der Test wurde dahingehend entwickelt, dass dieser auch für Kinder verständlich ist. (VAN LEIJENHORST ET AL. 2008)

### **Anreizkompatible ökonomische Verfahren**

Bei den folgenden *anreizkompatiblen ökonomischen Verfahren* wurde die Anreizkompatibilität einzeln nachgewiesen. Da Abwandlungen von Verfahren dieses Kriterium nicht ohne ausführliche Überprüfung erfüllen, sind die Ansätze in dieser Untergruppe sehr spezifisch und starr in ihrer Gestalt. Der paarweise Lotterievergleich als Sonderform von Lotterievergleichen, die Vickrey-Auktion und der Becker-DeGroot-Marschak (BGM) -Mechanismus lassen sich in die Gruppe der anreizkompatiblen ökonomischen Verfahren einordnen und werden im Folgenden detaillierter beschrieben:

#### Paarweiser Lotterievergleich

Als Sonderform von Lotterievergleichen gilt der von KRAHNEN ET AL. (1997) vorgestellte anreizkompatible *paarweise Lotterievergleich*. Hierbei vergleicht der Proband genau zwei Lotterien entsprechend seiner Präferenz und wird angehalten, diese in eine Reihenfolge gemäß seiner Präferenz zu bringen. Durch die Wahl der Messmethode ist gewährleistet, dass der Proband seine wahre Präferenz zeigt, da es keinen Anreiz gibt, die Lotterien falsch zu ordnen. Die vorhandene Anreizkompatibilität bietet somit den größten Vorteil dieses Verfahrens. Aufzuführen sind jedoch auch schwerwiegende Nachteile: Aufgrund der Vielzahl an Lotterien müs-

sen Probanden sehr viele Entscheidungen vornehmen, wobei sich die Einzellotterien teilweise nur marginal unterscheiden. Zudem besteht die Gefahr, dass sich eine zusammengesetzte Lotterie ungeahnter Dynamik entwickelt, wenn mehrere Einzellotterien für den paarweisen Vergleich ausgewählt werden. Da das Ergebnis durch den Lotterievergleich lediglich ordinal ist, ist die Abstufung zwischen verschiedenen einzelnen Lotterien meist asymmetrisch. (KRAHNEN ET AL. 1997) Für valide Ergebnisse sollten daher möglichst Lotterien verwendet werden, welche eine Merkmalsausprägung kontinuierlich und in kleinen Stufen gleichmäßig variieren.

### Vickrey-Auktion

Die von VICKREY (1961) beschriebene *Second-price-sealed-bid-Auction* (Vickrey-Auktion) bietet eine weitere Möglichkeit, das Sicherheitsäquivalent des Probanden zu ermitteln. Das Besondere an dieser Auktion ist, dass das Gut an den Meistbietenden versteigert wird, jedoch zum Preis des zweithöchsten Gebots. Jeder Bieter gibt in dieser einstufigen, verdeckten Versteigerung somit sein maximales Gebot an. Dies hat im Vergleich zur Englischen Auktion den Vorteil, dass der Reservationspreis von jedem Mitbieter offenbart wird. Für jeden Spieler ist es die dominante Strategie, seine wahre Zahlungsbereitschaft zu offenbaren, weshalb das Kriterium der Anreizkompatibilität erfüllt ist. Die Vickrey-Auktion ist nicht nur für den Kauf von Lotterien geeignet, es kann ferner auch ein Verkaufsprozess in einem Experiment nachgebildet werden. Probleme bei der Versuchsdurchführung ergeben sich bei einer hohen Anzahl an Bietern und dem im Vergleich zu anderen Experimenten erhöhten Erklärungsaufwand. (KRAHNEN ET AL. 1997)

### Becker-DeGroot-Marschak-Mechanismus (BGM-Mechanismus)

Ähnlich wie die Vickrey-Auktion dient der von BECKER ET AL. (1964) vorgestellte und hiernach benannte *BGM-Mechanismus* dazu, individuelle Sicherheitsäquivalente durch ein Experiment zu ermitteln. Das Ziel der Methode ist es, die Kaufbereitschaft einer Testperson (*willingness-to-pay*) herauszufinden. Am Anfang der Versuchsdurchführung wird der Proband aufgefordert, seinen maximalen Kaufpreis für eine vorgegebene Lotterie anzugeben. Nach der Nennung des maximalen Reservationspreises der Testperson wird eine Zufallszahl ermittelt. Diese liegt gleichverteilt im Zahlenbereich zwischen der minimalen und der maximalen Auszahlung der zuvor vorgegebenen Lotterie. Der Wert der gezogenen Zufallszahl bestimmt nun, ob der Proband die Lotterie gewinnt: Ist die gezogene Zahl kleiner als das von der Testperson genannte Gebot, so erhält sie das Versteigerungsgut zum

Preis der gezogenen Zahl. Ist die Zufallszahl größer als der genannte Reservationspreis, so geht der Proband leer aus. (BECKER ET AL. 1964, KRAHNEN ET AL. 1997)

Ebenso wie die Vickrey-Auktion eignet sich der BGM-Mechanismus neben dem Kauf auch für den Verkauf von Lotterien. Wie durch BECKER ET AL. (1964) nachgewiesen, besteht für Testteilnehmer kein Anreiz, sich einen Vorteil zu verschaffen, indem sie unwahre Antworten abgeben, wodurch das Kriterium der Anreizkompatibilität gegeben ist.

Wie KRAHNEN ET AL. (1997) anführen, sind die Vickrey-Auktion und der BGM-Mechanismus sehr ähnlich. Trotz des normativ identischen Aufbaus nach der *Von-Neumann-Morgenstern-Theorie* ergeben sich erhebliche Verhaltensunterschiede aufgrund des geänderten Referenzpunkts beider Verfahren. Unklar bisher ist jedoch die Ursache der jeweils sehr geringen Reliabilität. Gründe hierfür können die Messmethode oder die instabile Risikoeinstellung der Probanden zwischen einzelnen Messzeitpunkten sein. Damit valide Messergebnisse beim BGM-Mechanismus überhaupt zustande kommen, müssen Probanden die Auswirkungen des Mechanismus ausreichend verstehen. Hierzu ist ein erheblicher Schulungsaufwand notwendig, da ansonsten Gebote mit großer Wahrscheinlichkeit willkürlich abgegeben werden (KRAHNEN ET AL. 1997). Das hieraus ermittelte Sicherheitsäquivalent stimmt dann nicht mit der individuellen Risikoeinstellung überein.

### 12.3 Detaillierte Beschreibung der Bestandteile der Tripel-Notation des betrachteten Planungsproblems

Notation des betrachteten Planungsproblems:

$$R2 \mid pmtn, d_j, p_j \sim \text{beta}(p, q), s_{jk}, r-pa \sim \text{normal}(\mu, \sigma^2) \mid E(f_{max})$$

#### **$\alpha$ - Maschinenumgebung**

Die Maschinenumgebung wird durch zwei Pressen definiert. Sie unterscheiden sich in ihrer Presskraft und den Werkzeugen, mit denen sie bestückt werden können. Zwei Werkzeuge können von beiden Maschinen verwendet werden.

#### **$\beta$ - Jobbeschreibung**

In den Positionsmerkmalen der Aufträge werden verschiedene Parameter angegeben. Alle Teile werden in einer festen Losgröße produziert, die einen Auftrag mit einem bestimmten Fälligkeitsdatum  $d_j$  darstellen. Die Montagelinie fordert die

Teile minutengenau an. Daher werden alle nicht eingehaltenen Liefertermine mit Kosten bestraft. Werkzeugwechsel erfordern Rüstzeiten  $s_{jk}$  in Abhängigkeit vom Auftrag. Einige Aufträge werden mit demselben Werkzeug bearbeitet, das jedoch für den jeweiligen Auftrag gerüstet werden muss. Dies führt zu großen Abweichungen zwischen mehreren Rüstzeiten und hat eine nicht zu vernachlässigende Auswirkung auf die Reihenfolge der Aufträge. Die Auftragsbearbeitungszeit  $p_j \sim \text{beta}(p, q)$  ist elementar für die Beschreibung des Problems. Sie berücksichtigt Unsicherheiten und ist entscheidend für die Fertigstellungszeitpunkte der Aufträge. Sie wird ausgedrückt durch die Bearbeitungszeit, die die Maschine benötigt, um den Auftrag fertigzustellen, dividiert durch die Werkzeugverfügbarkeit. Alle Werkzeugverfügbarkeiten folgen einer eindeutigen  $\text{Beta}(p, q)$ -Verteilung, die für jedes Werkzeug spezifiziert ist. Sie hängt von den Besonderheiten des Werkzeugs sowie dessen Reinigungs- und Wartungsintervall ab. Da jeder Auftrag einem Werkzeug zugeordnet werden kann, können die Verfügbarkeiten auf die Aufträge übertragen werden. Eine Unterbrechung  $pmtn$  ist für alle Jobs erlaubt. Sie können während der Bearbeitung unterbrochen werden. Das letzte Merkmal, das zu berücksichtigen ist, ist die periodische Wartung der Maschinen, die mit  $r-pa \sim \text{normal}(\mu, \sigma^2)$  berücksichtigt wird. Die Wartung der beiden Maschinen wird zu einem festgelegten Zeitpunkt durchgeführt. Dennoch kann ihre Dauer variieren und wird durch eine Normalverteilung angegeben. Der unterbrochene Auftrag kann somit durch eine zeitliche Verlängerung der Wartungsdauer beeinflusst werden. Folglich besitzen alle nachfolgenden Aufträge spätere Fertigstellungszeitpunkte.

### **$\Upsilon$ - Optimierungskriterium**

Das Optimalitätskriterium  $E(f_{max})$  wird als Minimierung der Gesamtproduktionskosten definiert. Die Gesamtkosten setzen sich zusammen aus Rüstkosten, Bearbeitungskosten sowie Strafkosten für eine verfrühte bzw. verspätete Fertigstellung der Aufträge. Kostenfaktoren werden also mit Rüstzeiten, Bearbeitungszeiten und der Abweichung zwischen Fertigstellungszeitpunkt und Liefertermin multipliziert. Da Strafkosten für eine unpünktliche Fertigstellung unsichere Parameter beinhalten, wird der erwartete Wert der Strafkosten minimiert. Die Parameter Verfügbarkeit und Wartungsaufwand werden in Form von Szenarien formuliert, um das stochastische Element zu erfassen. Dabei wird die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten für jedes Szenario durch Konvertierung der Verteilungsfunktionen vorausgesetzt. Da das eingetretene Ereignis während des Lösungsprozesses nicht bekannt ist, werden alle Randbedingungen für jedes Szenario berücksichtigt. Nur in der Zielfunktion muss der Erwartungswert schließlich alle Szenario-Wahrschein-

lichkeiten einbeziehen, was die Optimierung über alle möglichen Szenarien erlaubt. Dies ist eine Kernbedingung, die der Algorithmus erfüllen muss, um die Unsicherheitsfaktoren adäquat zu modellieren.

Wie bereits erläutert, fordert die Nachfrage genaue Lieferzeiten ein. Dies impliziert eine optimale Lösung, die sich gegen unerwartet späte Fertigstellungszeitpunkte absichert. Die Prämisse schließt Näherungsmethoden und Heuristiken aus, da sie den Anforderungen an genaue Fertigstellungszeitpunkte nicht gerecht werden. Da der Zeitplan für sechs Wochen festgelegt wird, vergrößert sich das Optimierungsmodell aufgrund der resultierenden großen Datenmenge schnell. Dies erschwert den Lösungsprozess aufgrund der hohen Komplexität.

## 12.4 Anwendungsfall

### 12.4.1 Ausschnitt des Produktionssystemmodells des Anwendungsfalls

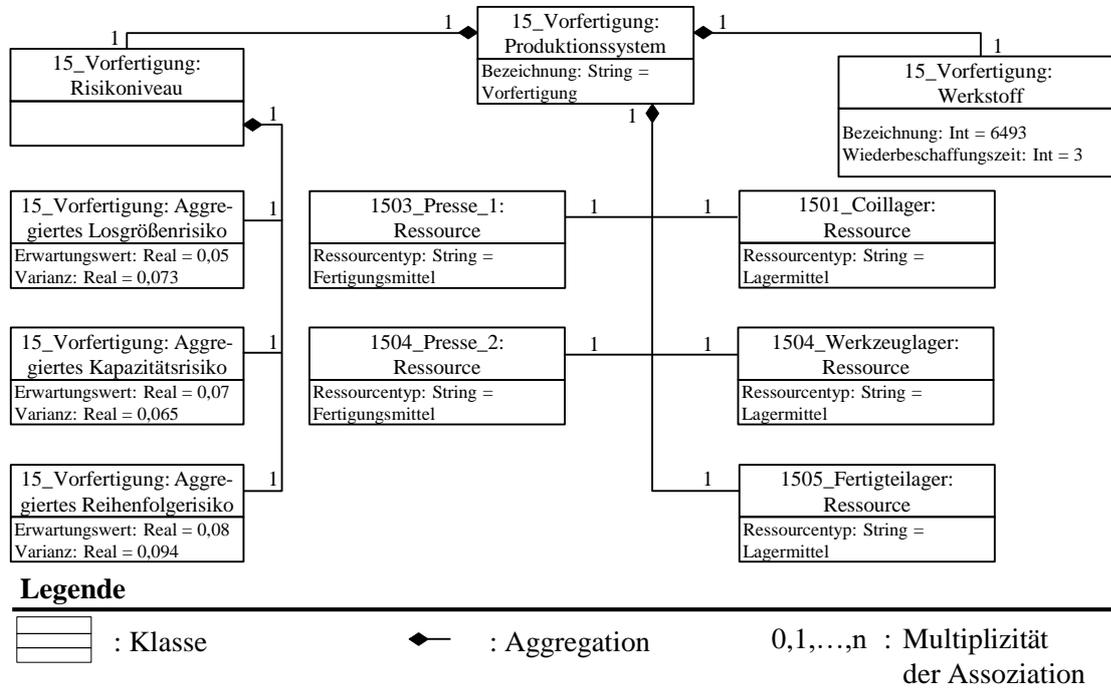


Abbildung 12-2: Ausschnitt der Produktionssystemmodellierung

### 12.4.2 Ausschnitt des Prozessmodells des Anwendungsfalls

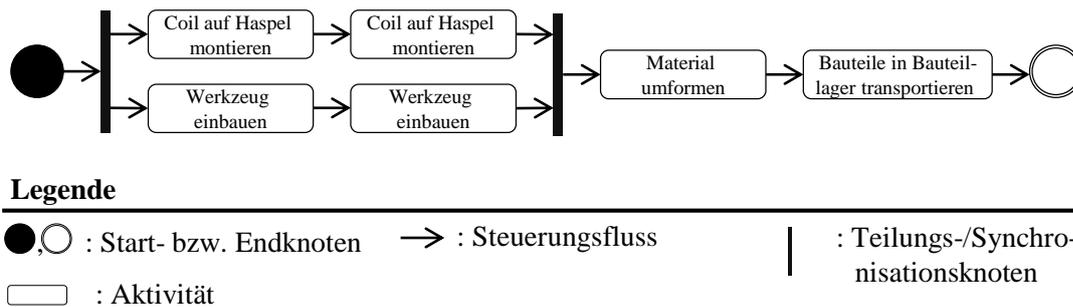


Abbildung 12-3: Ausschnitt des Prozessmodells

## 13 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) sowie am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in den Jahren von 2015 bis 2020 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen wurden unter anderem Fragestellungen zur Produktionsplanung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Im Folgenden sind die Studienarbeiten in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens der Autoren aufgeführt.

- Filip, R.  
Entwicklung eines Vorgehens zur risikoorientierten Produktionssystemmodellierung
- Mayer, J.  
Entscheidungstheoretischer Ansatz zur Ermittlung der Risikobeurteilung während der Produktionsplanung
- Polz, M.  
Entwicklung eines Algorithmus zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Losgrößenplanung
- Schneider, D.  
Entwicklung eines Kennzahlensystems in Cyber-Physischen Produktionssystemen zur Bewertung von Unsicherheiten in der Produktionsplanung
- Weilguni, C.  
Development of an approach for optimizing job sequencing taking into account uncertainties in cyber-physical production systems
- Wieland, R.  
Entwicklung eines Vorgehens zur Risikoidentifikation und -analyse in Cyber-Physischen Produktionssystemen