



TUM School of Engineering and Design

# Evaluation der Zukunftsrobustheit von Produktionssystemen durch Stresstests

**Ida Gertrud Anna Wonsak**

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub

Prüfer\*innen der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

Die Dissertation wurde am 06.12.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 22.02.2022 angenommen.



## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



## Vorwort

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Unterstützung meiner Forschungen und dieser Arbeit. Bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler für die Übernahme des Korreferates und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Freunden bin ich sehr dankbar für die Unterstützung auf dem Weg zur Fertigstellung dieser Arbeit.

Einen besonderen Dank möchte ich meinen Eltern, Doris und Karl-Heinz, aussprechen. Sie haben mir meine Bildung und unzählige Chancen ermöglicht. Sie sind mein Rückhalt und die liebevollste Familie, die ich mir hätte wünschen können.

Meinem Ehemann Maximilian danke ich für seinen Glauben an mich sowie die liebevolle und unermüdliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Berlin, April 2022

Ida Wonsak



# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	V
Verzeichnis der Formelzeichen .....	VII
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Ausgangssituation.....	2
1.3 Methodisches Vorgehen .....	3
1.4 Zielsetzung der Arbeit .....	5
1.5 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs .....	6
1.6 Aufbau der Arbeit .....	9
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>11</b>
2.1 Externe Einflüsse auf Produktionssysteme.....	11
2.1.1 Externe Einflussfaktoren.....	12
2.1.2 Rezeptormodell.....	15
2.2 Risiko und Unsicherheit .....	19
2.3 Risikomanagement.....	21
2.3.1 Risikobeurteilung .....	23
2.3.2 Risikosteuerung .....	29
2.4 Stress und Stresstests .....	30
2.4.1 Verwendung und Verbreitung des Begriffes Stress.....	30
2.4.2 Stresstests in der Finanzindustrie .....	34

2.5	Fazit.....	36
<b>3</b>	<b>Stand des Wissens .....</b>	<b>39</b>
3.1	Stresstests in der Finanzindustrie .....	39
3.1.1	Institutionelle Vorgaben und Rahmenkonzept .....	39
3.1.2	Kernelemente für den Stresstest in der Finanzindustrie.....	43
3.2	Stand des Wissens für die produzierende Industrie .....	43
3.2.1	Stresstestanwendungen für produzierende Unternehmen und Produktionsnetzwerke.....	44
3.2.2	Anwendung der Szenariotechnik in der Fabrik- und Produktionsplanung..	49
3.2.3	Stochastische Aggregation von Unsicherheiten für Produktionssysteme.....	51
3.3	Fazit.....	54
<b>4</b>	<b>Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme .....</b>	<b>57</b>
4.1	Anwendungsbereich des Stresstests für Produktionssysteme .....	57
4.2	Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme.....	57
4.2.1	Spezielle Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme .....	57
4.2.2	Spezielle Anforderungen für die Übertragung auf Produktionssysteme .....	58
4.2.3	Allgemeine Anforderungen an den Stresstest .....	59
4.3	Voraussetzungen .....	60
4.4	Fazit.....	61
<b>5</b>	<b>Methodik zum Stresstest für ein Produktionssystem .....</b>	<b>63</b>
5.1	Übersicht zum Stresstest für ein Produktionssystem.....	63
5.2	Identifikation kritischer Prozesse .....	65
5.2.1	Prozessaufnahme .....	66
5.2.2	Risikoschwerpunkte identifizieren .....	66
5.3	Entwicklung der Umfeldszenarien .....	69



---

5.3.1	Analyse der Einflussfaktoren .....	71
5.3.2	Trendprojektion.....	77
5.3.3	Entwicklung der Szenarien .....	79
5.4	Entwicklung der Belastungsszenarien .....	85
5.4.1	Auswahl und Beschreibung der Rezeptoren.....	88
5.4.2	Ableitung der Belastungsszenarien .....	89
5.4.3	Analyse und Erweiterung der Belastungsszenarien .....	90
5.4.4	Zusammenfassung der Belastungsszenarien .....	92
5.5	Auswirkungsanalyse und Beurteilung der Risiken .....	93
5.5.1	Risikoidentifikation und -analyse.....	94
5.5.2	Bewertung und Priorisierung der Risiken .....	97
5.6	Zuordnen von Maßnahmen zur Risikosteuerung.....	99
5.7	Monetäre Bewertung der Belastungsszenarien .....	103
5.7.1	Profitabilitätsmodell.....	104
5.7.2	Quantitative Beschreibung von Risiken.....	107
5.7.3	Simulation .....	109
5.7.4	Analyse der Wahrscheinlichkeitsverteilungen .....	111
5.7.5	Berechnung des Value at Risk .....	111
5.7.6	Sensitivitätsanalyse.....	112
5.8	Ergebnisse .....	113
5.8.1	Einschätzung der Schwere der Szenarien .....	113
5.8.2	Priorisierung der Risiken .....	116
5.8.3	Subjektive Stressevaluation.....	117
<b>6</b>	<b>Validierung am Anwendungsbeispiel.....</b>	<b>119</b>
6.1	Allgemeines .....	119
6.1.1	Technische Umsetzung .....	119

6.1.2	Ausgangssituation und Hinweise.....	119
6.2	Identifikation kritischer Prozesse .....	120
6.3	Entwicklung der Umfeldszenarien .....	121
6.4	Entwicklung der Belastungsszenarien .....	125
6.5	Auswirkungsanalyse und Beurteilung der Risiken .....	130
6.6	Zuordnung von Maßnahmen zur Risikosteuerung.....	133
6.7	Monetäre Bewertung der Belastungsszenarien .....	134
6.8	Ergebnisse .....	134
6.9	Bewertung der Methodik.....	136
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>141</b>
7.1	Zusammenfassung .....	141
7.2	Ausblick .....	143
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>145</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>161</b>
A.	Übersicht zum Vorgehen für Stresstests in der Finanzindustrie .....	161
B.	Diskrete und stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	162
C.	Übersicht zu Verteilungsfunktionen.....	164
D.	Übersicht zur priorisierten Auflistung der Risiken aus dem Anwendungsbeispiel .	166
E.	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten .....	167

## Abkürzungsverzeichnis

A	Anforderung
Abb.	Abbildung
AV	Arbeitsvorbereitung
BIA	Business-Impact-Analyse
CM	Contract manufacturing
CNC	Computerized numerical control
DACH	Deutschland, Österreich und die Schweiz
EBIT	Earnings before interest and taxes
EBITDA	Earnings before interest, taxes, depreciations, and amortization
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
G	Gesetze
IT	Informationstechnologie
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
K	Kosten
Kap.	Kapitel
kont.	Kontinuierlich
MA	Mitarbeitende
MAX	Maximum
MIN	Minimum
Mngmt.	Management
MRB	Material review board engineers
NPV	Net Present Value
P	Produkt
QNT1	Quantität
SEP	Single-Engine-Piston (dt.: einmotorige, Kolbenmotor-getriebene Flugzeuge)
TCCA	Transport Canada Civil Aviation

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

---

VaR	Value at Risk
vgl.	vergleiche
VSM	Value Stream Mapping
Z	Zeit
z.B.	zum Beispiel

## Verzeichnis der Formelzeichen

$a$	Anzahl der Projektionen, die in beiden Rohszenarien vorkommen
$AS_i$	Aktivitätssumme von Einflussfaktor $i$ ( $i$ -te Zeilensumme)
$D$	Deskriptor
$DI_i$	Dynamikindex von Einflussfaktor $i$
$d_{ij}$	Distanz zwischen Objekt $i$ und $j$
$k_{ih}$	Einflusswert von Einflussfaktor $i$ (Zeile) für Einflussfaktor $h$ (Spalte)
$k_{ij}$	Einflusswert von Einflussfaktor $i$ (Zeile) für Einflussfaktor $j$ (Spalte)
$k_{ij}$	Konsistenzzahl zwischen der $i$ -ten und $j$ -ten Projektion
$KS$	Konsistenzsumme eines Szenarios
$P$	Projektion
$p$	Anzahl der Einflussfaktoren
$PL$	Planungsgröße
$PS_j$	Passivitätssumme von Einflussfaktor $j$ ( $j$ -te Spaltensumme)
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$R$	Rezeptor
$RS$	Rohszenario
$S$	Menge aller möglichen Szenarien
$u$	Anzahl der Projektionen, die nur in einem der beiden Rohszenarien vorkommen
$V$	Einflussfaktor

### *Wahrscheinlichkeitstheorie (stetige Verteilungen)*

$f$	Wahrscheinlichkeitsfunktion
$F$	Verteilungsfunktion
$X$	stetige Zufallsvariable

$x$	Ausprägung der Zufallsvariable $X$
$a$	untere Intervallgrenze Gleich- und Dreiecksverteilung
$b$	obere Intervallgrenze Gleich- und Dreiecksverteilung

*Wahrscheinlichkeitstheorie (diskrete Verteilungen)*

$f$	Wahrscheinlichkeitsfunktion
$F$	Verteilungsfunktion
$X$	diskrete Zufallsvariable
$x$	Ausprägung der Zufallsvariable $X$
$i$	Laufvariable bei der Summenbildung
$P$	Wahrscheinlichkeitsmaß für die Gesamtwahrscheinlichkeit einer Aussage
$p$	Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines (Einzel-)Ereignisses

# 1 Einleitung

„Fundamentally, Stress testing is more an art than a science.“

Jérôme Henry und Christoffer Kok (2013, S. 69)

## 1.1 Motivation

Im Jahr 2020 brach eine Pandemie, verursacht durch das Virus SARS-CoV-2, über die Welt herein. Die Folgen für die produzierenden Unternehmen sind extrem unterschiedlich, die einen müssen ihre Produktionen völlig herunterfahren, andere werden überrannt mit Aufträgen und können ihre Kapazitäten gar nicht schnell genug aufbauen, die Dritten müssen ihre Produktion völlig umstellen. Eines haben viele dieser Unternehmen gemeinsam: Sie werden von den Auswirkungen der Pandemie überrascht.

Hätten Manager\*innen rund um den Globus dies kommen sehen müssen?

Die einen sagen Ja, die anderen Nein.

Hätten sie ihre Produktionen darauf vorbereiten können?

Die einen sagen Ja, die anderen Nein.

Erwarten wir für die Zukunft mehr solcher Ereignisse?

Die Antwort lautet vermutlich: Ja!

Als 2009 die Finanzkrise über die Weltwirtschaft hereinbrach, hat es vor allem die Banken und andere Finanzinstitute mit voller Wucht getroffen. Daraus wurden Lehren für die Zukunft gezogen und neue Vorschriften formuliert. Die Einführung der Kapitalvorschriften Basel II hat ein in der Finanzindustrie bereits vorhandenes Werkzeug in den Fokus gerückt: den Stresstest. Mit der regelmäßigen und systematischen Anwendung von Stresstests sollen sich Finanzinstitutionen besser für zukünftige, unerwartete Entwicklungen der Märkte aufstellen.

Diese Forschungsarbeit widmet sich nicht der Untersuchung von Pandemien oder Weltwirtschaftskrisen, sondern der Frage danach, wie ein Stresstest für die produzierende Industrie aussehen könnte. Die zu Grunde liegende These lautet, dass es für die Industrie einen Mehrwert bietet, sich strukturiert mit der Zukunft, genauer gesagt mit den Auswirkungen von unerwarteten Veränderungen in der Umwelt, auseinanderzusetzen. Die Motivation dieser Arbeit ist es, einen Ansatz für Produktionssysteme zu bieten, der eine systematische Auseinandersetzung mit den Auswirkungen von extremen Veränderungen in der Umwelt bietet. Der Ansatz soll weniger im Rahmen von konkreten Planungen, sondern eher als Teil des ständigen Risikomanagements gestaltet werden.

### 1.2 Ausgangssituation

Die meisten Industrieunternehmen agieren in einem risikoreichen Umfeld. Dabei ist es Teil des ökonomischen Handelns mit Unsicherheiten und Risiken zu planen und umzugehen. Die Fähigkeit, sich schnell und zu geringen Kosten an die sich verändernden Anforderungen von außen anzupassen, ist entscheidend für den Wettbewerbsvorteil von produzierenden Unternehmen im 21. Jahrhundert. SCHUH ET AL. (2006, S. 516) zeigen auf, dass ein Bewusstsein für die Problembereiche im eigenen Unternehmen für den Umgang mit Risiken besonders relevant ist. Dabei gilt es zur Erhaltung des Unternehmens für die Produktion eine Balance zwischen den Kosten und der Zukunftsfähigkeit des Unternehmens zu finden. Jede Form von Sicherheit, im Sinne von Zukunftsrobustheit, durch zusätzliche Ressourcen, Strukturen, Redundanzen und Puffer führt zu erhöhten Kosten. In der Theorie können Unternehmen sich gegen alle Eventualitäten rüsten, aber dies würde dem Ziel der Wirtschaftlichkeit widersprechen. Zwar werden für Produktionssysteme diese Fragen im Rahmen von Planungsaufgaben bearbeitet. Besonders die Konzepte der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bieten die Möglichkeit, nicht nur kurzfristig kostenorientiert zu planen, sondern auch verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten miteinzubeziehen. Aber die systematische Auseinandersetzung mit der eigenen Risikosituation in Bezug auf unerwartete, durchaus auch extreme Veränderungen sollte gezielt auch außerhalb von einzelnen Planungen stattfinden.

Demgegenüber steht das Risikomanagement, welches eine Batterie an Ansätzen bietet, sich mit dem Risiko der Zukunft auseinanderzusetzen. Das Risikomanagement beschränkt sich aber häufig auf die Absicherung der finanzwirtschaftlichen Risiken oder das Vorhalten von



Ad-hoc-Maßnahmen im Umgang mit betriebswirtschaftlichen Schäden (KERN & HARTUNG 2008, S. 64). Die Idee des Stresstests, sich systematisch mit verschiedenen, weitestgehend unangenehmen oder unpopulären Entwicklungen zu befassen und die Auswirkungen innerhalb eines Systems „durchzuspielen“, bietet einen Ansatz das Risikomanagement für Produktionssysteme zu ergänzen (REIBNITZ 1992, S. 62).

Für die Beschäftigung mit komplexeren, vermeintlichen Eventualitäten wird die Szenariotechnik als Methode im Risikomanagement vorgesehen (SCHNEEWEIß 2002, S. 132). Der Stresstest nutzt die Szenariotechnik und soll eine neue Perspektive auf die Untersuchung der Auswirkungen der Szenarien erzeugen. Weiterhin gilt es, die Bereiche und Möglichkeiten zu beleuchten, die dem Produktionssystem eine echte Erhöhung der Robustheit gegenüber solchen zukünftigen Ereignissen bieten. Das Vorhalten von Ressourcen, um Risiken zu begegnen, muss vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen systematisch bewertet werden.

### 1.3 Methodisches Vorgehen

Das übergeordnete Ziel dieser Forschungsarbeit ist zu einer neuen Erkenntnis zu gelangen und diese Erkenntnis der wissenschaftlichen Gemeinschaft sowie der Gesellschaft zur Verfügung zu stellen. Zur Sicherstellung, dass die Erkenntnis einen Mehrwert bietet, ist es geboten den Prozess der Entwicklung in das Forschungsgebiet des Produktionsmanagements einzuordnen. Diese Einordnung wird im Folgenden beschrieben und das Vorgehen für den Erkenntnisgewinn vorgestellt. Nach ULRICH & HILL (1979, S. 163) lässt sich die Wissenschaft in Formal- und Realwissenschaften unterscheiden. Die „Konstruktion von Sprache“ (ULRICH & HILL 1979, S. 163) mit der Art, Weise und Verwendung der enthaltenen Zeichen ist der Kern der Formalwissenschaften, hierzu gehören beispielsweise die Philosophie und Mathematik. Die Realwissenschaft hat als Kern ihrer Betrachtungen wahrnehmbare Ausschnitte der Wirklichkeit sowie deren Beschreibung, Erklärung und Gestaltung. Nach ULRICH & HILL (1979, S. 164) ergibt sich daraus, dass „die Realwissenschaften [...] Formen des Denkens nach bestimmten Regeln sind mit dem Zweck, subjektiv wahrgenommene Wirklichkeitsausschnitte zu explizieren (präzises, intersubjektiv mitteilbares Beschreiben mittels Begriffen), zu generalisieren (verallgemeinernde Abstraktion von Einzelfällen) und Handlungsalternativen zur ihrer Gestaltung zu entwerfen.“ Die Realwissenschaften können

weiter in reine Grundlagenwissenschaften und angewandte Handlungswissenschaften unterteilt werden. Erklärungsmodelle für empirische Wirklichkeitsausschnitte zu bilden ist das Ziel in den Grundlagenwissenschaften wie den Naturwissenschaften. Die Modelle besitzen einen theoretischen Charakter (ULRICH & HILL 1979, S. 163). Mit den Erkenntnissen aus den Grundlagenwissenschaften und den Erfahrungen der Praxis Problemlösungen für das praktische Handeln zu entwickeln, ist der Kern der anwendungsorientierten Forschung (THOMMEN ET AL. 2017, S. 16). Dabei werden menschliche Handlungsalternativen zur Gestaltung sozialer und technischer Systeme untersucht (ULRICH & HILL 1979, S. 164). Problemlösungen können z.B. in Form von Regeln, Modellen und Verfahren erarbeitet werden (THOMMEN ET AL. 2017, S. 16). Zu den angewandten Handlungswissenschaften zählen die Sozialwissenschaften, im Speziellen die Betriebswirtschaftslehre und die Ingenieurwissenschaften (ULRICH & HILL 1979, S. 164). Diese Arbeit lässt sich den Ingenieurwissenschaften und ihrer Teildisziplin des Produktionsmanagements zuordnen. Zusätzlich wird für diese Abhandlung an der Schnittstelle zu den Betriebswissenschaften geforscht.

Die theoretische Entwicklung von Erkenntnissen dieser Forschungsarbeit folgt der Konstruktionsstrategie empirischer Forschung von KUBICEK (1977), welcher die „Gewinnung von über Einzelfälle hinausgehenden Aussagen zur Lösung von Entscheidungsproblemen in der betrieblichen Praxis“ als wichtigstes Ziel der betriebswirtschaftlichen Forschung sieht (KUBICEK 1977, S. 5). Zentral für das Forschungsvorgehen ist ein provisorisches Erklärungsmodell, das die Richtung für Vorgehen in der Forschung vorgibt und eine Orientierungshilfe für die Lösung praktischer Probleme bieten soll (TOMCZAK 1992, S. 84). Dabei werden aus dem heuristischen Bezugsrahmen Fragen an die Praxis formuliert und diese werden dann im Praxisbezug erarbeitet und beantwortet. Nach einer kritischen Reflexion wird das Erforschte in neue Annahmen, Fragen und Interpretationsmuster überführt. Die Konstruktionsstrategie versteht Forschung in diesem Sinne als kontinuierlichen Lernprozess (KUBICEK 1977, S. 15-17). Basierend auf der Visualisierung der Konstruktionsstrategie empirischer Forschung durch TOMCZAK (1992, S. 84) wird ein für diese Arbeit ergänzter Zyklus in Abbildung 1 dargestellt.

Für den heuristischen Bezugsrahmen bilden die Einbindung ins akademische Umfeld des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswirtschaftslehre (iwb) der Technischen Universität München und die mehrjährige Tätigkeit der Autorin in Projekten der Strategiebildung sowie Planung und Optimierung von Produktionssystemen zwei zentrale Elemente.

Hier konnten im Kontakt mit anderen Wissenschaftler\*innen und Expert\*innen Erfahrungen gesammelt werden und konnte die Forschung hinterfragt und diskutiert werden. Dieser iterative Lernprozess, wie er in KUBICEKs (1977) Konstruktionsstrategie vorgestellt wird, hat die Fragen nach der Zukunftsfähigkeit von Produktionssystemen aufgeworfen. Im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit ist die Hypothese entstanden, dass ein Stresstestvorgehen wie in der Finanzindustrie eine wichtige und notwendige Ergänzung der bestehenden Risiko- und Zukunftsbetrachtungen für Produktionssysteme sein kann.

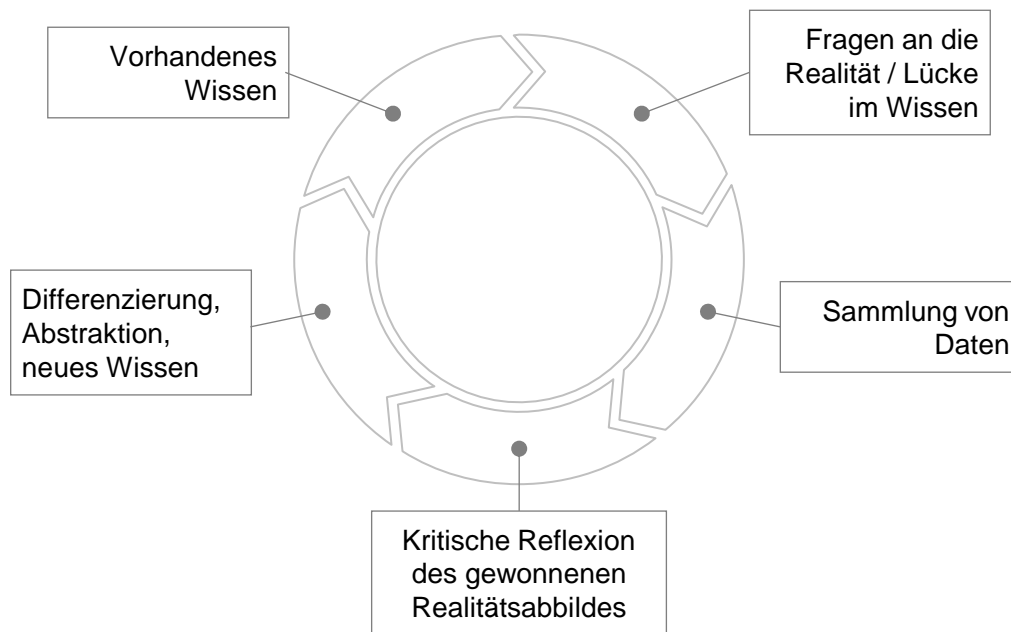


Abbildung 1: Explorativer Forschungszyklus (in Anlehnung an TOMCZAK 1992, S. 84)

#### 1.4 Zielsetzung der Arbeit

Mit der Erarbeitung des Stresstests soll den Verantwortlichen für Produktionssysteme eine systematische Methodik an die Hand gegeben, die den Schulterschluss zwischen strategischen Risikobetrachtungen und den dazugehörigen mittelfristigen Analysen und Planungen ermöglicht. So soll ein Werkzeug für die Einschätzung der Robustheit gegenüber zukünftigen Veränderungen entworfen werden. Hierfür soll eine systematische Einschätzung der eigenen Risikosituation in Bezug auf unerwartete, durchaus auch extreme Veränderungen erfolgen. Diese soll es ermöglichen, gezielt die richtigen Maßnahmen zu priorisieren und damit zu einem vorausschauenden Risikomanagement beitragen.

Die vorliegende Abhandlung wird dabei von fünf Forschungsfragen geleitet:

1. Welche Elemente enthält der Stresstest für die Finanzindustrie? Wie kann ferner eine Übertragung auf Produktionssysteme aussehen?
2. Wie können überprüfbare und relevante Testszenarien für Produktionssysteme entwickelt werden?
3. Wie können die Auswirkungen der Szenarien auf das Produktionssystem gezielt untersucht werden?
4. Wie kann aus den möglichen Belastungen des Produktionssystems eine Priorisierung von Maßnahmen erreicht werden?
5. Wie können die Elemente, die von zentraler Bedeutung für die Erhöhung der Zukunftsfähigkeit sind, identifiziert werden?

### 1.5 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

Der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit sind Produktionssysteme. In diesem Kapitel wird erläutert, wie die Begriffe Produktion und Produktionssystem verstanden werden. Weiterhin werden die für diese Arbeit zentralen Eigenschaften und Aspekte von Produktionssystemen hervorgehoben.

Die Produktion wird verstanden, als die „Gesamtheit wirtschaftlicher, technologischer und organisatorischer Maßnahmen, die unmittelbar mit der Be- und Verarbeitung von Stoffen zusammenhängen, d.h. alle Funktionen und Tätigkeiten, die unmittelbar an der Güterherstellung beteiligt sind“ (CIRP 2020, S. 8-9). Die Unternehmensbereiche, die der Produktion zugehörig sind, lassen sich anhand der zentralen Geschäftsprozesse der Auftragsabwicklung und der Produktentstehung veranschaulichen. Typischerweise umfasst die Produktion in Industrieunternehmen die Unternehmensbereiche der Entwicklung und Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Montage sowie der Produktionsplanung und des Einkaufs (siehe Abbildung 2).

Zentral für diese Arbeit ist es, die Produktion eines Unternehmens als System zu verstehen (KELLNER ET AL. 2018, S. 4, ROMEIKE 2018, S. 189). Produktionen finden innerhalb eines Unternehmens oder -netzwerkes auf verschiedenen Ebenen statt, welche jeweils eine

komplexe Struktur besitzen können und „zusammen ein Produktionssystem aufspannen“ (DYCKHOFF 2003, S. 4, SCHUH & SCHMIDT 2014, S. 3).

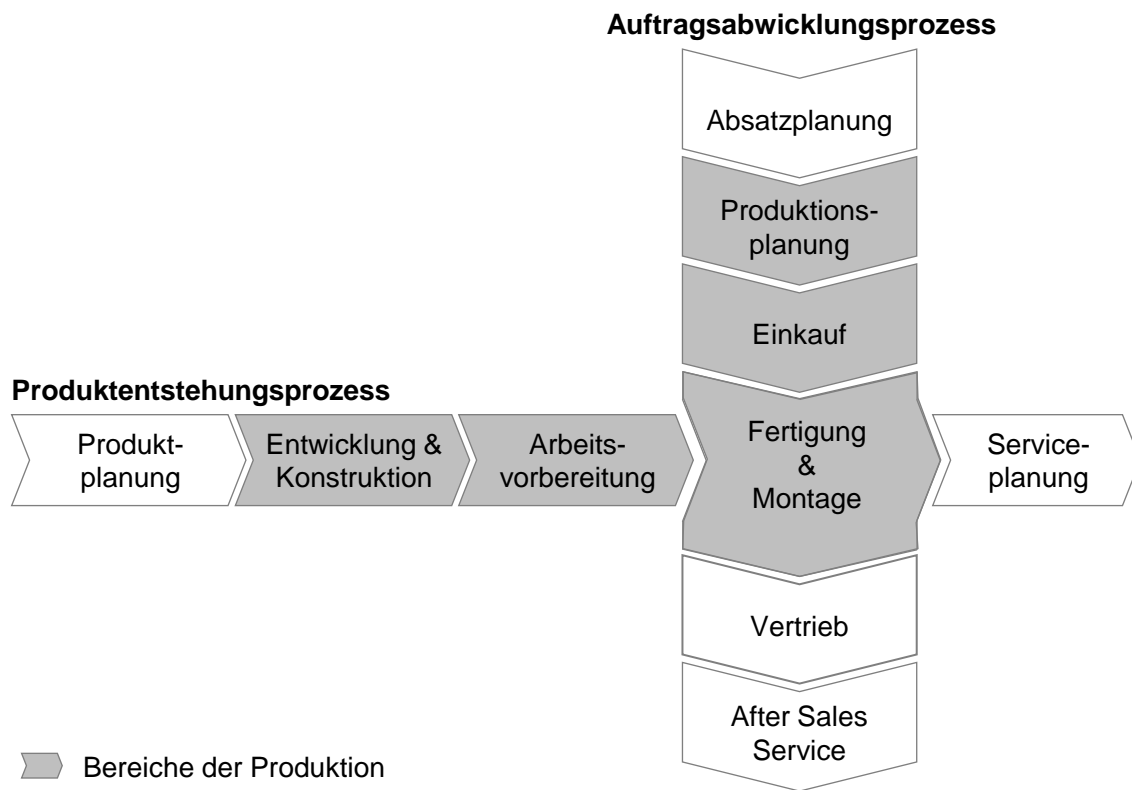


Abbildung 2: Referenzmodell für den Betrieb einer Produktion (in Anlehnung an DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 3)

Konkret wird in dieser Arbeit unter einem Produktionssystem jegliche „Organisation in der Fertigungsindustrie zur Realisierung der Produktion“ verstanden (SCHUH & SCHMIDT 2014, S. 4). Dabei beinhaltet das Produktionssystem die Produktionen selbst und eine Reihe von integrierten Funktionen (vgl. hierzu Abbildung 2) (CIRP 2020, S. 11). Weiterhin sind alle benötigten Strukturen wie die Steuerung, die Produktionsflächen, die Betriebsmittel, die Arbeitskräfte und die zeitliche und räumliche Anordnung dieser Elemente enthalten (REINHART ET AL. 2009, S. 750, SCHENK & WIRTH 2004). Verbunden im Zusammenspiel und durch Ursache-Wirkungs-Beziehungen sind Technik, Organisation und Menschen die Elemente des Systems und bilden eine aufgabengebundene Einheit (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 3, DYCKHOFF 2003, S. 4, MÄRZ ET AL. 2011, S. 3-5, ROMEIKE 2018, S. 189). Es wird von einem soziotechnischen System gesprochen (WESTKÄMPER 2008, S. 86). Dabei enthält das System Produktion verschiedene Ebenen, wobei jede Ebene ein System in sich

bildet (WESTKÄMPER 2008, 93–94). Die einzelnen Elemente des Systems können in der darunterliegenden Ebene des Produktionssystems wieder als System beschrieben werden (WESTKÄMPER 2008, 93–94). Aus einer räumlichen Perspektive sind die Ebenen das Netzwerk, der Standort, die Generalstruktur, die Gebäude, die Fertigungs- und Montagesysteme (Bereiche) und die Arbeitsplätze (hierarchisch geordnet) (NYHUIS ET AL. 2005, REINHART ET AL. 2009, S. 751, WIENDAHL 2005). Ein Produktionssystem muss dabei im ständigen Austausch mit dem technischen, wirtschaftlichen, soziokulturellen, rechtlichen, ökologischen und politischen Umfeld stehen und wird durch dieses maßgeblich beeinflusst (DYCKHOFF 2003, S. 4-5, SCHUH & SCHMIDT 2014, S. 3, WESTKÄMPER 2008, S. 93).

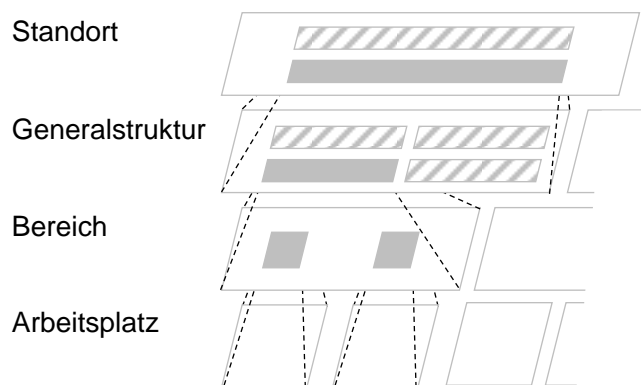


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der räumlichen Hierarchieebenen eines Produktionssystems (in Anlehnung an REINHART ET AL. 2009, S. 751 und WIENDAHL 2005, S. 22)

Die Ausführungen und Beschaffenheiten von Produktionssystemen unterscheiden sich je nach Industrien, Branchen, Unternehmensgrößen etc., aber auch abhängig davon, welche Güter, welche Technologien, welche Mengen etc. produziert werden, stark voneinander. In der Literatur werden verschiedene Arten der Typologisierung vorgestellt und genutzt (KELLNER ET AL. 2018, S. 6-7). KELLNER ET AL. (2018, S. 6) beschreiben sieben Typen von Produktionssystemen: die Güterform, die Mechanisierung, den Materialflusstyp, den Organisationstyp der Fertigung, die Prozessbindung, die Quantitätswiederholung und die Lage des Punktes der Entkopplung vom Kundenauftrag. Für die weiteren Ausführungen der Arbeit sind aus technischer Sicht alle Formen von Produktionssystemen eingeschlossen.

## 1.6 Aufbau der Arbeit

Das weitere Vorgehen stützt sich auf das von ULRICH (1984, S. 192-195) vorgestellte Forschungsvorgehen der angewandten Wissenschaften im Theorie- und Praxisbezug und wurde für das Forschungsvorhaben in dieser Arbeit angepasst. In Abbildung 4 wird der Aufbau der Abhandlung dargestellt und eine Zuordnung zum Forschungsvorgehen sowie zur Art der Forschung vorgenommen.

Art der Forschung	Forschungsvorgehen der angewandten Wissenschaften	Aufbau der Arbeit
<b>empirisch-induktiv</b>	Identifikation praxisrelevanter Probleme	1 Einleitung
<b>terminologisch-deskriptiv</b>	Erfassung und Interpretation problemrelevanter Theorien und Hypothesen	2 Grundlagen
	Erfassung und Spezifizierung problemrelevanter Verfahren	3 Stand der Technik
<b>analytisch-deduktiv</b>	Erfassung und Untersuchung relevanter Anwendungszusammenhänge, sowie Ableitung von Gestaltungsregeln und -modellen	4 Anforderungen
		5 Methodik
<b>empirisch-induktiv</b>	Überprüfung der Modelle im Anwendungszusammenhang	6 Anwendung und Bewertung
	Beratung der Praxis	7 Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 4: Wissenschaftliches Vorgehen und Struktur der Forschungsarbeit (in Anlehnung an PLEHN 2017, S. 20)

Aufbauend auf der in *Kapitel 1* beschriebenen Zielsetzung der Arbeit wird der Untersuchungsbereich spezifiziert und werden die Begriffe Produktion und Produktionssystem definiert. In *Kapitel 2* werden die problemrelevanten Themen als Grundlagen der Arbeit erfasst und eingeordnet. In einem ersten Schritt werden die Einflussfaktoren und das Umfeld von Produktionssystemen systematisiert. Anschließend wird ein gemeinsames Verständnis für die Begriffe Risiko und Unsicherheit geschaffen und auf industrielle Risiken im Spezifischen eingegangen. Weiterhin wird ein Einblick in die Theorien und Vorgehensweisen

des industriellen Risikomanagements gegeben. Nachfolgend werden zuerst die Sichtweisen auf die Themen Stress und Stressmodelle aufgezeigt und anschließend für den Anwendungsbereich der Arbeit interpretiert. Sodann wird die Entwicklung des Stresstests in der Finanzindustrie beschrieben. *Kapitel 3* erläutert aktuelle Erkenntnisse zur Durchführung von Stresstests in der Finanzindustrie. Weiterhin wird auf den Stand des Wissens zu Stresstests im industriellen Kontext eingegangen. Danach werden spezifische Veröffentlichungen zur Nutzung der Szenariotechniken sowie zur Aggregation von Unsicherheiten oder Risiken für Produktionssysteme und Fabriken vorgestellt. Die Methoden werden kritisch gewürdigt und die Erkenntnisse, welche die Vorarbeiten für diese Forschungsarbeit sind, herausgearbeitet. *Kapitel 4* stellt den Anwendungsbereich für die Methodik dieser Abhandlung vor. Darüber hinaus werden die Anforderungen an das Vorgehensmodell erläutert und wird der Rahmen aufgrund von gegebenen Voraussetzungen aufgespannt. In *Kapitel 5* wird das Vorgehensmodell für den Stresstest von Produktionssystemen entwickelt, beschrieben und anschließend detailliert. In *Kapitel 6* wird das Vorgehensmodell durch Anwendung in der Praxis überprüft. Mit Hilfe der Anwendung in einem Industrieunternehmen werden die theoretischen Erkenntnisse validiert. *Kapitel 7* fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick für den weiteren Handlungsbedarf.



## 2 Grundlagen

Die Grundlagen der Entwicklung des Stresstests für Produktionssysteme werden in diesem Kapitel erläutert. Im Rahmen des Stresstests sollen die Reaktionen des Produktionssystems auf Entwicklungen des Umfeldes untersucht werden (BORIO ET AL. 2011, S. 2). Als Grundlage hierfür werden diverse Einflussfaktoren, welche auf Industrieunternehmen und deren Produktionssysteme wirken, in Kapitel 2.1 beleuchtet und klassifiziert. Die Einflüsse, die von der Umwelt auf industrielle Unternehmungen wirken, wirken nicht ungefiltert auf das Produktionssystem, sondern werden durch das Umsystem interpretiert und gefiltert. Eine Übertragung von Veränderungen der Umwelt auf ein Produktionssystem ist somit nicht ohne weiteres möglich. Daher wird auch das Rezeptormodell vorgestellt, welches eine vereinfachte und systematische Übertragung ermöglicht. Für ein gemeinsames Verständnis werden die Begriffe Risiko und Unsicherheit in Kapitel 2.2 betrachtet. Anschließend wird das Risikomanagement, für welches der Stresstest ein ergänzendes Werkzeug darstellen soll, mit seinen Funktionen und Aufgaben in Kapitel 2.3 erläutert. In Kapitel 2.4 werden die Grundlagen für das Verständnis des Begriffes Stress geschaffen. Schließlich wird in das Vorgehen für Stresstests in der Finanzindustrie eingeführt.

### 2.1 Externe Einflüsse auf Produktionssysteme

Industrieunternehmen und ihre Produktionssysteme sind in eine facettenreiche Umwelt eingebettet und mit dieser über Interaktionen eng verknüpft, dabei werden materielle und immaterielle Objekte wie Güter, Dienste, Rechte und Informationen ausgetauscht (DYCKHOFF 2003, S. 1). Über diese Umwelt wirken Einflüsse aller Art auf das Unternehmen. Diese können in Form von erhöhten Belastungen auftreten und Risiken enthalten. Die Einflüsse treten in Form von langfristigen Trends auf oder können sich plötzlich stark verändern (ABELE & REINHART 2011, S. 10-11), sich gegenseitig verstärken oder ausgleichen. So bilden sie ein komplexes Netz von Abhängigkeiten. In Kapitel 2.1.1 werden diese Einflüssen für Industrieunternehmen erläutert.

### 2.1.1 Externe Einflussfaktoren

Für eine Systematisierung von externen Einflussfaktoren können je nach Betrachtungsfokus und -ebene verschiedene Ansätze genutzt werden. Für eine kurze Vorstellung unterschiedlicher Ansätze zur Systematisierung des Unternehmensumfeldes wird auf WONSAK ET AL. (2021, S. 2-3) verwiesen. Aufgrund der engen Wechselwirkungen und gegenseitigen Beeinflussung sind überschneidungsfreie Systematisierungen von Einflussfaktoren kaum möglich (MERZ 2011, S. 25). Für den Einbezug des Verhältnisses eines Industrieunternehmens mit einem Einflussfaktor wird auch zwischen lenkbaren und nicht lenkbaren Faktoren unterschieden (GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 106-107). Hierzu werden die Einflussfaktoren Bereichen zugeteilt, die sich in der Lenkbarkeit aus Sicht des Industrieunternehmens unterscheiden. Mit Hilfe der Gliederung in globales Umfeld, unternehmensexternes Umfeld und unternehmensinterner Bereich können die dazugehörigen Einflussgrößen pro Bereich strukturierter beschrieben werden (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 25, POHL 2013, S. 11). Die unternehmensinternen Einflussfaktoren lassen sich anhand der Organisationseinheiten des Unternehmens, z.B. Produktion, Personal und Einkauf, systematisieren (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 35). Im Folgenden werden die nicht lenkbaren Faktoren des globalen und unternehmensexternen Umfeldes näher beschrieben (siehe auch Abbildung 5).



Abbildung 5: Klassifizierung externer Einflussbereiche für Industrieunternehmen (in Anlehnung an DÜRRSCHMIDT 2001, S. 25, POHL 2013, S. 12)

Das globale Umfeld lässt sich in ökologische, ökonomische, soziokulturelle, politische/rechtliche und wissenschaftliche/technologische Einflüsse unterteilen (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 25-26, DYCKHOFF 2003, S. 5, GREBNER 2015, S. 56, ROSENKRANZ &

MIßLER-BEHR 2005, S. 36). Das globale Umfeld beinhaltet Größen, die typischerweise nicht branchen- oder industriespezifisch sind und in einem größeren, globalen Kontext stehen. Die globalen Größen haben dabei tendenziell einen mittel- und langfristigen Wirkcharakter (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 25). Diese können gleichzeitig aber einen direkten und durchaus extremen Einfluss auf Unternehmen haben. Ein Beispiel für solche direkten und durchaus extremen Einflüsse sind plötzliche, starke Preisschwankungen verursacht durch globalere Märkte (REINHART 2017, XXXV).

Unter die Kategorie Ökonomie fallen z.B. Effekte wie Konjunkturschwankungen und Kapitalmarktveränderungen. Damit hat die globale Ökonomie entscheidende Auswirkungen auf alle Arten von Absatz- und Beschaffungsmärkten (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 25). Im Bereich der Ökologie wirken Einflüsse unter anderem durch Regularien (HUBER 2011A), aber auch durch „Trends“. Zum Beispiel führt das steigende Bewusstsein über die Verantwortung für die Umwelt sowie ressourcen- und umweltschonendes Handeln zu veränderten Kriterien für Standortentscheidungen, aber auch zu veränderten Produkt- und Dienstleistungsspektren (HUBER 2011B). Regularien in diesem Bereich können z.B. einen direkten Stress in Bezug auf Dokumentationen und damit Softwareprojekte ausüben. In den Bereich der Ökologie fallen auch Krankheiten (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 36), wie etwa das Auftreten von neuen Viren beim Menschen, wie der SARS-CoV-2 Virus, welcher zu einer weltweiten Pandemie und damit zu extremem „Stress“ in Form von z.B. kurzfristigen Produktionsschließungen führte. Soziokulturelle Faktoren betreffen die Gesellschaft und ihre Kultur, hierzu zählen Veränderungen in gesellschaftlichen Gefügen (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 36), wie beispielsweise Veränderungen der Altersstruktur oder des Niveaus der Ausbildung. Aber auch der Trend zur zunehmenden Individualisierung von Gesellschaften fällt in diese Kategorie. Einflüsse, die durch den Staat, Staatenverbände, Regierungen oder auch Handelsabkommen entstehen, fallen in den Bereich der Politik und des Rechts. Gesetze und Regularien sind hier wirkende Faktoren für Industrieunternehmen. Wissenschaftliche und technologische Faktoren sind unter anderem wissenschaftliche Entwicklungen (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 37), wie Erkenntnisse zu Gefahrenstoffen und -potentialen, welche dann zu neuen Technologieentwicklungen führen können. Ein aktuelles Beispiel für technologische Entwicklungen dieser Art ist das Cloud-Computing (REINHART 2017).

Das unternehmensexterne Umfeld umfasst Einflussfaktoren, die innerhalb der Branche oder des Marktes eines Industrieunternehmens liegen und in die Kategorien Wettbewerb, Absatzmarkt, Lieferanten und Partner/Netzwerke, Ressourcen, Kunden, Technologien und Arbeitsmarkt gegliedert werden können. Dieses direktere Umfeld von Industrieunternehmen wirkt unmittelbar auf das Unternehmen (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 27), da Industrieunternehmen als offenes System im ständigen Austausch mit ihrem Umfeld stehen. Die Einflussfaktoren sind zahlreich und verändern sich ständig. Diese Einflussfaktoren sind für Unternehmen unter bestimmten Umständen (mit) gestaltbar, aber nicht im eigentlichen Sinne lenkbar – sie liegen „außerhalb“ des Systems Industrieunternehmen, aber z.B. innerhalb von Netzwerkaktivitäten. Die Einflussfaktoren im externen Umfeld bergen für Unternehmen Chancen und Risiken. In den folgenden Absätzen werden für einzelne Kategorien beispielhafte Einflussfaktoren des externen Umfeldes vorgestellt.

Der Wettbewerb entsteht aus marktwirtschaftlicher Sicht, wenn mindestens zwei Anbieter um die Nachfrage nach bestimmten Gütern konkurrieren – dies geschieht mit dem Streben nach einem optimalen Preis-Leistungs-Verhältnis für potentielle Kund\*innen (WÖHE ET AL. 2016, S. 383). Zusätzliche Wettbewerber erhöhen den Druck im Markt und sind ein wichtiger Einflussfaktor für die Ausrichtung eines Unternehmens. Einen weiteren Einfluss stellen z.B. Fusionen von Wettbewerbern dar (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 38). Wichtige Einflussfaktoren auf dem Absatzmarkt sind z.B. unerwartete Konjunktur- und Branchenentwicklungen (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 37). Für die Gestaltung von Lieferantenbeziehungen und der dazugehörigen Lieferketten ist die erhöhte Komplexität und Digitalisierung von Zulieferketten relevant, welche neue Arten der Zusammenarbeit möglich und sinnvoll macht (SCHUH ET AL. 2017, S. 19-20). Im Bereich der Partner und Netzwerke, in denen sich Unternehmen bewegen, entstehen Risiken z.B. durch enge Verknüpfung mit erhöhtem Datenaustausch (ECKERT 2017, S. 116-117). Wichtig sind nicht nur die physischen Abhängigkeiten, sondern auch digitale Abhängigkeiten, also zusätzliche Verbindungen, von deren Verfügbarkeit Industrieunternehmen verstärkt abhängig sind (REINHART & ZÜHLKE 2017, XXXIV). Auf Kundenseite ist in vielen Branchen eine zunehmende Individualisierung von Produkten und Dienstleistungen gefordert (REINHART & ZÜHLKE 2017, XXXVII). Auch veränderte Dynamiken im Arbeitsmarkt sind für Industrieunternehmen immer relevanter (MENCK ET AL. 2013, S. 134), zum Beispiel kann es in Hochlohnländern, wie Deutschland, immer schwieriger werden ausreichend Mitarbeitende mit spezifischen Kenntnissen zu finden.

## 2.1.2 Rezeptormodell

Dem Rezeptormodell liegt die Annahme zu Grunde, dass alle relevanten Einflüsse von Umweltveränderungen mit Hilfe einer limitierten Anzahl an Rezeptoren für die Produktion abgebildet werden können. Die Rezeptoren beschreiben die „Kanäle“, die direkt auf die Produktion wirken, und fungieren als Übersetzer zwischen Einflüssen, die auf das Umsystem wirken, und den Auswirkungen, die diese Einflüsse auf die Produktion haben (CISEK ET AL. 2002, REINHART ET AL. 2009, ZÄH ET AL. 2005B, ZÄH ET AL. 2005A). Das Rezeptormodell haben CISEK ET AL. (2002) eingeführt und es wurde in zahlreichen Veröffentlichungen zu wandlungsfähigen Produktionssystemen weiterentwickelt (siehe hierzu (HEINEN ET AL. 2008, MÖLLER 2008, POHL 2013, REINHART ET AL. 2009, ZÄH ET AL. 2004, ZÄH ET AL. 2005B, WONSAK ET AL. 2021)).

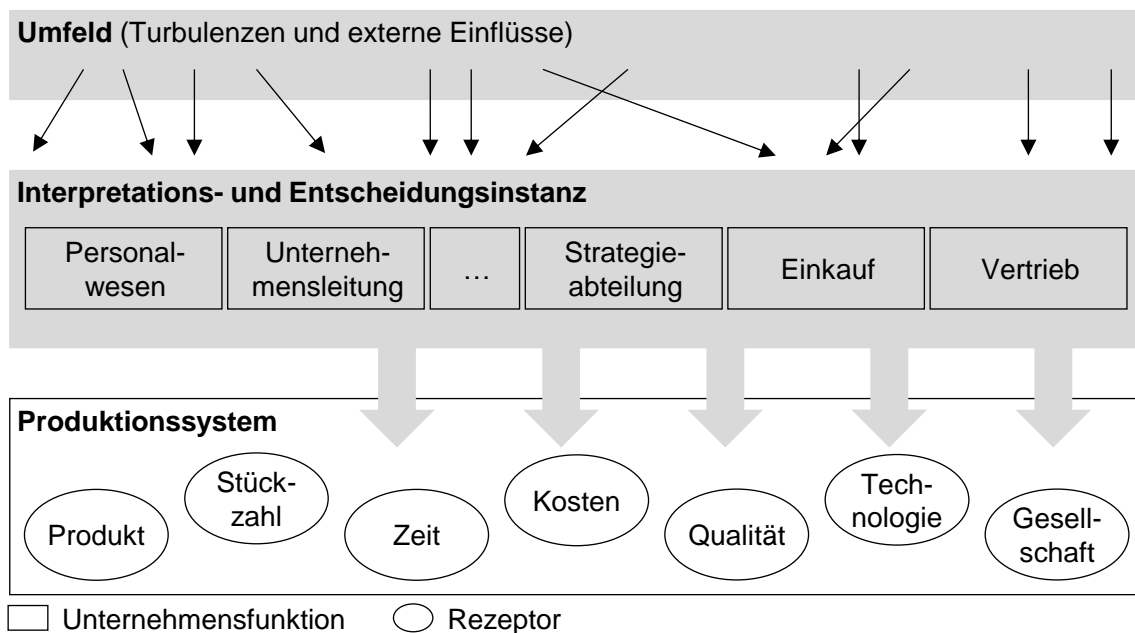


Abbildung 6: Rezeptormodell (in Anlehnung an POHL 2013, S. 14)

Wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt, wirken Einflüsse von außen auf die Produktion über sieben definierte Rezeptoren: Produkt, Stückzahl, Zeit, Kosten, Qualität, Technologie und Gesellschaft (CISEK ET AL. 2002, HEINEN ET AL. 2008, POHL 2013, ZÄH ET AL. 2005B), wobei der sechste Rezeptor Technologie erst von MÖLLER (2008, S. 25) ergänzt wird. Von WONSAK ET AL. (2021, S. 3-4) wurde auf Basis einer Literaturstudie zudem der siebte Rezeptor Gesellschaft ergänzt. Für die Erweiterung des Rezeptormodells wurden die Rezeptoren mit den in der Literatur erwähnten Einflussfaktoren verglichen. Das Konzept bedient sich

einer Analogie aus der Biologie zu den Rezeptoren von Organismen, welche die Empfangs- oder Aufnahmefunktion für spezifische Reize übernehmen (MÖLLER 2008, S. 23). Für die Produktion wird mit Hilfe des Modells abgebildet, dass unterschiedliche Einflüsse der Umwelt und Umsysteme nur über eine begrenzte Anzahl von Steuergrößen und nicht unvermittelt auf das Produktionssystem wirken. Die sieben Rezeptoren werden im Folgenden für die Produktion vorgestellt. Für die ersten sechs Rezeptoren vgl. auch MÖLLER (2008) und POHL (2013) und für den siebten Rezeptor, Gesellschaft, vgl. WONSAK ET AL. (2021, S. 3).

- *Produkt bzw. Produktvarianten:*  
Dieser Rezeptor beschreibt die Produkte, den Output der Produktion, hinsichtlich ihrer Funktion, Masse, Größe oder Form, definiert also, welche Produkte bzw. Produktvarianten produziert werden sollen.
- *Stückzahl:*  
Der Rezeptor Stückzahl erfasst die Menge der herzustellenden Produkte bzw. Produktvarianten für festgesetzte Termine oder Zeiteinheiten.
- *Zeit:*  
Unter Zeit wird die maximal zulässige Dauer zwischen Bedarfsentstehung und -befriedigung verstanden. Damit wird festgelegt, zu welchem Zeitpunkt welches Produkt produziert sein sollte.
- *Kosten:*  
Sämtliche Änderungen der Preise für Produktionsfaktoren werden über den Rezeptor Kosten wahrgenommen. Weiterhin gibt dieser Rezeptor Trends und Vorgaben für die Kostenstrukturen der Produktion vor.
- *Qualität:*  
Der Rezeptor Qualität beschreibt die Güte der herzustellenden Produkte bzw. Produktvarianten.
- *Technologie:*  
Dieser Rezeptor umfasst die verfügbaren sowie strategisch oder gesetzlich zulässigen Ressourcen und Verfahren.

- *Gesellschaft:*

Die sozialen und geographischen Faktoren, welche direkte Auswirkungen auf die Produktionen haben, werden mit Hilfe dieses Rezeptors abgebildet. Hierbei geht es um Regularien und Gesetze, die Mitarbeiterverfügbarkeit und die Verfügbarkeit von anderen Hilfsmitteln, wie Mitarbeitende, Material, Services und Information.

Die Umwelt wirkt mit einer Vielzahl von Stressoren, Turbulenzen und externen Einflüssen direkt auf das Unternehmen. Dieses muss die Umfeldentwicklungen erkennen und die Auswirkungen auf die Produktion über die Rezeptoren beschreiben bzw. interpretieren (POHL 2013). Dies geschieht in der Regel in unterschiedlichen Unternehmensfunktionen (MÖLLER 2008, REINHART ET AL. 2009). So bilden diese Unternehmensfunktionen, welche die direkte Schnittstelle nach außen sind, um in der Analogie zu sprechen, die Fasern und „Intelligenz“ des Rezeptors. Typische Unternehmensfunktionen, die diese Aufgaben übernehmen, sind Strategieabteilungen und die Unternehmensführung, aber auch der Einkauf, Verkauf und Planungsabteilungen. Konkret kann dies bedeuten, dass ein Trend, wie die Veränderung von Rohstoffpreisen, von diesen Abteilungen beobachtet und interpretiert wird. Die Unternehmensführung könnte diesen Trend für die Produktion über den Rezeptor Preis als eine Vorgabe zur Verringerung des Rohstoffverbrauchs weitergeben. Dabei können die Informationen, welche über den Rezeptor weitergegeben werden, durchaus Trendaussagen sein (CISEK ET AL. 2002, MÖLLER 2008). So wird eine Vielzahl von externen Einflüssen für die Produktion zu identischen Auswirkungen in Form von Tendenzen, Vorgaben oder Entscheidungen (CISEK ET AL. 2002, MÖLLER 2008, S. 21).

Die Rezeptorbeschreibungen wurden von MÖLLER (2008, S. 93-94) weiter detailliert. Die detaillierten Eigenschaften der Rezeptoren werden als „Sub-receptors“ (WONSAK ET AL. 2021) oder als Führungsgrößen der Produktion (MÖLLER 2008, S. 93-94) verstanden. Inhaltlich sind dies vor allem Eingangs- und Ausgangsgrößen für die Produktion. Je nach Perspektive, mit der gearbeitet wird, handelt es sich um Steuergrößen oder Planungsgrößen. CISEK ET AL. (2002, S. 442-443) beschreiben in diesem Zusammenhang ein Bild von einem Regelkreis um die Produktion. Die Führungsgrößen des Regelkreises sind die Untergrößen der Rezeptoren („Sub-receptors“). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird von Führungsgrößen gesprochen. Dieser Begriff wird nicht nur gewählt, weil der Regelkreis eine hilfreiche Analogie darstellt. Sondern er wird auch gewählt, weil er nicht so stark wie die

Begriffe Eingangs-, Ausgangs-, Steuer- und Planungsgrößen mit gängigen anderen Bedeutungen assoziiert ist. Eine Unterkategorisierung, so wie sie von WONSAK ET AL. (2021) vorgestellt wird, ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Rezeptoren und die dazugehörigen Führungsgrößen

Rezeptor	Führungsgrößen
Quantität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt</li> <li>• Prozesse</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personaleinsatz</li> <li>• Betriebsstätten &amp; Betriebsmittel</li> </ul>
Produkt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Struktur</li> <li>• Material</li> <li>• Form</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberflächen</li> <li>• Design und Farbe</li> </ul>
Qualität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt</li> <li>• Prozess</li> <li>• Information</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeitsleistung</li> <li>• Logistik</li> </ul>
Zeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organisation</li> <li>• Prozess</li> <li>• Stillstand</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung und Nacharbeit</li> <li>• Transport</li> <li>• Lieferung und Beschaffung</li> </ul>
Technologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt</li> <li>• Produktion</li> <li>• Logistik</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material</li> <li>• Information / IT</li> </ul>
Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regularien und Gesetze</li> <li>• Mitarbeiterverfügbarkeit</li> <li>• Materialverfügbarkeit</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dienstleistungsverfügbarkeit</li> <li>• Informationsverfügbarkeit</li> </ul>

Wie in Kapitel 1.5 beschrieben, sind Produktionssysteme offene Systeme, die in ein dynamisches Umfeld eingebettet sind. Eine von diesem Umfeld isolierte Betrachtung ist für einen Stresstest nicht zielführend, denn gerade die von außen wirkenden Einflüsse sind es, die einen Stresstest initiieren und motivieren können. Die Einflüsse, die von außen auf



Produktionssysteme wirken, werden für Stresstests in Szenarien erfasst.<sup>1</sup> Eine direkte Übertragung der Einflussfaktoren und entsprechender Zukunftsszenarien auf Produktionssysteme gestaltet sich schwierig (HERNÁNDEZ MORALES 2003, POHL 2013, S. 13). Die Übertragung kann mit Hilfe eines Rezeptormodells handhabbar gemacht werden (POHL 2013, S. 13). So wird die Modellierung von Entwicklungen in der Umwelt des Produktionssystems im Stresstest ermöglicht und die Komplexität reduziert.

## 2.2 Risiko und Unsicherheit

Die Begriffe Unsicherheit und Risiko gehören zum aktiven Wortschatz im deutschen Sprachgebrauch (DUDENREDAKTION O.J.B) und sind zugleich wissenschaftliche Konzepte. Beide Begriffe werden in zahlreichen Wissenschaftsdisziplinen genutzt und unterschiedlich definiert (BANSE & BECHMANN 1998, S. 29-59, HORVÁTH ET AL. 2011, JONEN 2007, MIKUS 2001, S. 5, ROMEIKE 2018, S. 8-12, WOLKE 2016, S. 1). Im Folgenden wird das Verständnis von Unsicherheit und Risiko für diese Arbeit vorgestellt.

### *Unsicherheit*

Unsicherheit herrscht dann, wenn zukünftige Ereignisse oder Entwicklungen oder deren Ausprägungen nicht oder noch nicht bekannt sind. Dabei werden für Unsicherheiten drei Zustände unterschieden: das Risiko, die Ungewissheit und das Unwissen (BREDOW 2012). Sind mögliche Ereignisse bekannt und kann die Wahrscheinlichkeit des Eintretens abgeschätzt werden, so wird die Unsicherheit als Risiko bezeichnet. Anders ist es bei Ungewissheit, hier sind die Wahrscheinlichkeiten, mit welchen zukünftige Ereignisse eintreten können, nicht abschätzbar (MÖLLER 2008, S. 28, WEBER ET AL. 2018, S. 409, WÖHE ET AL. 2016, S. 87). Bei Unwissen liegt zusätzliche Unklarheit über mögliche zukünftige Ereignisse vor (MÖLLER 2008, S. 28, WEBER ET AL. 2018, S. 409).

### *Risiko*

Risiken können ursachen- und/oder wirkungsbezogen betrachtet werden (MERZ 2011, S. 13, HORVÁTH ET AL. 2011, S. 199). In der ursachenbezogenen Betrachtung liegt der Fokus

---

<sup>1</sup> Die Erfassung der äußeren Einflüsse kann der Ausgangspunkt für einen Stresstest sein. Die Fähigkeiten des Produktionssystems selbst, wie zum Beispiel das Reaktionsvermögen, die Kompetenzen und die interne Dynamik, sind entscheidend für den Umgang mit extremen Szenarien. Diese werden in der vorgestellten Methodik dieser Arbeit berücksichtigt.

auf der Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen und dem dadurch entstehenden Risiko (siehe vorheriger Absatz) (MERZ 2011, S. 13). In der wirkungsbezogenen Betrachtung steht die Auswirkung des Risikos, die Abweichung von einem Zielwert, im Fokus (MERZ 2011, S. 13). Da Abweichungen vom Zielwert sowohl positiv als auch negativ sein können, wird beim Risiko im engeren Sinne die Abweichung auf den negativen Bereich beschränkt (MERZ 2011, S. 13). So ist das Risiko im engeren Sinn nur ein Risiko, wenn es negative Wirkungen auf einen Zielwert hat (KREBS 2011, S. 18-21, MERZ 2011, S. 12-14, HORVÁTH ET AL. 2011, S. 199).

Eine hybride Sichtweise ermöglicht der wirkungs- und ursachenbezogene Risikobegriff nach BRAUN (1984). Für die Betrachtung des Risikos werden hier sowohl eine negative Zielverfehlung als auch die nicht vorhandenen Informationen über die Ursache einbezogen (BREDOW 2012, ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 22, THIEMT 2003, S. 3-5). Angelehnt an BREDOW (2012) ist damit in dieser Arbeit ein *Risiko eine unsichere Informationslage, die zu einer negativen Auswirkung führen kann*.

Verschiedene Arten von Risiken werden in der Literatur und wirtschaftlichen Praxis unterschiedlich systematisiert (WOLKE 2016, S. 7). Eine „trennscharfe“ Abgrenzung ist dabei oft nicht möglich. Nichtsdestotrotz ist eine Systematisierung entsprechend der jeweiligen Fragestellung sinnvoll (WOLKE 2016, S. 7). Der Stresstest für Produktionssysteme in dieser Arbeit wird technisch-betriebswirtschaftlich gestaltet und fokussiert Unternehmen mit einer industriellen Produktion, deswegen wird im Folgenden eine Systematisierung der betriebswirtschaftlichen bzw. industriellen Risiken vorgestellt.

### *Industrielle Risiken*

Industrielle Risiken werden in leistungs- und finanzwirtschaftliche Risiken unterschieden (WOLKE 2016, S. 7).<sup>2</sup> Dabei fallen Risiken, welche Finanzprozesse betreffen, in die zweite Kategorie. Hierzu werden Risiken durch Marktpreise (wie z.B. Zinsänderungen, Aktienkurse) sowie Ausfall- und Liquiditätsrisiken gezählt (WOLKE 2016, S. 7). Hingegen werden Risiken, welche die anderen industriellen Prozesse betreffen, als leistungswirtschaftliche Risiken kategorisiert (WOLKE 2016, S. 7). Dazu zählen z.B. Sachrisiken, Personenrisiken,

---

<sup>2</sup> Diese Kategorisierung hat sich für das Management industrieller Risiken etabliert. Es handelt sich um einen ursachenbezogenen Ansatz, der eine Zuordnung von Maßnahmen und Verantwortlichkeiten erlaubt (MERZ 2011, S. 26).

Absatz- und Beschaffungsrisiken, Rechtsrisiken oder politische Risiken (HÖLSCHER & ELFGEN 2002, S. 6).

Weiterhin können leistungswirtschaftliche Risiken nach ihrem Ursprung, dem Umfang ihrer Auswirkungen oder nach Verantwortungs- oder Unternehmensbereichen gegliedert werden (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 145). Für den Ursprung der leistungswirtschaftlichen Risiken wird zwischen internen und externen Ursachen für Unternehmen unterschieden (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 145, WOLKE 2016, S. 9), also Risiken, die ihre Ursachen im Unternehmen haben, wie z.B. durch Störungen oder Fehler, sowie Risiken, deren Ursachen außerhalb, z.B. im Einkaufsmarkt, liegen. Die Auswirkungen beziehen sich beispielsweise darauf, ob es sich um strategische oder operative Risiken handelt, und mit Verantwortungsbereich ist entsprechend ein Unternehmensbereich oder eine Unternehmenseinheit gemeint (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 145).

Industrielle Risiken werden auf unterschiedlichen Aggregationsstufen betrachtet, für den Umgang mit Risiken sollten diese Stufen beachtet werden, da auch die Modelle, welche für die Analyse und Steuerung der Risiken genutzt werden, auf unterschiedlichen Ebenen ansetzen (HÖLSCHER & ELFGEN 2002, S. 6). Die Betrachtung von finanzwirtschaftlichen Risiken erfolgt auf einer sehr ‚hohen‘ Aggregationsstufe. Die Analyse von Risiken in Wertschöpfungsprozessen hingegen erfolgt auf einer detaillierteren Ebene. Finanzwirtschaftliche Risiken werden für den Stresstest nicht näher untersucht.

### 2.3 Risikomanagement

Risikomanagement sind „koordinierte Aktivitäten zur Lenkung und Steuerung einer Organisation in Bezug auf Risiken“ (DIN ISO 31000:2018). In Industrieunternehmen dient das Risikomanagement den Unternehmenszielen, wie der Gewinnmaximierung und dem Werterhalt. Dabei trägt es zur Schaffung und zum Schutz von Werten bei, indem Risiken erfasst und überwacht sowie geeignete Maßnahmen zu deren Abwehr initiiert werden (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 40). Dazu sind viele einzelne Risiken, die innerhalb und außerhalb des Unternehmens entstehen und sich durch Entscheidungen manifestieren können, in ihrer Komplexität zu erfassen, aber auch das daraus resultierende Gesamtrisiko muss erfasst und überwacht werden (SCHIMMELPFENG 2001, S. 279). Mit Hilfe von Risikomanagementprozessen wird das systematische Vorgehen im Umgang mit diesen Risiken sichergestellt (WOLKE 2016, S. 1-3). In Deutschland sind Aspekte des Risikomanagements

für börsenorientierte Unternehmen im Gesetz zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich (KonTraG) vorgeschrieben (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 16). Für alle Formen von Organisationen wird vom Deutschen Institut für Normung e. V. (DIN) die Leitlinie DIN ISO 31000:2018 zum Risikomanagement herausgegeben. Die Verantwortung für das Gesamtrisiko liegt bei der Unternehmensführung, dem Management oder Aufsichtsfunktionen und damit ist das Risikomanagement eng mit den anderen Führungsaufgaben verknüpft (MIKUS 2001). Nach der Einzelrisiken hingegen sollten auf den Ebenen untersucht und gemanagt werden, auf denen sie auftreten (DIN ISO 31000:2018).

Der Kernprozess des Risikomanagements umfasst die Risikoidentifikation, Risikoanalyse, Risikobewertung, Risikosteuerung (oder -behandlung) und Risikoüberwachung (DIN ISO 31000:2018, ROMEIKE 2018, ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005). In der Literatur gibt es eine Reihe unterschiedlicher Versionen dieser Prozesse, die sich in der Benennung der einzelnen Phasen und ihrer Abgrenzung untereinander unterscheiden (MIKUS 2001, S. 14). Zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen werden hier in der Literatur gängige Unterschiede behandelt. Die Risikobehandlung wird in der Literatur häufig als Risikosteuerung verstanden (ROMEIKE 2018, ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, MIKUS 2001). Die Risikoanalyse wird von MIKUS (2001) als Prozessschritt begriffen, welcher die Risikoidentifikation und Risikobewertung enthält. Die DIN ISO 31000:2018 fasst die Identifikation, Analyse und Bewertung von Risiken als Risikobeurteilung zusammen. Der Kernprozess des Risikomanagements wird ergänzt mit den ständigen Aufgaben zur Überwachung und Überprüfung des Risikomanagements, der Festlegung einer Strategie und damit verbunden der Festlegung von Anwendungsbereichen, Kontext und Kriterien für das Risikomanagement, aber auch der Kommunikation und Konsultation sowie des Aufzeichnens und Berichtens der Tätigkeiten (DIN ISO 31000:2018, ROMEIKE 2018, ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005).

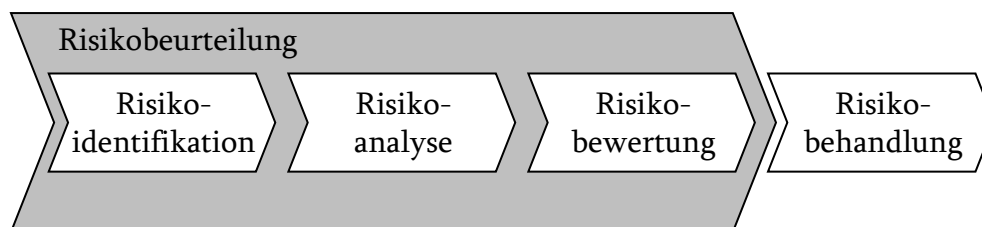


Abbildung 7: Modellvorgehen zum Risikomanagement (in Anlehnung an DIN ISO 31000:2018 und BREDOW 2012)

Obwohl der Prozess in unterschiedlichen Varianten beschrieben wird, sind die dem Risikomanagement zugeschriebenen Kernaufgaben und deren Zusammenhänge ähnlich. Anhand des in Abbildung 7 dargestellten Prozesses werden im Folgenden die Aufgaben des Risikomanagements aufgezeigt und beschrieben.

### 2.3.1 Risikobeurteilung

Die Risikobeurteilung besteht aus der Identifikation, Analyse und Bewertung der Risiken. Die Identifikation, vollständige Erfassung und Beschreibung von Risikoquellen legen die Grundlage für den Umgang mit Risiken (DIN ISO 31000:2018, MIKUS 2001). Die Analyse des Unternehmensumfeldes und auch des globalen Umfeldes sowie die Analyse innerhalb des Unternehmens helfen Veränderungen, Bedrohungen und Chancen zu erkennen. Bei der Identifikation ist es notwendig auch sogenannte schwache Signale zu erfassen (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005) und mit qualitativen Ergebnissen zu arbeiten (ROMEIKE 2018, S. 37). Die Arbeit mit Frühwarnsystemen oder Früherkennungssystemen, welche z.B. indikator- oder kenngrößenbasiert sind, wird in Industrieunternehmen zur Beobachtung des Umfeldes genutzt (ROMEIKE 2018, S. 39, ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 42).

Mit Hilfe der Risikoanalyse soll ein besseres Verständnis für detektierte Risiken entwickelt werden – in die Analyse werden dabei Ursachen und Quellen der Risiken, ihre Auswirkungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten einbezogen (ROMEIKE 2018, ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005). Wichtig ist neben der Analyse von Einzelrisiken auch eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen Risikofaktoren sowie deren Ursache-Wirkungs-Beziehung (MIKUS 2001). Die Relevanz der Risiken wird analysiert, um die Bedeutung für die weiteren Prozesse einschätzen zu können. Die Schwere der Auswirkungen ist ein zentrales Kriterium für die weitere Bewertung (ROMEIKE 2018, ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 40). Der Detailgrad der Analyse muss abhängig von den Risiken, dem Zweck der Analyse, aber auch dem vorhandenen Informationsstand gewählt werden. Die Analysen können qualitativ und quantitativ sein (ROMEIKE 2018).

Für die Risikobewertung kann sowohl top-down als auch bottom-up vorgegangen werden. Für das Top-down-Vorgehen werden die bekannten Folgen von Risiken auf z.B. das Betriebsergebnis ermittelt. Dabei wird eine „Makroperspektive“ eingenommen und der Fokus sind die Unternehmensrisiken aus strategischer Sicht. Für den Bottom-up-Ansatz wird von

den einzelnen Organisationseinheiten aus eine Risikobewertung eingeleitet und von Ebene zu Ebene immer weiter aggregiert, bis eine gesamtheitliche Bewertung vorliegt (ROMEIKE 2018).

Die Verfahren zur Unterstützung und Durchführung der Risikobeurteilung für Industrieunternehmen sind vielfältig und lassen sich nicht eindeutig den einzelnen Phasen der Identifikation, Analyse und Bewertung von Risiken zuordnen (ROMEIKE 2018, S. 55, MIKUS 2001, S. 19, GÖTZE & MIKUS 2001, S. 389). In Abhängigkeit von der Fragestellung, den betrachteten Risiken, dem Zweck der Analyse, aber auch dem vorhandenen Informationsstand müssen die geeigneten Verfahren ausgewählt werden (ROMEIKE 2018, S. 55, MIKUS 2001, S. 19, GÖTZE & MIKUS 2001, S. 389). Dabei ist für eine erfolgreiche Identifikation möglicher Risiken zumeist eine Kombination mehrerer Instrumente gefragt (MIKUS 2001, S. 21). Neben der Anwendung von klassischen Verfahren wird für komplexe Systeme auch an automatischen Vorhersagen für Risiken gearbeitet (MUELLER ET AL. 2019). Zum Beispiel werden operative Risiken für moderne Produktionsstätten mit maschinellem Lernen identifiziert (MUELLER ET AL. 2019).

Für die klassische Risikoidentifikation unterscheidet ROMEIKE (2018) Kollektions- und Suchmethoden. Die Kollektionsmethoden sind für den Umgang mit Risiken geeignet, welche bereits bekannt und „offensichtlich“ sind. Die Suchmethoden hingegen sind vor allem für noch unbekannte Risiken einzusetzen. ROSENKRANZ (2005) unterteilt die Methoden zur Identifikation von Risiken in vergangenheitsbezogene Identifikation und Identifikation zukünftiger Risiken. Dabei sind die Kollektionsmethoden Teil der vergangenheitsbezogenen Betrachtung. Beispiele hierfür sind Checklisten, Betriebsinspektionen, Flussdiagramm und SWOT-Analysen. Die Suchmethoden können nach ROMEIKE (2018) weiter in analytische Methoden und Kreativitätsmethoden unterteilt werden. Andere Autoren sprechen hier von Prognoseverfahren, die in qualitative (intuitiv) und quantitative (analytisch) Verfahren unterschieden werden können (MIKUS 2001, S. 19, SCHIMMELPFENG 2001, S. 281). Vertreter der Gruppe der analytischen Verfahren sind Fehlerbaumanalyse, FMEA und Ishikawa-Diagramme, zu den Kreativitätsmethoden gehören Brainstorming, aber auch die Szenarioanalyse und die Arbeit mit System Dynamics. Basierend auf der FMEA wurde von SCHUH & HEIN (2006) ein strategischer Ansatz zur frühzeitigen Identifikation von Risiken (RMEA) entwickelt. Dieser strategische Ansatz hat, ähnlich wie der Stresstest, das Ziel Risiken auch

aus dem Umfeld des Unternehmens frühzeitig und systematisch zu identifizieren. Das Werkzeug RMEA wird deswegen am Ende dieses Abschnittes gesondert erläutert.

ROSENKRANZ (2005) hebt aus der Reihe aller dieser Prognose- und Suchmethoden für die Identifikation und Analyse zukünftiger Risiken die Kreativitätstechniken im Allgemeinen, im Speziellen die Szenarioanalyse und Simulationsmodelle als besonders relevante Werkzeuge herauszustellen. Diese sind vor dem Hintergrund, dass der Stresstest für Produktionssysteme primär zukünftige, hypothetische Risiken einbeziehen soll, für diese Arbeit als relevant hervorzuheben. Kreativitätsmethoden unterstützen die Entwicklung von neuartigen Ideen oder originellen Lösungen (ROMEIKE 2018, S. 55, MIKUS 2001, S. 19, GÖTZE & MIKUS 2001, S. 389). Dabei wird flüssiges und flexibles Denken angeregt und gefördert, um Unsicherheiten und Risiken zu identifizieren, die außerhalb des gewöhnlichen „Denkraums“ liegen. Die Szenarioanalyse, auch eine kreative Methode, hat sich in der Anwendung für Industrieunternehmen etabliert (HAMBACH & ALBRECHT 2014, LIPPOLD & WELTERS 1976, S. 7, MIßLER-BEHR 1993). Analytische Verfahren dienen in vielen Fällen nicht nur der Identifikation von Risiken, sondern auch als Analyse- und Bewertungsvorgänge. Nachdem die Erfassung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen erfolgt ist, gilt es benötigte Daten nach Möglichkeit zu erfassen und zu schätzen. Methoden zur quantitativen Analyse und Bewertung sind z.B. Scoring- und Ratingmodelle, multivariate Analysemethoden und Sensitivitätsanalysen (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005).

### *Szenarioanalyse*

Die Entwicklung der Zukunft ist mit Unsicherheit verbunden und es gibt immer mehrere denkbare Entwicklungen, die in der Zukunft eintreten können. Diese Möglichkeitsvielfalt systematisch zu untersuchen, ist der Grundgedanke der Szenarioanalyse (GAUSEMEIER ET AL. 1996). Ziel der Szenarioanalyse ist es, mögliche Entwicklungen der Zukunft zu erarbeiten und zu beschreiben (GAUSEMEIER ET AL. 2018, S. 120, MIETZNER 2009, S. 95). Dabei ist es für die Szenarioanalyse zentral „zukunftsorientiert“ zu denken und sich nicht an den Entwicklungen und Ereignissen der Vergangenheit zu orientieren (REIBNITZ 1992, S. 21). Kreative, explorative Prozesse werden systematisch unterstützt, um relevante Szenarien (auch Zukunftsszenarien) aufzuzeigen und eine verbesserte Arbeitsgrundlage für den Umgang mit Unsicherheiten und die strategische Planung zu schaffen (LIPPOLD & WELTERS 1976, S. 3-7, SCHOLL 2001, S. 213-215). Hierzu werden qualitative Einschätzungen mit Hilfe von quantitativen Methoden systematisch aufbereitet und ausgewertet (SCHOLL 2001, S. 216).

Nach GAUSEMEIER (1996, S. 90) sind Szenarien eine „allgemeinverständliche Beschreibung der Zukunft“, welche zusätzlich zu einem Zustand auch die Entwicklung aus der Gegenwart in diesen Zustand darstellen kann. Sie sind eine Art komplexes Bild einer zukünftigen Situation, welches aus einer Vielzahl von Einflussfaktoren zusammengesetzt ist. Die Szenarien sollten in sich möglichst stimmig, konsistent und widerspruchsfrei sein und gegenüber anderen Szenarien möglichst unterschiedlich sein (GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 280, REIBNITZ 1992, S. 28). Wie in Abbildung 8 schematisch dargestellt, sind die Szenarien das Ergebnis verschiedener Entwicklungspfade in die Zukunft und spannen einen Raum der Möglichkeiten in der Zukunft auf.

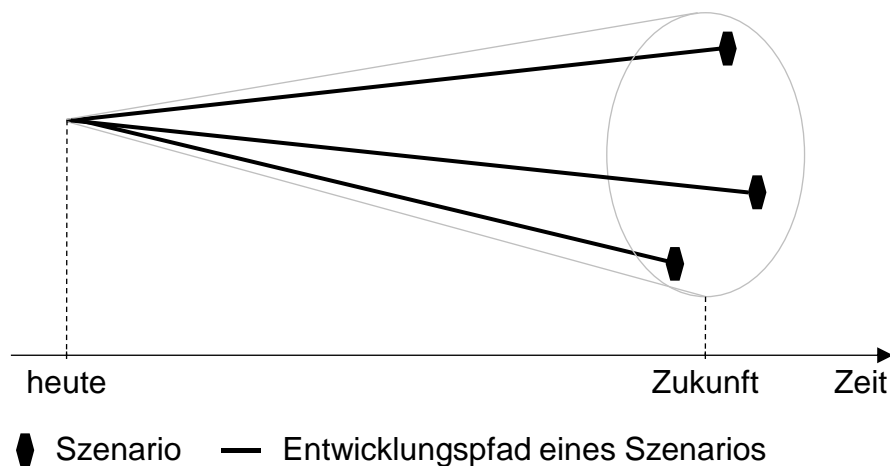


Abbildung 8: Denkmodell zur Darstellung von Zukunftsszenarien (in Anlehnung an MIßLER-BEHR 1993, S. 4)

Für die Erstellung und Beschreibung der Szenarien wird eine Vielzahl von Ansätzen und Vorgehensweisen vorgeschlagen.<sup>3</sup> Die Gegenwart als Ausgangspunkt für Szenarientwicklung haben laut MIETZNER (2009, S. 95-99) alle Ansätze gemeinsam. Zentral ist außerdem die Betrachtung des Gesamtsystems mit seinem Umsystem (MIETZNER 2009, S. 95-99). Hervorzuheben ist, dass hierbei mit Unsicherheit von Prognosen systematisch umgegangen wird im Gegensatz zu vermeintlichen „Beseitigung“ von Unsicherheiten über die Zukunft in anderen Verfahren (SCHOLL 2001, S. 216). Dabei sind die Szenarien nicht auf Prognosen aufgebaut, sondern eher eine Form von Projektionen (GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 90). Die Notwendigkeit der Erarbeitung von hypothetischen und vielfältigen Möglichkeiten ist die Stärke der Szenarioanalyse. Dabei löst sie sich von Entwicklungen und Phänomenen, die in

<sup>3</sup> Für Übersichten zu den unterschiedlichen Schulen der Szenarioanalyse siehe HAMBACH & ALBRECHT 2014, LIPPOLD & WELTERS 1976, S. 5-16 und SCHOLL 2001, S. 216.



der Vergangenheit auftraten, und fordert das Denken „außerhalb“ alltäglicher Denkschemata (REIBNITZ 1992). Die Szenariotechnik ist als Prognoseinstrument besonders geeignet, weil sie eine ganzheitliche Methode zur Identifikation von Risikoursachen ist und den Einbezug der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ermöglicht (MIKUS 2001, S. 20).

Die unterschiedlichen Funktionen von Szenarien im Unternehmensumfeld werden von MIETZNER (2009, S. 114-115) zusammengefasst:

1. Die Explorations- und Analysefunktion ist zentral für den Umgang mit zunehmender Komplexität langfristiger Entscheidungen, für welche sich aufgrund ihrer „Bedeutung und Tragweite“ besonders dann ein hohes Risiko ergibt, wenn nur eine mögliche Zukunft in Betracht gezogen wird.
2. Die Szenarioanalyse dient weiterhin der Informationsgewinnung und Informationsverarbeitung und trägt zur Sensibilisierung gegenüber Entwicklungen bei. Damit kann besonders die Fähigkeit geschärft werden frühzeitig Veränderungen zu erkennen und richtig einzuordnen.
3. Ein weiterer Aspekt betrachtet die Entscheidungsebene und Beobachtung der Veränderungen im Umfeld, aber genauso hat die Szenarioanalyse eine Bedeutung für die Lernprozesse innerhalb der Organisation. So werden die Denkprozesse in Bezug auf alternative Prognosen für die Zukunft und die Denkrichtungen im Unternehmen verändert. Dies ermöglicht einen zusätzlichen Lernprozess innerhalb der Organisation.
4. Die letzte Funktion, die von MIETZNER (2009, S. 114-115) ermittelt wird, ist die Kommunikationsfunktion. Die Analyse kann ein gemeinsames Wissen über zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten generieren und eröffnet damit eine andere Art der Kommunikation über die Zukunft und die Vorbereitung auf diese.

#### *Simulationsmodelle (stochastische Simulation)*

Die Aggregation von mehreren, einzelnen Risiken zu einem Gesamtrisiko unterstützt die Beurteilung und den Vergleich von Risiken von Unternehmen, Unternehmenseinheiten oder Projekten (BREDOW 2012, S. 29). Simuliert wird ein Modell, ein abstrahiertes Abbild der Realität, welches die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen vorgibt

(BREDOW 2012, S. 29). Nach ROMEIKE & HAGER (2020) bieten sich für die quantitative Bewertung mehrerer Risiken stochastische Simulationsverfahren an. Diese sind ein wichtiges Werkzeug für eine Reihe von Analyse- und Bewertungsaufgaben. Mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen können potentielle Verluste quantifiziert werden – dabei wird für die Modellierung von Risiken in der Praxis, aufgrund von begrenzten Daten, oft auf theoretische Verteilungsfunktionen zurückgegriffen (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 102-103). Weiterhin können mit Hilfe von Simulationen gängige Risikomaße, wie der Value at Risk, berechnet werden. Hier bietet die stochastische Simulation, auch bekannt unter dem Namen Monte-Carlo-Simulation, eine sinnvolle Alternative, wenn analytische Methoden für die Lösung zu komplex sind und historische Daten nicht sinnvoll genutzt werden können (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 109). Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass Risiken mit beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen in die Simulation eingeschlossen werden können (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 118). Ferner können verschiedene Verknüpfungen (z.B. multiplikative oder additive) zwischen den Risiken berücksichtigt werden und kann der Kontext zur Unternehmensplanung durch das genutzte Rechenmodell dargestellt werden (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 118). Nachteil des Verfahrens ist der Aufwand, da die benötigten Daten erhoben werden müssen und das Rechenmodell erstellt werden muss (BREDOW 2012, S. 29). Die Simulation entspricht einer Art Zufallsgenerator, der eine sehr große Menge Ziehungen durchführt und jeweils einen Ergebniswert des Modells generiert (MUN 2012, S. 74). Für die Berechnung im Modell werden den risikobehafteten oder unsicheren Eingangswerten Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorgegeben. Das Ergebnis der Simulation ist ein Erwartungswert pro Berechnung – aus der Menge an Ziehungen ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Erwartungswerte (MUN 2012, S. 74).

### *Risk Mode und Effects Analysis*

Die Risk Mode und Effects Analysis (RMEA) ist eine Methode für die frühzeitige Identifikation von Risiken, um Unternehmen bei der Wahrnehmung und Vorbeugung von Krisensituationen zu unterstützen (SCHUH & HEIN 2006). Die Methode wurde von SCHUH & HEIN (2006) entwickelt. Nach den Autoren bildet der Risikokatalog für die zu untersuchende Organisation die Grundlage der RMEA. Die Risiken, die den Unternehmenserfolg am stärksten beeinflussen, werden anhand von drei Kriterien identifiziert: Wahrscheinlichkeit, Transparenz und Auswirkung. Mit dem ersten Kriterium schätzen die Verantwortlichen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikos. Mit dem Kriterium Transparenz wird

bezieht, ob davon ausgegangen werden kann, dass das Risikoereignis in der Organisation bemerkt wird. Das dritte Kriterium zu den Auswirkungen von Risiken zielt darauf ab, die Folgeeffekte in die Analyse einzubeziehen. Die Bewertung der Kriterien erfolgt auf einer Skala von 1 bis 10. Durch Multiplikation der Einschätzungen wird pro Risiko ein Ergebniswert berechnet. Die Priorisierung der Risiken nach der Höhe des Ergebniswertes unterstützt nach SCHUH & HEIN (2006) die Verwendung der zur Verfügung stehenden Ressourcen auf die besonders relevanten Risiken.

### 2.3.2 Risikosteuerung

Risikopolitische Maßnahmen werden entwickelt, um den erkannten Risiken zu begegnen (MIKUS 2001, S. 16). Die Steuerung oder Behandlung von Risiken kann sowohl durch ursachenbezogene als auch wirkungsbezogene Maßnahmen erreicht werden (MIKUS 2001, S. 17). Die wirkungsbezogenen Maßnahmen lassen sich in Risikoübertragung, Risikoteilung und das Selbsttragen des Risikos differenzieren (MIKUS 2001, S. 17-18). Mögliche Maßnahmen zur Risikosteuerung sind vielfältig (MIKUS 2001, S. 16). Eine bedeutende Maßnahme für die ursachenbezogene Risikosteuerung ist es die bekannten Unsicherheiten im Rahmen von Planungen zu berücksichtigen (MIKUS 2001, S. 16-17). Mögliche risikopolitische Maßnahmen sollten bewertet werden, um eine Auswahl zur ermöglichen (MIKUS 2001, S. 13-19). Hierbei gilt es die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß zu verringern, um so die Risikolage des Industrieunternehmens positiv zu verändern. Weiterhin ist eine Optimierung im Umgang mit Risiken zu erreichen, um den Unternehmenswert zu steigern (ROMEIKE 2018, S. 45).

Die Risikosteuerung lässt sich in Maßnahmengruppen unterteilen: die Vermeidung, die Reduktion und Begrenzung, den Selbstbehalt und das Tragen, die Überwälzung und das Teilen des Risikos. Eine Kombination von Maßnahmen aus diesen Bereichen ist für die Risikosteuerung sinnvoll (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 279). Die Vermeidung von Risiken, also der Ausschluss eines Risikos, kann z.B. durch eine Entscheidung gegen eine Produktart oder bestimmte Geschäfte mit einer bestimmten Region in der Welt erfolgen. Dieser Schritt geht damit oft mit dem Verzicht auf eine Chance einher (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 283). Die Reduktion und Begrenzung von Risiken bezieht sich auf die Veränderung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen mit dem Ziel den Schaden eines Risi-

kos oder auch die Häufigkeit des Auftretens positiv zu verändern. Ein Beispiel sind zusätzliche Qualitätskontrollen innerhalb von Produktionsprozessen (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 283-293). Der Selbstbehalt von Risiken ähnelt deren Akzeptanz. Dies bedeutet aus ökonomischer Perspektive, dass z.B. Rückstellungen vorgenommen werden (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 279). Die Verlagerung von Risiken entspricht in der Praxis in den meisten Fällen einer Versicherung, z.B. einer Betriebshaftpflichtversicherung. Die Teilung und Diversifikation von Risiken (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 279) wird in der Praxis z.B. durch die Auslagerung von Prozessen in eigene Gesellschaften oder zu Partnerunternehmen erreicht.

## 2.4 Stress und Stresstests

### 2.4.1 Verwendung und Verbreitung des Begriffes Stress

Das Thema Stress wird in der wissenschaftlichen Literatur seit mindestens sechzig Jahren facettenreich diskutiert und findet Anwendungen in Disziplinen wie

- der Medizin,
- den Ingenieurwissenschaften und
- der Ökonomie.

Einige Quellen postulieren, dass der Begriff des Stresses bis in die 1940er Jahre fast ausschließlich in den Ingenieurwissenschaften bekannt war (CASSIDY 2001, HAWARD 1960).

CONTRADA & BAUM (2011) fassen zusammen, dass in den Verhaltens-, Sozial- und Biowissenschaften einzelne Wissenschaftler vorschlugen, dass der Gebrauch des Wortes Stress eher als generelle Rubrik für eine Vielzahl miteinander verknüpfter Bereiche gelten sollte und dass es nicht möglich ist, eine spezifische Definition zu geben. Auf der anderen Seite werden an vielen Stellen in der Literatur und Wissenschaft sehr spezifische, für einen Anwendungsfall konstruierte Definitionen genutzt und weiterentwickelt.

Für einen größeren Betrachtungsrahmen, der auch die Ingenieurwissenschaften inklusive der Informatik und die Ökonomie miteinbezieht, lässt sich die Ansicht, dass das Thema Stress eine generelle Rubrik für eine Vielzahl an wissenschaftlichen Anwendungen umfasst,

verallgemeinern (CONTRADA 2011). Es können diverse Veröffentlichungen gefunden werden, die eine Position zwischen einer ganz allgemeinen und einer sehr spezifischen Betrachtung einnehmen (BALKE 2014, COHEN ET AL. 1997, CONTRADA 2011, DUDENREDAKTION O.J.C, LAZARUS & FOLKMAN 2015, SEEL 2012, SELYE 1955). Im Folgenden wird ein Überblick über allgemeingültige und anerkannte Definitionen sowie dazugehörige Erklärungsmodelle gegeben. Darauf aufbauend werden die gemeinsamen Elemente in den einzelnen Disziplinen herausgearbeitet.

*Stress: Eine Begriffseinordnung basierend auf den Verhaltens-, Sozial- und Biowissenschaften*

Um 1930 entwickelten Forscher das Konzept von Stress beim Menschen. SELYE (1936) führt die Unterscheidung zwischen Stress und den Stressoren, die von außen auf ein Individuum einwirken, ein (SELYE 1955). Dabei beschreibt er Stress als eine eintretende, unspezifische Reaktion auf Anforderungen, die von außen auf den Körper einwirken. Diese Reaktionen können beim Menschen z.B. Veränderungen im Herzschlag, Schlafstörungen etc. sein. Die Stressoren sind angenehme oder unangenehme Anforderungen, denen das Individuum ausgesetzt ist. Generell wurde die Reaktion auf alle Arten von Stressoren in drei Stufen beschrieben, die Alarm-Reaktions-Stufe (1), die Resistenz-Stufe (2) und die Erschöpfung-Stufe (3). (RYSER & MARTIN 2009, SEEL 2012, SELYE 1936, 1950, 1955)

Basierend auf diesem Konzept wurden die ersten Stressforschungen am Menschen begonnen und das Konzept wurde in einer Vielzahl von Schritten weiterentwickelt und verändert. LAZARUS & FOLKMAN (2015) haben in ihren Forschungen im Bereich Stimulus-Organismus-Response Stress wie folgt definiert: „a particular relationship between the person and the environment that is appraised by the person as taxing or exceeding his or her resources and endangering his or her wellbeing.“ SEEL (2012, S. 3203) fasst zusammen, dass diese weitestgehend akzeptierte Definition eine Situation dann als Stress beschreibt, wenn ein Individuum in dieser sein eigenes Wohlergehen gefährdet sieht.

Eine neuere Beschreibung von COHEN ET AL. (1997, S. 3) fasst Stress zusammen als „[...] a process in which environmental demands tax or exceed the adaptive capacity of an organism, resulting in psychological and biological changes that may place persons at risk for disease“.

Diese Definition enthält vier Kernelemente, auf die sich die Wissenschaft laut CONTRADA (2011) weitestgehend geeinigt hat.

1. Es werden die Umwelt, die auf ein Individuum wirkt, sowie die Psychologie und die Biologie in die Betrachtung miteinbezogen.
2. Stress wird als Prozess betrachtet und nicht als eine einzelne Reaktion verstanden.
3. Es besteht/entsteht ein Ungleichgewicht zwischen den einwirkenden Anforderungen der Umwelt und der Fähigkeit sich diesen anzupassen.
4. Die Auswirkung auf die Gefährdung der Gesundheit des Individuums wird betrachtet.

### *Stressmodelle*

Zur Untersuchung und Beschreibung von Stressreaktionen und Stressoren am Arbeitsplatz werden in der Psychologie und den Arbeitswissenschaften unterschiedliche Modelle zur Hilfe genommen. Zwei schematische Modelle für die Beschreibung von Stress oder Belastung beim Menschen sind das Transaktionale Stressmodell und das Belastung-Beanspruchungs-Konzept.

### **Transaktionales Stressmodell**

Das Transaktionale Stressmodell von LAZARUS beschreibt den Prozess, den ein Individuum bei der Einwirkung seiner Umwelt durchläuft (LAZARUS 1966). Dabei führt er zwei Elemente ein: die kognitive Bewertung (engl.: appraisal) und die Bewältigung (engl.: coping) (CONTRADA 2011, S. 2). Abhängig von dem Durchlaufen der verschiedenen Phasen der Bewertung empfindet der Mensch die Einwirkung von außen als stressig, und abhängig von dieser Bewertung muss eine Form der Bewältigung begonnen werden. Aufgrund der wechselseitigen Beziehung oder Wechselwirkung zwischen der Außenwelt, den Stressoren und der Bewältigung des Individuums wird das Modell als transaktional bezeichnet. Die kognitive Bewertung unterteilt sich in zwei Phasen: In der ersten Phase wird bewertet, was in der jeweiligen Situation „auf dem Spiel steht“ und in der zweiten Phase werden die eigenen Fähigkeiten zu dessen Bewältigung bewertet. In Abhängigkeit vom Ergebnis dieses Prozesses wird die Situation vom Individuum mehr oder weniger als Stress empfunden. Daraufhin findet die Bewältigung der Situation statt – hierbei unterscheiden LAZARUS & FOLKMAN

(2015) problemorientierte und emotionale Strategien der Auseinandersetzung. Abschließend erfolgt eine Neubewertung der Situation bzw. die Wahrnehmung der Situation ändert sich (LAZARUS 1966, LAZARUS & FOLKMAN 2015).

### **Belastungs-Beanspruchungs-Konzept**

Das Belastungs- und Beanspruchungskonzept nimmt als vereinfachtes Modell eine zentrale Rolle in der Ergonomie oder Arbeitswissenschaft ein (BUBB ET AL. 2015, S. 18, RICHTER & HACKER 1998, ULICH 2005). Nach SCHLICK ET AL. (2018, S. 24-26) ist das Belastungs- und Beanspruchungskonzept ein theoretischer Ansatz zur Beschreibung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen im Umfeld von menschlicher Arbeit. Der Einsatz des Modells in der Ergonomie dient der Erforschung und Erklärung von Tätigkeitsbedingungen. Das Modell von ROHMERT (1984) ist eine direkte Ableitung aus der technischen Mechanik, wobei die Belastung die von außen einwirkenden Kräfte auf ein Bauteil und die Beanspruchung die daraus resultierenden Spannungen (engl.: Stress) im Bauteil beschreibt. Für den Menschen werden dabei die Belastungen als Merkmale einer Situation verstanden, z.B. werden eine Arbeitsaufgabe, eine bestimmte chemische, physikalische, organisatorische oder soziale Einwirkung der Umgebung und die Beanspruchungen als Reaktionen des Menschen auf die Situation summiert. Das Modell zeigt also auf, dass eine bestimmte Belastung nicht für jeden Menschen in der gleichen Beanspruchung mündet, sondern die Beanspruchung von den Eigenschaften, Fähigkeiten und Bedürfnissen des Individuums abhängt. (ROHMERT 1984, SCHLICK ET AL. 2018, S. 24-26)

### *Stress in der Festigkeitslehre*

In der Festigkeitslehre wird die Tragfähigkeit belasteter Bauteile untersucht (BALKE 2014, S. 1). Zur Beschreibung der Beanspruchung von Körpern unter Krafteinwirkung werden die Größen Spannung (engl.: stress)<sup>4</sup> und Verzerrung (engl.: strain) eingeführt (KESSEL & FRÖHLING 2012). Die Spannung ist eine statische Größe, die mit Hilfe von Gleichgewichtsbedingungen zu bilanzieren ist, dabei ist sie „frei von Körperabmessungen und [darf] gewisse materialspezifische Grenzwerte nicht überschreiten“ (BALKE 2014, S. 1). Mit Span-

---

<sup>4</sup> Der Begriff Stress (engl.) wird in der Mechanik im Deutschen mit Spannung übersetzt – der Begriff Stress (deutsch) wird in diesem Zusammenhang nicht benutzt. Im folgenden Abschnitt wird der Begriff Spannung entsprechend der deutschen Literatur verwendet.

nung wird die Flächenkraftdichte, die durch innere Kraftwechselwirkungen in einem Körper entsteht, beschrieben. Folglich ist die Spannung die Beschreibung der in einem Körper wirkenden Kräfte im Fall einer von außen einwirkenden Kraft.

### **Das Hooke'sche Gesetz**

Zur Erforschung und Beschreibung des realen Verhaltens von Werkstoffen unter Spannung wird in der Technischen Mechanik experimentell geforscht. Genauso wie der Begriff Stress hat auch der Stresstest seine Wurzeln in den Ingenieurwissenschaften (BORIO ET AL. 2011, S. 3), unter anderem in Form von Belastungsexperimenten von Werkstoffen. Ein grundlegendes Modell zur Beschreibung von Verformungen unter Spannung hat der britische Physiker Robert Hook im 17. Jahrhundert postuliert.

Das Hooke'sche Gesetz beschreibt für den Sonderfall des einachsigen Spannungszustandes die Dehnung, die in die Richtung der Spannung verläuft und mit dem Quotienten aus der Spannung und dem Elastizitätsmodul  $E$  beschrieben wird. Dabei ist das Elastizitätsmodul  $E$  eine materialspezifische Proportionalitätskonstante. Das Hooke'sche Gesetz für Federsysteme ist die bekannteste Anwendung des Gesetzes. (BALKE 2014, DOWLING ET AL. 2013, HOSFORD 2005, KESSEL & FRÖHLING 2012, WITTENBURG ET AL. 2014)

#### **2.4.2 Stresstests in der Finanzindustrie**

In diesem Kapitel wird speziell auf das Konzept und die Ausgestaltung der Tests in der Finanzindustrie eingegangen. Der Stresstest in der Finanzindustrie ist heute ein gängiges Werkzeug und Teil des Risikomanagements. Er wird seit den 1990er Jahren in der Finanzindustrie angewendet (ANDERSON ET AL. 2018, S. 8, BLASCHKE ET AL. 2001, S. 6, SCHURIG 2016, S. 33), dabei haben Stresstests in den letzten zehn Jahren, insbesondere durch den Satz Kapitalvorschriften genannt Basel II und durch die Finanzkrise 2007-2009, an Bedeutung gewonnen (ANDERSON 2016, S. 1, BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION 2009, S. 2, FREMDT & VÖLZ 2010, S. 3). Das Ziel eines Stresstests besteht darin, „die Auswirkungen von starken Marktveränderungen auf ein Portfolio zu untersuchen“ (FREMDT & VÖLZ 2010, S. 5). DENT ET AL. (2016, S. 131) fassen zusammen, dass Stresstests entwickelt wurden, um die Resilienz von Banken gegenüber schweren, aber plausiblen Schocks zu testen. Auch in den Arbeitspapieren des Internationalen Währungsfonds werden die Ziele für Stresstests in Finanzinstitutionen ähnlich wiedergegeben (ANDERSON ET



AL. 2018, S. 7, BLASCHKE ET AL. 2001, S. 4). Die Bandbreite der zu untersuchenden Institutionen (Größe, Komplexität, Portfolioart etc.) führt dazu, dass Stresstests sehr unterschiedlich ausgestaltet werden. So summiert sich eine Reihe von Leitlinien, Vorgehensweisen und Werkzeugen zur Durchführung von Stresstests (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010, S. 10). Eine Einordnung für diese Arbeit erfolgt anhand der sieben Dimensionen, die in Abbildung 9 aufgelistet sind.

Kategorien	Ausprägung			
	Auftraggeber	Intern		Extern
Betrachtungsbereich	Mikrostresstest		Makrostresstest	
Analyserichtung	Top-down		Bottom-up	
Risikomodell	Portfolio	Bilanzaktiva	Liquidität	...
Belastungsart	Einzelner Faktor	Szenario		...
Belastungsszenario	Historisches Szenario		Hypothetisches Szenario	
Analyselogik	Regulärer Stresstest		Reverse-Stresstest	


 Fokus der Arbeit

Abbildung 9: Dimensionen des Stresstests in der Finanzindustrie (in Anlehnung an GREBNER (2015, S. 33) und BLASCHKE ET AL. (2001, S. 5))

In dieser Arbeit werden intern in Auftrag gegebene Stresstests weiter betrachtet, damit werden Stresstestungen, welche von außen, z.B. von Regierungsinstitutionen, in Auftrag gegeben werden, nicht weiter behandelt. Bei der Anwendung von Stresstests wird in der Literatur zwischen Mikro- und Makrostresstests unterschieden, wobei es bei Mikrostresstests um einzelne Institutionen oder Produkte und bei Makrostresstests um Märkte geht (BORIO ET AL. 2011, S. 1-2, GREBNER 2015, S. 31). Für die Übertragung auf produzierende Unternehmen werden Mikrostresstests detaillierter betrachtet – das heißt, es geht um Stresstests, die vom Unternehmen motiviert für das eigene Unternehmen durchgeführt werden, weniger um branchenweite Aktivitäten. Wie auch in anderen Analysen kann hier top-down oder bottom-up vorgegangen werden. Stresstests in der Finanzindustrie werden weiterhin nach ihrem Risikomodell oder Zielwert unterschieden, diese können von Portfolioanalysen bis zur Analyse der Bilanzaktiva oder der Liquidität reichen. Auf die Risikomodelle, die sich aus diesen Finanzkennzahlen ergeben, wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da sich hier Finanzinstitutionen ganz grundlegend von Produktionssystemen unterscheiden. Auf Produktionssysteme lassen sich daher die Risikomodelle nicht

sinnvoll übertragen und werden im Rahmen dieser Arbeit mit Risikobetrachtungen für industrielle Unternehmen ersetzt. In der Literatur werden verschiedene Belastungsarten genannt, z.B. die Belastung einzelner Faktoren, die Belastung in Form von Szenarien oder auch Maximalwerten oder Worst-Case-Untersuchungen und ähnliche. In dieser Arbeit wird die Belastung mit Hilfe von Szenarien fokussiert. Für die Szenarien wird in der Literatur zwischen historischen und hypothetischen Szenarien unterschieden. Weiterhin wird zwischen regulären Stresstests und ihrer Erweiterung durch Reverse-Stresstests differenziert. Die Analyselogik der Reverse-Stresstests ist dabei sehr speziell für die Finanzbranche und wird nicht weiter vertieft.

## 2.5 Fazit

Für die Übertragung des Stressbegriffes müssen die vorgestellten Facetten berücksichtigt werden. Verallgemeinert geht es um die Frage der Stabilität/Resilienz oder Robustheit einer Entität oder eines Individuums (BORIO ET AL. 2011, S. 3). Zusammenfassend lassen sich die folgenden zentralen Punkte für das Verständnis des Stressbegriffes für diese Arbeit festhalten:

- Stress ist ein Prozess und nicht ein einzelner Zustand
- Stress entsteht durch eine Einwirkung von außen (z.B. von Stressoren oder physischen Kräften)
- Stress löst einen Prozess / eine Veränderung aus (z.B. eine Beurteilung, Wertung oder Dehnung)
- Die Auswirkung des Stresses hängt von den Fähigkeiten/Eigenschaften des betrachteten Systems ab

Die Modelle zur Beschreibung von Stress sind in den betrachteten Disziplinen sehr unterschiedlich. Mit Hilfe der Modelle werden die folgenden Punkte erforscht:

- die Art und Beschaffenheit der Einwirkungen von außen
- der Prozess, der innerhalb des Systems abläuft
- die Grenzen, innerhalb derer die Prozesse zum Umgang mit Stress funktionieren oder allgemeingültig beschreibbar sind

- die Auswirkungen für das System und Wechselwirkungen mit der Umwelt innerhalb des Prozesses

Basierend auf den Dimensionen von Stresstests in der Finanzindustrie werden unternehmensspezifische Stresstests, welche intern im Unternehmen motiviert sind, fokussiert. Dabei werden Stresstests, welche mit Hilfe von Szenarien arbeiten, näher beleuchtet. Das Vorgehen der Analyse, die zu betrachtenden Risiken und die Art der Szenarien werden im Rahmen der Abhandlung genauer untersucht, auf Produktionssysteme übertragen und detailliert ausgestaltet.



## 3 Stand des Wissens

In diesem Kapitel wird der Stand des Wissens für die Erarbeitung eines methodischen Vorgehens für den Stresstest für Produktionssysteme beschrieben. Im ersten Teil wird der Stand des Wissens in der Finanzindustrie erläutert. Im zweiten Teil wird ein Überblick zum Stand des Wissens für industrielle und produzierende Unternehmen gegeben.

### 3.1 Stresstests in der Finanzindustrie

Der Stand des Wissens für die Finanzindustrie kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden: die Literatur zu offiziellen Vorgaben und Rahmenkonzepten von übergeordneten Finanzinstitutionen und allgemeine wissenschaftliche Literatur zu Stresstests und ihren Anwendungen. Im folgenden Kapitel wird der offizielle, institutionelle Stand der Erkenntnisse für die Anwendungen in dieser Arbeit diskutiert. Darauf folgend wird auf den sonstigen Stand des Wissens eingegangen.

#### 3.1.1 Institutionelle Vorgaben und Rahmenkonzept

Zwei offizielle Institutionen der Finanzindustrie, der Basler Ausschuss für Bankenaufsicht<sup>5</sup> und die Europäische Bankenaufsichtsbehörde<sup>6</sup>, haben Richtlinien und Prinzipien für die Durchführung und Einbindung von Stresstests veröffentlicht.

Der Basler Ausschuss für Bankenaufsicht hat nach der Finanzkrise im Jahr 2009 Guidelines herausgegeben, welche bindende Standards für die erfolgreiche Durchführung von Stresstests in Finanzinstitutionen liefern sollen. Die Guidelines umfassen 21 Prinzipien, welche in vier Teilgebiete unterteilt werden können. Die Prinzipien 1-6 sollen die erfolgreiche, integrale Einbindung von Stresstests in die Prozesse von Banken sicherstellen. Hier werden

---

<sup>5</sup> Der Basler Ausschuss für Bankenaufsicht (BCBS) wurde 1974 von den Zentralbanken und Aufsichtsbehörden der G10-Staaten gegründet und erarbeitet Empfehlungen für diese (BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION 2018).

<sup>6</sup> Die Europäische Bankenaufsichtsbehörde (EBA) ist eine unabhängige EU-Behörde, deren Aufgabe es ist im europäischen Bankensektor die Regulierung und Beaufsichtigung zu übernehmen (THE EUROPEAN BANKING AUTHORITY 2016).

die Verantwortung des Managements und die Verbindung mit anderen Risikowerkzeugen vorgegeben. Die Prinzipien 7-10 umfassen die methodischen Aspekte der Durchführung und geben vor, wie die Szenarienbildung erfolgen soll. Die Prinzipien 11-15 legen die Aufmerksamkeit auf die Risikoverminderung sowie komplexe und strukturierte Produkte (BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION 2009, FREMDT & VÖLZ 2010, 8ff). Die „Vorgaben für die Aufsichtsinstanzen“ zur institutsübergeordneten Überprüfung, um gegebenenfalls bankenaufsichtliche Maßnahmen abzuleiten, werden in den Prinzipien 16-21 behandelt (BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION 2009, FREMDT & VÖLZ 2010, 8ff). Im Kontext dieser Arbeit werden in diesem Absatz die Prinzipien, die sich auf die methodischen Aspekte und die Bildung von Szenarien beziehen, eingehender vorgestellt.

Der Basler Ausschuss für Bankenaufsicht beschreibt kein detailliertes methodisches Vorgehen, macht aber für alle Stresstestanwendungen unabhängig von der Art der Bank, dem Produktportfolio oder der Größe klare Vorgaben, welche Aspekte zu beachten sind. Dabei soll der Stresstest nach FREMDT & VÖLZ (2010, S. 8-11) darauf abzielen, dass „Risikokonzentrationen“ identifiziert werden, also Produkte/Organisationseinheiten oder Konstellationen, die mehr Risiken bergen als andere. Für die zu betrachtenden Objekte wird vorgegeben, dass die Risikoeinschätzung sowohl in Bezug auf die gesamte Institution als auch für einzelne Produkte oder Organisationseinheiten durchzuführen ist. Dabei sollen verschiedene hypothetische Szenarien durchdacht und verschiedene Zeithorizonte einbezogen werden. Wichtig für das methodische Vorgehen ist, die Risiken inklusive ihrer wechselseitigen Abhängigkeiten zu betrachten. Der Stresstest sollte, wenn möglich, die Entwicklung mehrerer Zielgrößen einbeziehen (z.B. Liquiditätslücken und risikogewichtete Aktiva). Weiterhin sollen während des Tests Experten ihre Einschätzungen einbringen. Zu berücksichtigen sind darüber hinaus „systemische Effekte“, die auftreten können. Als zusätzliches Werkzeug werden Reverse-Stresstests hervorgehoben (BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION 2009, FREMDT & VÖLZ 2010, 8-11).

Der Ausschuss der Europäischen Aufsichtsbehörden für das Bankwesen<sup>7</sup> stellt in seinen Richtlinien für Stresstests ein Rahmenkonzept für deren Durchführung vor (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010). Die Richtlinien werden mit einem Rahmenkonzept

---

<sup>7</sup> Aus dem Ausschuss der Europäischen Aufsichtsbehörden für das Bankwesen (CEBS) ist im Jahr 2011 die Europäische Bankenaufsichtsbehörde (EBA) entstanden.

ergänzt, welches schematisch die wichtigsten Bausteine (Elemente) für Stresstests im europäischen Bankenraum veranschaulicht (FREMDT & VÖLZ 2010, S. 11). In Abbildung 10 ist das Rahmenkonzept visualisiert.

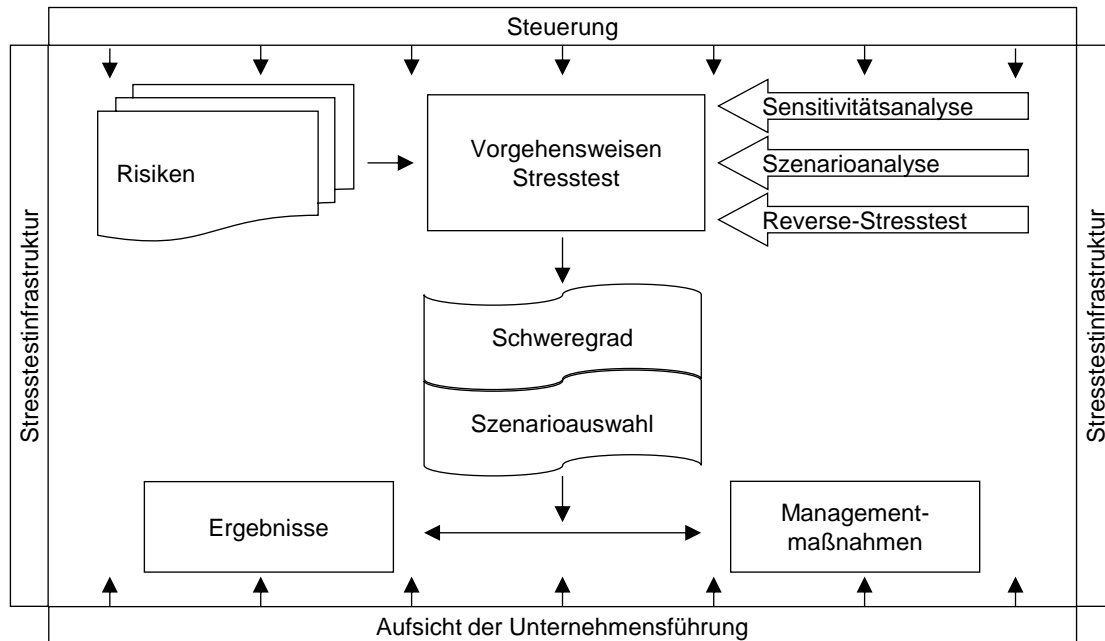


Abbildung 10: Bausteinansatz für die Stresstestrichtlinien (FREMDT & VÖLZ 2010, S. 12)

Die Bausteine unterteilen sich in den Rahmen für den Stresstest, die Eingangsbausteine, die zentralen Elemente des Tests und die Ergebnisse. Die drei Bausteine des Rahmens sind die Steuerung des Stresstests, die dazugehörige Infrastruktur und die Aufsicht durch die Unternehmensführung. Stresstests sollen integraler Bestandteil des Risikomanagements werden. Dabei wird durch die Steuerung der Stresstests sichergestellt, dass diese prozessfähig sind, alle Entscheidungsträger angemessen informiert, die Verantwortlichkeiten eindeutig verteilt, Ressourcen zugewiesen und das Vorgehen sowie die Vorschriften zum Vorgehen festgehalten werden. Auch eine regelmäßige Überprüfung der Effektivität und Eignung des Stresstestvorgehens ist vorgesehen. Durch die passende Infrastruktur soll der Stresstest mit Hilfe von Datenquellen und IT-Systemen unterstützt werden. Weiterhin soll durch die Einbettung in eine geeignete Infrastruktur die Wiederholung des Tests in einem angemessenen Rhythmus ermöglicht werden. Die Aufsicht des Stresstests unterliegt der Unternehmensführung, dabei sollten die Auswirkungen des Stresstests und die übergeordnete Risikosituation des Unternehmens überwacht werden (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010, S. 7-11).

Die Risiken stellen den Eingangswert für Stresstests dar – hierbei sollen verschiedene, relevante Arten von materiellen Risiken einbezogen werden. Die Finanzinstitutionen sollen ihre Portfolios auf deren spezifische Risiken hin untersuchen und dabei Korrelationen zwischen den Risiken einbeziehen. Die Risiken, die im Stresstest überprüft werden, sind z.B. Kreditrisiken, Marktrisiken, operationale Risiken und Liquiditätsrisiken. Das Ziel soll dabei sein Risikokonzentrationen zu identifizieren (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010, S. 20-21). Die Auswahl der richtigen Stresstestmethodik ist der zweite Eingangswert für den Stresstest. Hierbei soll aus der möglichen Methodik – Sensitivitätsanalyse, Szenarioanalyse und Reverse-Stresstest – die für den Anwendungsfall und Institution geeignete Methodik oder eine Kombination aus eben diesen identifiziert werden. Hervorgehoben wird hierbei besonders die Nutzung von hypothetischen, zukunftsorientierten Szenarien (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010, S. 11-12).

Die Übertragung der Szenarien soll mit angemessenen und aussagekräftigen Mechanismen auf die relevanten internen Risikoparameter erfolgen, die das Risiko firmenweit darstellen können. Übergeordnete Interaktionen und Rückkopplungseffekte sollen mit Hilfe der Szenarien abgebildet werden (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010, S. 21).

Die zentralen Bausteine des Stresstests sind das methodische Vorgehen des Tests selbst, die Analyse der Auswirkung der „Schwere“ eines Szenarios und die Szenarioauswahl. Die Ergebnisse und die abgeleiteten Managementmaßnahmen sind die Ausgangsbausteine des Stresstests. Der Schweregrad der auszuwählenden Szenarios wird auf Basis plausibler, aber besonderer Ereignisse bestimmt. Dabei sollen Stresstestdurchgänge ausgewählt werden, die eine Bandbreite von Schweregraden und gravierende ökonomische Veränderungen abbilden (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010, S. 18-19). Die Ergebnisse des Stresstests sollen in Bezug auf die Regulierungsfähigkeit, Ressourcen sowie relevante Gewinne und Verluste erarbeitet werden. Weiterhin sollen realistische Hebel für das Management definiert werden, die die Liquidität der Finanzinstitution durch die Szenarios hindurch sicherstellen (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010, S. 23-24). Die Aufsicht der Unternehmensführung hat die Aufgabe den Stresstest mit der Szenarioauswahl, den gewählten Methoden, der genutzten Infrastruktur und seiner Anwendung zu überprüfen. Die Aufsicht soll und kann den Institutionen spezifische Szenarios vorschlagen (COMMITTEE OF EUROPEAN BANKING SUPERVISORS 2010, S. 25-30).



### 3.1.2 Kernelemente für den Stresstest in der Finanzindustrie

Eine detaillierte Recherche zur Literatur zu Stresstests in der Finanzindustrie wird im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgestellt. Die Literatur ist sehr divers und eine fachfremde Diskussion der Forschungen erscheint nicht zielführend für den Gewinn von zusätzlichen Erkenntnissen. Für den vorliegenden Beitrag ist vor allem der Stand des Wissens zum systematischen Vorgehen in Stresstests relevant. Hierzu wurde von GREBNER im Jahr 2015 eine Literaturübersicht erarbeitet. Diese wird im Anhang A präsentiert. Basierend auf diesen Ausführungen von GREBNER (2015, S. 36) werden im Rahmen dieser Abhandlung die vier Kernelemente von Stresstestvorgehen nach BORIO ET AL. (2011, S. 3) vorgestellt:

1. Identifizieren der Risikopotentiale (Elemente des Systems, die durch Stress eine Beeinflussung erfahren)
2. Festlegen von Szenarien, die zu Stress/Shocks in den Risikopotentialen führen
3. Entwickeln eines Modells, das die Auswirkungen oder den Einfluss der Szenarien untersucht und der Aufdeckung von Wirkungszusammenhängen dient
4. Messung der Auswirkung (Veränderung in den Risikopotentialen)

### 3.2 Stand des Wissens für die produzierende Industrie

Als Basis zur Erarbeitung des Stresstests für Produktionssysteme werden in diesem Kapitel bestehende Ansätze für Produktionssysteme erfasst. Hierzu werden die bestehenden Studien zur Nutzung von Stresstests für die Wirtschaftsgüterindustrie vorgestellt. Anschließend wird auf Ansätze eingegangen, die Methoden des Risikomanagements für die Planung und Bewertung von Produktionssystemen nutzen, hierbei werden die Ansätze herausgegriffen, welche die für den Stresstest vorgesehenen Methoden der Szenarioanalyse oder Sensitivitätsanalyse nutzen. Dazu wird der aktuelle Stand des Wissens vorgestellt, in Form von Untersuchungen, welche externe Risiken und Unsicherheiten berücksichtigen und eine Aggregation dieser Faktoren anwenden. Für die neuesten Forschungen zum automatisierten und datenbasierten Risikomanagement wird auf die Ausführungen von MUELLER ET AL. (2019) verwiesen.

### 3.2.1 Stresstestanwendungen für produzierende Unternehmen und Produktionsnetzwerke

Den Stresstest als Management- oder Controllinginstrument für produzierende Unternehmen einzusetzen, wurde in zwei Arbeiten erforscht. Die Beiträge von GREBNER (2015) und SCHURIG (2016) sind ungefähr zur gleichen Zeit entstanden und nehmen keinen Bezug aufeinander. Sie unterscheiden sich grundlegend sowohl in ihrer Forschungsmethodik als auch in den gewonnenen Erkenntnissen. Darüber hinaus wird die Arbeit von KÖNIG (2008) zum Management betrieblicher Risiken bei produzierenden Unternehmen vorgestellt, da hier Werkzeuge des Risikomanagements in einer Weise aufgegriffen werden, dass die Empfehlungen aus der Arbeit einem Stresstest ähneln.

GREBNER (2015) hat sich mit der Vorgehensweise und dem Einsatz von Methoden für den Stresstest in produzierenden Unternehmen auseinandergesetzt. In seiner Studie werden Einflussgrößen zur Ausgestaltung des Stresstests aus der Forschungsliteratur erarbeitet. Anschließend ermittelt GREBNER anhand von zehn Fallstudien die Ausprägungen dieser Einflussgrößen. Er überträgt ein verallgemeinertes Vorgehen aus der Finanzbranche auf produzierende Unternehmen. Der Stresstest umfasst drei Durchführungsphasen: die Situationsanalyse, die Entwicklung von Belastungsszenarien und die Auswirkungsanalyse. Hierbei unterteilt sich die Situationsanalyse in die Organisation der Situationsanalyse, die Umfeldanalyse und die Unternehmensanalyse. Die Entwicklung der Belastungsszenarien wird in vier Teilschritte untergliedert: die Organisation der Entwicklung der Belastungsszenarien, die Festlegung der Beobachtungsbereiche der Belastungsszenarien, die Methodenauswahl zur Prognose der Belastungsszenarien und das Verfahren zur Szenariobildung. Die letzte Durchführungsphase die Auswirkungsanalyse setzt sich aus drei Teilschritten zusammen: der Organisation der Auswirkungsanalyse, der Methodenauswahl zur Auswirkungsanalyse und den Kenngrößen zur Auswirkungsanalyse. Bei der Durchführung des Stresstests wird in die Komplexität der Leistungserstellung, die Komplexität des Unternehmensumfeldes und die Kritikalität der Stresstestdurchführung unterschieden. Den Unternehmen wird als Ergebnis eine Reihe von möglichen Werkzeugen in Abhängigkeit von den zuvor genannten drei Dimensionen an die Hand gegeben. GREBNER (2015) legt mit seiner Forschungsarbeit die Grundlage für die Übertragung des Vorgehens für einen Stresstest in produzierenden Unternehmen. Hierbei erarbeitet der Autor den Stresstest als Managementinstrument für ein gesamtes Unternehmen und liefert eine Sammlung verschiedener

Werkzeuge für die Ausgestaltung des Stresstests, ohne jedoch dabei auf konkrete Teilsysteme oder die Produktion einzugehen. Für die Umfeldentwicklungen und -einflüsse beschränkt GREBNER (2015) die Untersuchung auf das politisch-rechtliche und ökonomische Umfeld. Der Autor schließt Veränderungen im soziokulturellen und technologischen Umfeld für die Betrachtung im Stresstest aus (GREBNER 2015, S. 176). Die Faktoren des globalen Umfeldes, die im Rahmen der Fallstudien betrachtet werden, werden in drei Kategorien – die wirtschaftliche Entwicklung, die Gesetzgebung und Regulierung – sowie in Länderrisiken mit 20 Unterfaktoren unterteilt. Das unternehmensexterne Umfeld wird in drei Bereiche – das Beschaffungsumfeld, das Wettbewerbsumfeld und das Absatzmarktumfeld – mit sieben Unterfaktoren gegliedert. Die Belastungsszenarien können laut GREBNER (2015) mit Hilfe von quantitativen Verfahren und qualitativen Verfahren sowie anhand von Szenarioanalysen durchgeführt werden. Für die Bestimmung von Auswirkungen der Belastungsszenarien zeigt der Autor Kenngrößen auf, die sich auf die Bereiche Absatz, Produktion und Beschaffung aufteilen (siehe Tabelle 2). Für den Stresstest selbst zeigt der Autor eine Reihe von Werkzeugen, wie Expertenworkshops, Scoring-Modelle, Sensitivitätsmodelle, System Dynamics und Business Cases, auf. Die Forschungsarbeit enthält keine weiteren Details dazu, wie die Methoden für den Stresstest angewendet werden sollen. Als Zielgröße für die Aggregation von Risiken schlägt der Autor zwei Kennzahlen vor: den Cash-flow at Risk und die Earnings at Risk.

Tabelle 2: Unternehmenskenngrößen zur Auswirkungsanalyse (in Anlehnung an GREBNER 2015, S. 190-195)

Faktoren für die Auswirkungsanalyse		
Absatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auftragseingänge und Umsatzentwicklung</li> <li>• Kundenstrukturveränderungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auftragsbestand</li> <li>• Lieferfähigkeit</li> </ul>
Produktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchlaufzeit</li> <li>• Kapazitätsauslastung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktivität</li> <li>• Non Conformance Costs</li> </ul>
Beschaffung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialkosten</li> <li>• Lieferzuverlässigkeit und beschaffenheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lieferantenstruktur</li> </ul>

SCHURIG (2016) wendet den Stresstest für die Bewertung der Agilität von unterschiedlichen Gestaltungen für Produktionsnetzwerken an. Er leitet aus dem Agilitätsbegriff vier Messwerte für Marktveränderungen ab: Kapazitätsflexibilität (relativ), Anpassungsgeschwindigkeit, Profitabilität und Pro-Aktivität. Die Arbeit zeigt eine systematische Vorgehensweise in vier Schritten auf, um Konfigurationen von Produktionsnetzwerken mit erhöhter Agilität zu identifizieren. Im ersten Schritt werden die Belastungsszenarien als Nachfrage- oder Bedarfsszenarien aus historischen Daten gebildet und die relative Stückzahlveränderung sowie die Geschwindigkeit der Veränderung daraus abgeleitet. Dafür schlägt der Autor vor mit quantitativen Prognoseverfahren zu arbeiten und Experteneinschätzungen zu nutzen. Im zweiten Schritt werden Netzwerkkonfigurationen simuliert. Die Testung besteht aus einer System-Dynamics-Simulation und einem Kostenmodell (EBIT-basiert). Auf Grundlage der Simulation werden Konfigurationen des Produktionsnetzwerkes anhand von den drei Messwerten Kapazitätsflexibilität (relativ), Anpassungsgeschwindigkeit und Profitabilität verglichen und ausgewählt. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse der Simulation zusammengefasst und wird eine Entscheidung der Unternehmensführung vorbereitet.

KÖNIG (2008) beschreibt in seiner Arbeit ein System und einen Ablauf für das Management von betrieblichen Risiken in produzierenden Unternehmen. Der Autor fokussiert für seine Studie den Anlagen- und Maschinenbau. Der Ablauf für das betriebliche Risikomanagement besteht aus vier Schritten: der Risikoidentifikation, der Risikobewertung, der Entwicklung von Maßnahmen und der Validierung des Risikomanagements. Der Autor schlägt vor, ein System aus einem Prozessmodell der Produktion aufzubauen. Als Fokus für die Arbeit wird das Produktionsrisiko als Umsatzausfall durch fehlende oder nicht verkaufsfähige Produkte festgelegt. Dabei werden jene Risiken, die von Seiten des Marktes auf das Unternehmen einwirken aus der Risikobetrachtung ausgeschlossen. Der Fokus liegt auf technischen Risiken, welche einen direkten Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Produktionssystems haben. Der Autor fokussiert in seiner Studie die Frage nach externen Auslösern für Risiken nicht. Besonders in der Bewertung der Risiken greift der Autor auf die Werkzeuge zurück, die auch für Finanzstresstests zu wählen sind oder die in der Finanzwirtschaft genutzt werden – der Autor selbst zieht die Parallelen zum Stresstest nicht, sondern wählt die Werkzeuge, weil sie seiner Einschätzung nach die qualitative Risikobewertung unterstützen können (VaR) und eine Simulation sinnvoll ermöglichen (Sensitivitäts- und Szenarioanalyse). Der Autor nimmt im Rahmen der Auswahl auch Bezug auf den Stresstest als Werkzeug, die Analogie wird aber nicht weiter detailliert oder als Begründung

für die Gestaltung der Ergebnisse genutzt. Es wird angegeben, dass aus den bereits identifizierten Produktionsrisiken Szenarien zusammengestellt werden sollen, um diese dann im Rahmen des Ablaufmodells als Eingangsgröße zu nutzen. Die systematische Entwicklung dieser Szenarien ist nicht Teil der vorgestellten Ergebnisse. Für die Identifikation und Bewertung von Ausfallrisiken wird von KÖNIG (2008) ein prozessorientiertes Vorgehen erarbeitet. Somit werden die Risiken anhand eines Modells der Produktionsprozesse identifiziert. Hierfür wird für jeden Wertschöpfungsprozess ein Prozessmodell erstellt. Als zweites Werkzeug für die Identifikation wird eine Risk Mode and Effect Analysis (RMEA) empfohlen. Eine qualitative Bewertung von Risiken erfolgt durch die Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit, der Entdeckungswahrscheinlichkeit und des Ausmaßes des wirtschaftlichen Schadens. In seiner Arbeit bietet der Autor einen Risikokatalog zur Orientierung an. Weiterhin werden die Risiken in einer Interaktionsmatrix miteinander in Beziehung gesetzt. Die Berechnung und Modellierung des VaR erfolgt basierend auf historischen Daten mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation. Die Auswahl von geeigneten Maßnahmen wird unterstützt mit einer tabellarischen Zuordnung zwischen den potentiellen Risiken und Maßnahmen. Die Bewertung erfolgt durch die Fähigkeit den Gewinn oder Umsatzerlös über ein erhöhtes Produktionsvolumen zu steigern.

Schlussfolgerungen:

1. Es existieren bereits Anwendungen von Stresstests für die Industrie – SCHURIG (2016) und GREBNER (2015) zeigen, dass die Übertragung der Stresstestmethodik aus der Finanzindustrie auf produzierende Unternehmen möglich ist und einen wissenschaftlichen, aber auch praxisrelevanten Mehrwert bietet.
2. Die Veröffentlichung von GREBNER (2015) zu Stresstests bezieht sich auf den schematischen und organisatorischen Überbau für Unternehmen, die in der produzierenden Industrie agieren. Die Forschungsarbeit überträgt den Stresstest aus einer allgemeingültigeren, strategischen Perspektive auf produzierende Unternehmen. SCHURIG (2016) fokussiert Produktionsnetzwerke und nutzt den Stresstest sehr spezifisch in Bezug auf die Auslastung von Produktionsnetzwerken. KÖNIG (2008) konzentriert sich in seiner Veröffentlichung auf produzierende Unternehmen und dabei besonders auf die technischen Risiken der Produktion.
3. Die Entwicklung der Belastungsszenarien erfolgt in dem Beitrag von SCHURIG (2016) auf der Basis von historischen Daten. Weiterhin enthalten die Belastungsszenarien

ausschließlich die Nachfrage als Einflussfaktor. Eine Restriktion in der Arbeit von SCHURIG (2016) ist, dass die Nachfrage des Marktes immer zu 100 % über die produzierten Stückzahlen bedient wird. Somit leitet er die Belastungsszenarien als Entwicklung der zu produzierenden Stückzahlen über die Zeit ab. Die Belastungsszenarien in der Studie von GREBNER (2015) enthalten externe Faktoren aus dem globalen Umfeld und dem unternehmensexternen Umfeld, auch extreme Ausprägungen. Damit sind die Belastungsszenarien strategische Szenarien und die folgende Auswirkungsanalyse findet auf der Unternehmensebene statt. Der Autor fasst die Übertragung der Szenarien auf das Unternehmen als Teil der Auswirkungsanalyse auf, dafür stellt er einen Satz Unternehmenskennzahlen vor, welche die Auswirkungen abbilden sollen (siehe auch Tabelle 2). Die Untersuchung bleibt dem/der Leser\*in und Anwender\*in weitere Informationen zur Art der Übertragung der Belastungsszenarien schuldig. Dadurch ist die direkte Übertragbarkeit der Belastungsszenarien nur teilweise gewährleistet. Externe, extreme oder hypothetische Umfeldszenarien werden von KÖNIG (2008) nicht gesondert behandelt. Weiterhin werden Methoden oder die Anwendung des Szenariomanagements nicht untersucht.

4. Die Aggregation von Risiken findet in der Arbeit von SCHURIG (2016) nicht statt, da es nur einen Einflussfaktor für das Belastungsszenario gibt. KÖNIG (2008) schlägt den Anwender\*innen eine Aggregation der Risiken mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation vor.
5. In der Forschungsarbeit von KÖNIG (2008) wird ein Vorgehensmodell eingeführt, welches die Kombination einer qualitativen Bewertung der Risiken mit einem Simulationsmodell für die Bewertung anhand des VaR vorstellt. Weiterhin wird die gezielte Maßnahmenauswahl mit der Hilfe dieser Methoden verfolgt. Diese Elemente können für die Übertragung der Stresstestmethodik auf Produktionssysteme hilfreich sein.

Eine Weiterentwicklung der Methodik ist notwendig, da Aspekte der Stresstestmethodik nicht einbezogen wurden. Dabei kann die Anwendung auf weitere Betrachtungsbereiche, wie das Produktionssystem selbst, übertragen werden. Darüber hinaus können die Erkenntnisse zum methodischen Aufbau des Stresstests erweitert und detailliert werden. Zuletzt können die von KÖNIG (2008) erarbeiteten Ergebnisse gezielt als Grundlage für eine Auswirkungsanalyse und monetäre Bewertung aufgegriffen werden.

### 3.2.2 Anwendung der Szenariotechnik in der Fabrik- und Produktionsplanung

HERNÁNDEZ MORALES (2003) stellt eine Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung vor, dabei nutzt er das Szenariomanagement als zentrales Werkzeug zur Bestimmung der benötigten Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Er baut auf der Studie von GAUSEMEIER ET AL. (1998) auf und überträgt ihr Vorgehen auf die Fabrik als Gestaltungsfeld des Szenariomanagements. Dabei stellt er drei unterschiedliche Vorgehensweisen vor mit Systemszenarien umzugehen und schlägt ein separates Vorgehen für lenkbare und nicht lenkbare Einflussfaktoren vor. Die Übertragung der Szenarien auf die Fabrik konkretisiert den von GAUSEMEIER ET AL. (1996) vorgestellten Szenariotransfer und entwickelt eine Systematik, wie die benötigte Wandlungsfähigkeit für eine Fabrik festgelegt werden könnte. HERNÁNDEZ MORALES bindet die Elemente der Fabrik in die Szenarioanalyse ein. Die Anforderungen an die jeweiligen Elemente der Fabrik für zukünftige Planungszustände werden durch einen Vergleich von Ausprägungen pro Szenario erreicht. Damit legt der Autor die Grundlage für vielzählige Studien, die sich mit der Wandlungsfähigkeit von Fabriken beschäftigen.

MENCK ET AL. (2014) präsentieren einen Ansatz zur Vorhersage von produktionsspezifischen Szenarios. Die Autor\*innen fokussieren die Szenarioentwicklung mit Hilfe einer Cross-Impact-Analyse. Sie schlagen eine Analyse aller generellen Veränderungen im Umfeld in Bezug auf die Elemente von Fabriken vor und führen basierend auf diesen generell zu analysierenden Zusammenhängen universelle Produktionsszenarien ein. In einem zweiten Schritt sollen spezifische Produktionsszenarien für das zu betrachtende Fabrikobjekt erstellt werden. Die spezifischen Produktionsszenarien beschreiben eine Projektion, welche den zukünftigen Zustand einer Fabrik darstellt. Zur Beschreibung des Fabrikobjektes greifen sie auf fünf Gestaltungselemente zurück: das Produkt, den Prozess, die Mitarbeitenden, das Produktionsequipment und das Produktionsprogramm. Die Autor\*innen stellen in ihrer Arbeit den Ansatz als konzeptionelle Idee vor. Eine Detaillierung oder Anwendung wird nicht beschrieben.

DOMBROWSKI & ERNST (2013) präsentieren ein Vorgehen für die Layoutplanung von Fabriken, welcher eine Szenarioanalyse zur Generierung von Eingangsdaten für Simulationen dient. Die erste Phase des Ansatzes sieht eine Szenarioanalyse vor, mit der drei Szenarien für die zu planende Fabrik entworfen werden: ein Best Case, ein Worst Case und ein Sze-

nario, welches am wahrscheinlichsten eintritt. Die Einflussfaktoren sollen „den zukünftigen Erfolg der Fabrik möglichst gut widerspiegeln“ (DOMBROWSKI & ERNST 2013). Die Autor\*innen schlagen für ihr Vorgehen vor, die Layout-Varianten unabhängig von der Szenarioanalyse zu entwickeln. Die Varianten des Fabrik-Layouts werden für eine diskrete ereignisgesteuerte Simulation modelliert. Diese Modelle werden anschließend mit den entwickelten Szenarien zusammengebracht, optimiert und evaluiert. Das Vorgehen wird an einem Praxisbeispiel validiert.

Schlussfolgerungen:

1. Die Entwicklung von produktionsspezifischen Szenarien wurde in den Ansätzen begründet und es wurde gezeigt, dass eine Nutzung der Szenarioanalyse für Planungen in der produzierenden Industrie sinnvoll und hilfreich sein kann.
2. In den Ansätzen von DOMBROWSKI & ERNST (2013) und MENCK ET AL. (2014) werden die Szenarien direkt für die jeweilige Planungsaufgabe gebildet – die Analyse der Einflussfaktoren dient damit dem Ziel, verschiedene Szenarien für die Planung zu entwickeln. Im Gegensatz dazu geht HERNÁNDEZ MORALES (2003) davon aus, dass die Entwicklung des Umfeldes als Ganzes betrachtet werden soll und bildet nicht nur vorausgewählte, für die Planungsaufgabe spezifische Entwicklungen ab. Die unlenkbaren Faktoren, welche externe Entwicklungen für das Gesamtunternehmen darstellen, werden in Form von Umfeldszenarien einbezogen.
3. In allen drei Ansätzen wird ausschließlich explorativ für die Bildung der Szenarien vorgegangen.
4. Die Entwicklung über die Zeit „hinein“ in die zukunftsstände der Szenarien bleibt unbehandelt.
5. Für die Ansätze von DOMBROWSKI & ERNST (2013) und MENCK ET AL. (2014) ist nicht detailliert beschrieben, wie die Übertragung der Produktions-Szenarien auf die Planungsobjekte erfolgt.
6. Alle vorgestellten Ansätze gehen nicht näher drauf ein, wie diese mit Extremszenarien umgehen. Nur DOMBROWSKI & ERNST (2013) geben vor, dass mit einem Worst-Case- und Best-Case-Szenario geplant werden soll.<sup>8</sup> In der Anwendung beziehen sich diese Szenarien ausschließlich auf die Stückzahlentwicklung als Best und Worst

---

<sup>8</sup> Dieses Vorgehen entspricht bestimmten, grundlegenden Methoden der Szenariotechnik, welche die Bildung von positiven und negativen Extrem-Szenarien beschreiben (MIETZNER 2009, S. 118-119).



Case. Ein Einbezug extremer Entwicklungen anderer Faktoren wird nicht untersucht.

### 3.2.3 Stochastische Aggregation von Unsicherheiten für Produktionssysteme

ZÄH ET AL. (2005B) stellen in ihrer Veröffentlichung ein Rahmenmodell für die Bewertung von wandlungsfähigen Produktionssystemen vor. Im Modell findet eine Integration von mehreren Unsicherheiten in ein Bewertungsmodell statt. Das Bewertungsmodell stützt sich dabei auf den Realloptionsansatz nach COPELAND & ANTIKAROV (2001). Die Unsicherheiten werden mit Binomial-Bäumen angenähert und zukünftige Zustände werden durch eine Kombination aus ihren Knoten abgebildet. Alle Unsicherheiten in Form von multinomialen Bäumen darzustellen schätzen die Autor\*innen nicht als zielführend ein und schlagen vor, nur eine Unsicherheit in Form eines Binomial-Baums und weitere Unsicherheiten in Form einer Monte-Carlo-Simulation abzubilden. Mit Hilfe des Realloptionsansatzes werden die Net Present Values der Planungsalternativen miteinander verglichen und es wird eine Entscheidungshilfe gegeben. Das Konzept wird von einem Anwendungsbeispiel gefolgt. Im Anwendungsbeispiel sind die primäre Unsicherheit die Absatzzahlen eines Produktes, als sekundäre Unsicherheit wird die Gewinnmarge modelliert. Diese Arbeit legt den Grundstein für eine Reihe von Veröffentlichungen zu Bewertungen mit Hilfe von Realoptionen. In ihrem Beitrag erwähnen ZÄH ET AL. (2005B), dass die Einflussfaktoren für „wichtige“ Projekte mit hohen Investments mit Hilfe des Szenariomanagements erarbeitet werden können. Dieser Gedankengang wird in der Veröffentlichung nicht weiter fokussiert oder detailliert.

SUDHOFF (2007) stellt in seiner Arbeit eine Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion vor. Ein Teilschritt ist die Analyse und Beschreibung der Umwelt, um diese in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Für die Integration mehrerer Unsicherheiten in sein Bewertungsmodell baut SUDHOFF (2007) auf dem von ZÄH ET AL. (2005B) vorgestellten Ansatz auf und auch er wählt eine Unsicherheit aus und simuliert diese als Binomial-Baum. Alle weitere Unsicherheiten, die in das Bewertungsmodell einfließen sollen, werden mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation simuliert. SUDHOFF (2007) führt die primäre Unsicherheit als entscheidungsbestimmenden Faktor ein.

MÖLLER (2008) präsentiert eine Methodik zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Die Methodik umfasst drei generische Schritte, die mit

der Modellierung des Systems starten, anschließend wird eine monetäre Bewertung vorgenommen und diese sodann analysiert. Für die Bewertung von Alternativen für Produktionssysteme bezieht MÖLLER (2008) das dynamische Umfeld mit in die Bewertungsberechnungen ein und nutzt hierzu auch eine Anlehnung an den Realoptionsansatz. MÖLLER (2008) fokussiert die Kostenberechnungen für unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten für Produktionssysteme und lässt ein sogenanntes Umfeldprofil in die Bewertung einfließen. Das dynamische Umfeld geht in Form von Unsicherheiten in die Berechnung ein, hierbei wird eine primäre Unsicherheit ausgewählt, die mit Hilfe einer Baumstruktur modelliert wird. Sonstige Unsicherheiten fließen mit Hilfe einer stochastischen Simulation in die Bewertung ein.

Auch KREBS (2011) greift die Bewertung von Alternativen auf. Er stellt eine Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten vor. In Abgrenzung zu den vorherigen Arbeiten greift KREBS nicht auf den Realoptionsansatz zurück, sondern verknüpft ein Kalkulationsmodell direkt mit einem Modell der Unsicherheiten. Weiterhin beschäftigt er sich nicht mit der Wandlungsfähigkeit als Motivation für die Methodik zur Bewertung.

BREDOW (2012) befasst sich in seiner Untersuchung, wie auch MÖLLER (2008), mit der Bewertung von Alternativen, allerdings liegt der Fokus nicht auf Produktionssystemen, sondern Wertschöpfungsnetzwerken, im Speziellen Netzwerken in der Automobilindustrie. Der Autor stellt eine Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos in Wertschöpfungskonfigurationen vor und will den/die Anwender\*in mit dem Aufbau eines stochastischen Modells bei dem Einbezug von Risiken unterstützen. Er baut auf der Arbeit von MÖLLER (2008) auf, wählt aber den Net Present Value (NPV) at Risk als ausgewählte Zielgröße der Bewertung.

In seinem Beitrag zur Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen nimmt auch von POHL (2013) das Thema Bewertung von Planungsalternativen auf. Dabei geht es in der von ihm vorgestellten Methodik besonders um Adaptionalternativen, die vor dem besonderen Einfluss von Produktlebenszyklen miteinander verglichen werden sollen. Auch hier werden Unsicherheiten als Teil des Bewertungskonzeptes betrachtet und fließen mit Hilfe einer Modellbetrachtung und Monte-Carlo-Simulation in die Bewertung ein.

Schlussfolgerungen:

1. Für die Identifikation von externen Einflüssen und den resultierenden Unsicherheiten sowie deren Bewertung wird unterschiedlich vorgegangen. Die Autor\*innen stützen sich auf systematische Vorgehensweisen, welche je nach Bewertungsaufgaben unterschiedlich ausgestaltet werden. Die Informations- und Datenquellen sind sowohl interne als auch externe Datenquellen sowie Experteneinschätzungen.
2. Die stochastische Simulation mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode wird in den Arbeiten für die Lösungen der multikriteriellen Optimierung verwendet. Analytische Verfahren zur Ermittlung der Lösung werden aufgrund der Komplexität der Bewertungs- und Entscheidungsaufgaben von den Autor\*innen ausgeschlossen oder nicht als Lösung in Betracht gezogen.
3. In den frühen Beiträgen von ZÄH ET AL. (2005B), SUDHOFF (2007) und MÖLLER (2008) wird eine Unsicherheit als zu priorisierende Unsicherheit ausgewählt und als Binomial-Baum dargestellt. Diese Auswahl wird motiviert durch eine erhöhte Nachvollziehbarkeit und eine vereinfachte mathematische Simulation.
4. Eine Aggregation aller Unsicherheiten in einem Erwartungswert pro Zeitperiode wird in allen Arbeiten gewählt. Die Autor\*innen tragen der Diversität von Produktionssystemen, -standorten und -netzwerken Rechnung, indem die Kalkulationsmodelle nur generisch vorgegeben werden und für jeden Anwendungsfall die genaue Berechnung und der Detailgrad individuell bestimmt werden müssen.
5. ZÄH ET AL. (2005B) und MÖLLER (2008) greifen auf einen erweiterten NPV für die Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen zurück. Andere Autor\*innen legen keine Bewertungsgröße fest. Erst BREDOW ergänzt im Jahr 2012 die Auswahl des Zielwertes um die Nutzung des NPV at Risk, einem gängigen Werkzeug im Riskmanagement.
6. Für alle Arten von Bewertungen unter Unsicherheit und Risikobetrachtungen wird eine Vielzahl von Unsicherheiten und Risiken identifiziert. ZÄH ET AL. (2005B), SUDHOFF (2007), MÖLLER (2008) und BREDOW (2012) geben dem/der Anwender\*in Unterstützung bei der Priorisierung und ermöglichen dadurch eine Auswahl der relevantesten Faktoren für die stochastische Aggregation. Auch die anderen Autor\*innen greifen bei der Anwendung der Methoden auf eine begrenzte Anzahl an Faktoren zurück.
7. KREBS (2011) nutzt für die Analyse seiner Ergebnisse zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse und erweitert damit die Möglichkeiten aus den aggregierten Ergebnissen

Rückschlüsse auf einzelnen Faktoren zu ziehen. So handhaben es auch BREDOW (2012) und POHL (2013) nach ihm.

### 3.3 Fazit

In Tabelle 3 wird die diskutierte Literatur in einer Übersicht dargestellt. Der Grad der Auseinandersetzung mit den zentralen Aspekten für diese Arbeit wird grafisch zusammengefasst.

Die Kernelemente des Stresstests aus den Richtlinien der Zentralbanken und die vier Kernelemente des Stresstests nach BORIO ET AL. (2011, S. 3) bilden den Rahmen für das Vorgehen der Methodik in dieser Arbeit. Die Dokumente der Zentralbanken enthalten die maßgeblichen Vorgaben für den Stresstest in der Finanzindustrie. Deswegen wird das zentrale Rahmenmodell als Grundlage für diese Arbeit genutzt. Die vier Kernelemente, die von BORIO ET AL. (2011, S. 3) aus dem Stand des Wissens für die Finanzindustrie herausgearbeitet werden, entsprechen dem Rahmenmodell der Zentralbanken. Sie bilden den Kern der Vorgehensmodelle in der Finanzindustrie ab und sind sinnvoll auf die produzierende Industrie übertragbar. Weiterhin wird auf die vorgestellten Stresstestanwendungen für produzierende Unternehmen und Produktionsnetzwerke aufgebaut. Besonders die Erkenntnisse aus den Arbeiten von GREBNER (2015) und SCHURIG (2016) bilden die Grundlagen für diese Arbeit. Jedoch wird insbesondere der Betrachtungsbereich verändert und auf Produktionssystemen zugeschnitten. Des Weiteren wird für die Methodik, wie in der Finanzindustrie vorgegeben, mit hypothetischen und nicht mit historischen Szenarien gearbeitet. Die Szenarioanalyse wird zentraler Bestandteil des Vorgehens im Stresstest, ein Beitrag soll vor allem in Bezug auf den Szenariotransfer, also die Entwicklung von Belastungsszenarien, liegen. Für die Aggregation von Risiken kann auf die bestehenden Konzepte aufgesetzt werden.

Tabelle 3: Literaturübersicht

Autor*innen	Fokus		Szenarioanalyse					Aspekte					Bewertung			
	Stresstest	Produktionssysteme	Szenarioanalyse	Hypothetische / Extreme Szenarien	Historische Szenarien	Planungsspezifische Szenarien	Szenariotransfer	Identifikation	Priorisierung	Korrelation	Aggregation	Stochastische Modellierung	Monetäres Bewertungsmodell	Sensitivitätsanalyse	EBIT	Value at Risk
<i>Stresstest Industrieunternehmen</i>																
GREBNER (2015)	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SCHURIG (2016)	●	●	●	●	●		●	●				●	●	●	●	●
KÖNIG (2008)	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●		●
<i>Szenariotechnik Produktion und Fabrik</i>																
HERNÁNDEZ MORALES (2003)		●	●				●		●							
DOMBROWSKI & ERNST (2013)			●	●		●		●								
MENCK ET AL. (2014)	●		●			●										
<i>Stochastische Risikoaggregation</i>																
ZÄH ET AL. (2005)	●	●					●	●		●	●	●				
SUDHOFF (2007)			●				●	●		●	●	●				
MÖLLER (2008)	●	●					●	●		●	●	●				
KREBS (2011)	●						●		●	●	●	●	●	●		
BREDOW (2012)							●	●	●	●	●	●	●	●		●
POHL (2013)	●	●					●			●	●	●	●	●		

● Fokus der Arbeit ● untersucht ● genutzt ● erwähnt nicht Teil der Forschung



## 4 Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme

### 4.1 Anwendungsbereich des Stresstests für Produktionssysteme

Die Ausführungen dieser Arbeit beziehen alle Arten von Produktionssystemen ein. Im Fokus stehen keine bestimmten Industrien oder Branchen. Aber Unternehmen, welche in unsicheren Märkten agieren und einen hohen Grad an Komplexität haben, können von einem Stresstest stärker profitieren als andere Unternehmen. Die Komplexität kann dabei durch die Produkte und Produktionsprozesse selbst, aber auch durch hohe Variantenvielfalt und Mehrteiligkeit von Erzeugnissen bedingt sein.

### 4.2 Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme

Die Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme wurden im Rahmen der Forschungen für diese Arbeit denklogisch abgeleitet. Sie bauen systematisch auf den Grundlagen aus Kapitel 2 und Kapitel 3 auf und werden im Folgenden beschrieben. Zunächst werden die speziellen Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme vorgestellt. Anschließend werden die speziellen Anforderungen aufgeführt, die sich aus dem „Testobjekt“ Produktionssystem ableiten. Schlussendlich werden die allgemeinen Anforderungen für die Anwendung in der Praxis formuliert.

#### 4.2.1 Spezielle Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme

Die speziellen Anforderungen an den Stresstest ergeben sich aus den Kernelementen des Stresstests in der Finanzindustrie, wie sie in Kapitel 2.4 beschrieben werden. Zusätzlich werden die Anforderungen der vorgestellten Rahmenwerke (vgl. Kapitel 3.1.1) aufgegriffen. Die folgenden speziellen Anforderungen soll der zu entwickelnde Stresstest erfüllen:

##### *A1. Entwicklung von extremen Umfeldszenarien*

Mit Hilfe von Szenarioanalysen sollen relevante Szenarien, welche erhöhten Stress und verstärkte Belastungen bedeuten, antizipiert werden. Für die Identifikation dieser Szenarien müssen mögliche Entwicklungen des Unternehmensum-

feldes systematisch identifiziert und dabei zukunftsorientierte hypothetische Szenarien gebildet werden, welche durch eine Analyse der Vergangenheit nicht zwangsläufig als relevant erkannt werden. So soll der Stresstest mögliche zukünftige Entwicklungen gezielt daraufhin untersuchen können, ob im Produktionssystem nicht handhabbare Risiken oder Prozesse ausgelöst werden, welche die Fähigkeit des Systems überschreiten. Zusätzlich sollen mit Hilfe von Szenarioanalysen die Abhängigkeiten zwischen den Umfeldfaktoren berücksichtigt und die Entwicklungen in handhabbaren Szenarien zusammengefasst werden.

*A2. Identifikation von Risikoschwerpunkten*

Für den Stresstest sollen gezielt die Teile des Produktionssystems untersucht werden, in welchen potentiell Risikoschwerpunkte auftreten. Für den Test wird damit ein gezielter Einsatz sichergestellt werden.

*A3. Auswirkungsanalyse*

Die Auswirkungen der Szenarien müssen systematisch beschrieben und untersucht werden.

*A4. Quantifizierung der Auswirkungen*

Die Auswirkungen müssen quantifiziert werden, um gezielt Rückschlüsse ziehen zu können.

#### 4.2.2 Spezielle Anforderungen für die Übertragung auf Produktionssysteme

Die speziellen Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme ergeben sich durch die Übertragung der Methodik aus der Finanzindustrie und den Charakteristiken des Produktionssystems. Diese Anforderungen basieren auf den dargestellten Grundlagen (vgl. Kapitel 1 und 1) und dem Stand des Wissens (vgl. Kapitel 13.4).

*A5. Entwicklung von Belastungsszenarien*

Die Belastungsszenarien sollen aus den Umfeldszenarien abgeleitet werden und damit eine systematische Übertragung der stressvollen Szenarien auf das Produktionssystem ermöglichen. So sollen sie die Grundlage für die Auswirkungsanalyse der zukunftsorientierten hypothetischen Szenarien auf das Produktionssystem



bilden. Die Belastungsszenarien sollen direkt auf das Produktionssystem übertragbar sein und dadurch die Analyse und Bewertung der entstehenden Risiken für das Produktionssystem ermöglichen.

*A6. Risikoidentifikation und -analyse*

Für das Produktionssystem sollen gezielt die Risiken identifiziert werden, die im System entstehen, aber durch externe, belastende Umfeldentwicklungen ausgelöst werden. Die Methodik soll eine Ergänzung zu klassischen Such- und Analysemethoden sein und eine systematische (gedankliche) Vorbereitung auf mögliche zukünftige Entwicklungen bieten. Es muss ermöglicht werden, eine neue Perspektive auf risikoauslösende Entwicklungen und Ereignisse entstehen zu lassen.

*A7. Aggregation der Risiken*

Die Auswirkungen der Zukunftsszenarien sollen in einem stochastischen Modell abgebildet werden, um eine quantitative Bewertung der Belastungen zu ermöglichen. Damit können die Ergebnisse eine zusätzliche Rückmeldung für das übergeordnete Risikomanagement bereitstellen.

### 4.2.3 Allgemeine Anforderungen an den Stresstest

Für die Anwendung des Stresstests in der Praxis ergeben sich Anforderungen, um die Übertragung der Theorie in die Praxis sinnvoll zu ermöglichen:

*A8. Verständlichkeit*

Für die Anwender\*innen sollen die Ausführungen verständlich sein. Dies wird durch eine übersichtliche Struktur und klare Ergebnisse erreicht.

*A9. Übertragbarkeit*

Die Übertragbarkeit auf verschiedene und neue Einsatzfälle muss vorgesehen werden. Da Anwendungen des Stresstests individuell sind, müssen die Ausführungen allgemein genug gehalten werden, aber gleichzeitig spezifisch genug für eine sinnvolle Anwendung sein.

*A10. Transparenz*

Die Durchführung der Methodik soll für Anwender\*innen nachvollziehbar und transparent sein. Hiermit soll eine hohe Akzeptanz der Ergebnisse innerhalb der Unternehmung erreicht werden.

*A11. Skalierbarkeit*

Der Stresstest muss für kleinere Anwendungen mit wenigen Ressourcen sowie für komplexe Produktionssysteme sinnvolle Einsatzmöglichkeiten bieten. Ebenso verhält es sich mit der Reife des Risikomanagements, hier soll die Anwendung in allen Kombinationen einen Mehrwert schaffen. Ausgenommen sind hier Unternehmen ohne Risikomanagement.

### 4.3 Voraussetzungen

Ein vorhandenes Risikomanagement im Unternehmen wird für den zielführenden Einsatz der Methodik vorausgesetzt. Eine aktive Auseinandersetzung mit Risiken sollte bereits erfolgen, dabei muss das Risikomanagement keine besondere Reife besitzen. Der Stresstest ist als ergänzende Methodik für das Risikomanagement gedacht und kann dieses als alleinstehendes Werkzeug nicht ersetzen. Der Stresstest setzt die Zusammenarbeit zwischen strategischen Funktionen und Expert\*innen des Produktionssystems voraus. Das Vorhaben muss vom Management unterstützt und mitgestaltet werden, damit die gewünschten Erkenntnisse gewonnen werden können und die Ergebnisse ihren Weg in die weitere Umsetzung des Risikomanagements finden. Eine denkbare Ausgangssituation für den Stresstest ist, dass bereits Risikomanagementaktivitäten auf der strategischen und finanzwirtschaftlichen Ebene durchgeführt werden und zusätzliche Erkenntnissen zur Zukunftsrobustheit des Produktionssystems benötigt werden. Die Ursachen für Belastungen werden im Unternehmensumfeld identifiziert und basierend darauf wird der Stress, welcher in der Produktion ausgelöst werden kann, analysiert. Damit werden Störungen und intern verursachte Risiken nicht direkt berücksichtigt, sondern sollten in einem gesonderten Störungsmanagement untersucht werden. Die Ergebnisse des Stresstests besitzen für einen begrenzten Zeitraum Gültigkeit, danach kann und sollte das Vorgehen wiederholt werden. Der Zeitraum, den der Stresstest umfasst, wird im Rahmen der Szenarioanalyse festgelegt. Das Vorgehen

sollte mindestens nach dem Ablauf dieser Zeit wiederholt werden. Ein Abgleich der Ergebnisse mit der aktuellen Situation des Unternehmens sollte regelmäßig stattfinden und mindestens einmal im Jahr durchgeführt werden.

Für den hier vorgestellten Stresstest werden mögliche alternative Planungen oder Projektvorhaben für das Produktionssystem als gegeben angenommen und können als Maßnahmen zur Risikosteuerung für eine verbesserte Zukunftsrobustheit einbezogen werden. Maßnahmen, die grundlegende Strukturveränderungen beinhalten, sollten gesondert detailliert bewertet werden. Die Ergebnisse können in den Stresstest zurückfließen. Alternative Konfigurationen für das Produktionssystem sind im Rahmen von Fabrikplanungen zu konzeptionieren (MÖLLER 2008, S. 67), dabei sind nicht nur Fabrikplanungen gemeint, sondern auch Strukturveränderungen oder Projektplanungen (z.B. Softwareeinführungen).

#### 4.4 Fazit

Die Anforderungen an die Methodik für den Stresstest für Produktionssysteme wurden in den vorherigen Abschnitten formuliert und sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Anforderungen an die Methodik für den Stresstest für Produktionssysteme

Anforderungen	
Spezielle Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung von extremen Umfeldszenarien</li> <li>• Identifikation von Risikoschwerpunkten</li> <li>• Auswirkungsanalyse</li> <li>• Quantifizierung der Auswirkung</li> </ul>
Spezielle Anforderungen für die Übertragung auf Produktionssysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung von Belastungsszenarien</li> <li>• Risikoidentifikation und -analyse</li> <li>• Aggregation der Risiken</li> </ul>
Allgemeine Anforderungen für die praktische Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verständlichkeit</li> <li>• Übertragbarkeit</li> <li>• Transparenz</li> <li>• Skalierbarkeit</li> </ul>

Ein Risikomanagementsystem im Unternehmen ist die Voraussetzung für die sinnvolle Einbettung des Stresstests. Weiterhin können Fabrikplanungsaufgaben zur Entwicklung von Maßnahmen für den Umgang mit Risiken nicht als Teil des Stresstests abgebildet werden – die Entwicklung von grundlegenden Veränderungen und deren deterministische Bewertung müssen außerhalb des Stresstests erfolgen.

## 5 Methodik zum Stresstest für ein Produktionssystem

Kapitel 5 erläutert die Methodik zum Stresstest für ein Produktionssystem. Eine Übersicht der Methodik wird in Kapitel 5.1 gegeben. Anschließend werden die einzelnen Phasen und Vorgehensschritte detailliert. Hierbei werden sowohl die Unterstützung in Form eines Vorgehensmodell als auch die Auswahl der zu nutzenden Methodiken erläutert.

### 5.1 Übersicht zum Stresstest für ein Produktionssystem

Die Methodik für den Stresstest für Produktionssysteme gliedert sich in sieben Phasen: die Identifikation kritischer Prozesse, die Szenarioanalyse, die Entwicklung der Belastungsszenarien, die Auswirkungsanalyse, die Auswahl von Maßnahmen zur Risikominimierung, die quantitative Bewertung und die Ergebnisauswertung.

In der ersten Phase der Methodik wird der Betrachtungsbereich spezifiziert. Hierzu wird auf eine Prozessaufnahme gemäß der Value-Stream-Analyse zurückgegriffen, um den Rahmen für den Stresstest zu setzen. Mit Hilfe einer Business-Impact-Analyse werden die Risikoschwerpunkte im Produktionssystem identifiziert, um den Fokus für den Stresstest zu schaffen.

In der zweiten Phase wird eine Szenarioanalyse durchgeführt, um hypothetische Entwicklungen des Unternehmensumfeldes zu identifizieren.

Anschließend werden in der dritten Phase aus den Szenarien, die die Umfeldentwicklungen anzeigen, Belastungsszenarien für das Produktionssystem abgeleitet. Die Belastungsszenarien zeigen an, wie sich die Eingangs- und Planungsgrößen (Rezeptormodell) des Produktionssystems unter der Einwirkung des Szenarios verhalten würden. Weiterhin werden notwendige Ereignisse und Dynamiken, welche dem Produktionssystem auf dem Weg in das Szenario hinein begegnen, systematisch identifiziert.

Basierend darauf wird in der vierten Phase eine Auswirkungsanalyse (Bow-Tie-Analyse) für die Belastungsszenarien durchgeführt. Daraus werden Risiken und ihre Auswirkungen

auf das Produktionssystem abgeleitet. Diese werden nach ihrer Kritikalität und dem Handlungsspielraum bewertet und mit Hilfe des Risikoportfolios pro Belastungsszenario priorisiert.

In der fünften Phase werden Maßnahmen zur Minimierung und Steuerung der Risikoauswirkungen im Produktionssystem zugeordnet und ausgewählt. Dem/Der Anwender\*in wird eine Zuordnung von Mechanismen zur Risikosteuerung anhand des Risikoportfolios an die Hand gegeben.

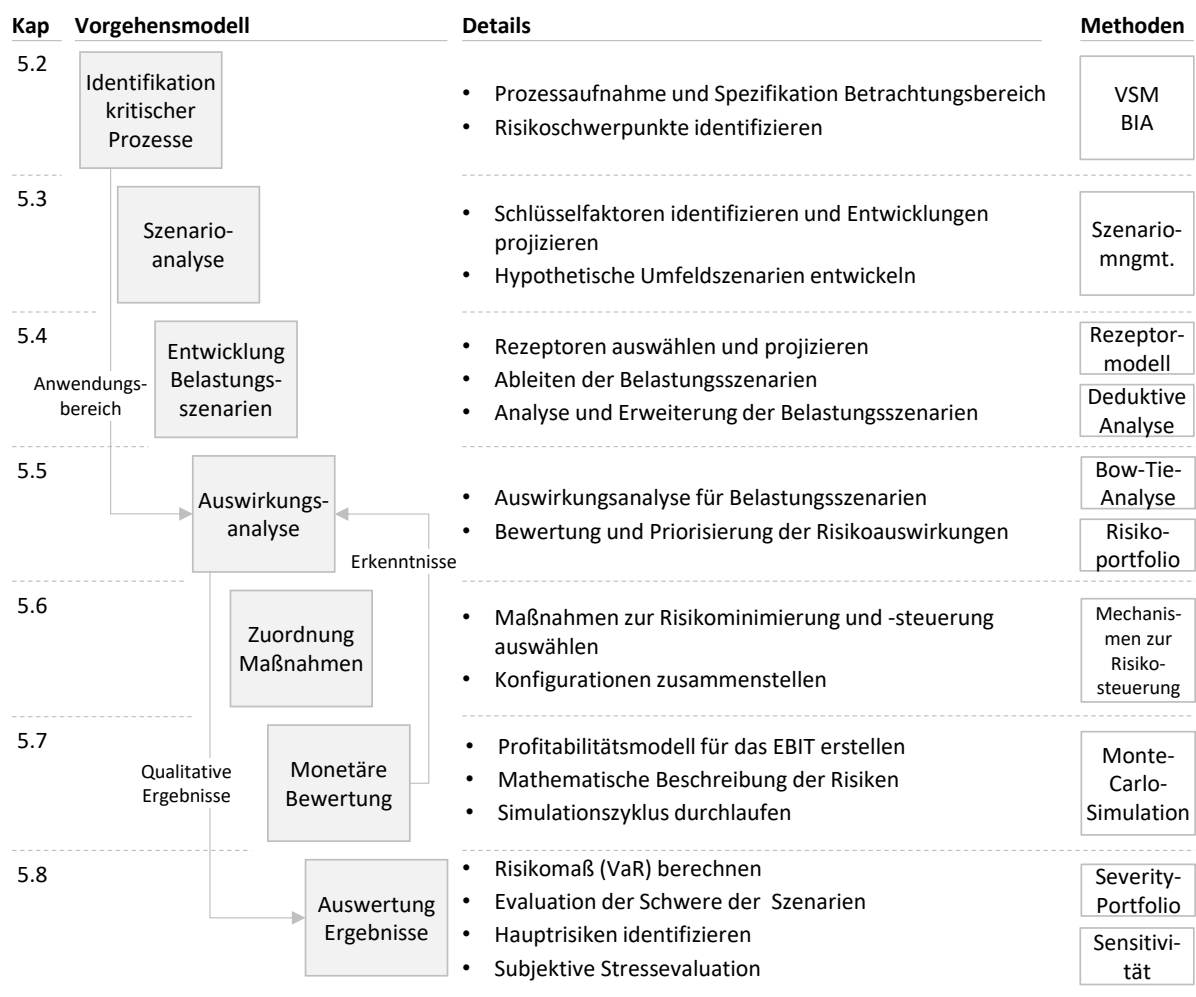


Abbildung 11: Methodik für den Stresstest

Aufbauend auf den qualitativen Beurteilungen in Phase fünf wird in Phase sechs eine quantitative Bewertung der Szenarien vorgenommen. Die Profitabilität in Form des EBIT wird für Konfigurationen der Risikoschwerpunkte modelliert. Die Auswirkungen der Risiken werden mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Technik wird eine Ergebnisverteilung simuliert. Auf Basis dieser Verteilung kann das

Risikomaß Value at Risk (VaR) berechnet und die Sensitivität des Modells auf einzelne Risiken überprüft werden.

In der letzten Phase werden die Ergebnisse des Stresstests analysiert und zusammengefasst. Auf Basis eines relativen Erwartungswerts und VaR können die Szenarien in ein Severity-Portfolio eingeordnet werden. Der VaR dient der monetären Abschätzung, welchen Verlustbelastungen das Produktionssystem pro Szenario ausgesetzt ist. Zusätzlich wird ein Risikoabgleich über die Szenarien hinweg vorgenommen. So kann eine wiederholte Risikoeinordnung mit Hilfe des Risikoportfolios erfolgen und können solche Risiken identifiziert werden, die aus unterschiedlichen Umfeldentwicklungen heraus entstehen. Damit kann ein Rückschluss auf die schwächsten Elemente der Risikoschwerpunkte erfolgen. Zum Abschluss wird eine subjektive Einschätzung des Stresses auf Basis der Einschätzungen von Expert\*innen vorgenommen.

## 5.2 Identifikation kritischer Prozesse

Die kritischen Prozesse und Elemente im Produktionssystem zu identifizieren, ist der erste Schritt im Stresstest. Im Stresstestvorgehen wird von Risikoschwerpunkten gesprochen – hiermit sind die zentralen Elemente des betrachteten Produktionssystems gemeint, die im Stresstest eine besondere Beachtung finden sollen. Das Ziel ist die Identifikation zentraler Prozesse, Elemente oder auch Subsysteme, deren Rolle im System zentral ist, sodass eine starke Abweichung von der Soll-Leistung das Produktionssystem in seiner gesamten Funktionsfähigkeit gefährdet. Bei Stressmodellen für den Menschen müsste an dieser Stelle das Herz-Kreislauf-System als kritisches Element identifiziert werden. Beim Menschen ist bekannt, welche Körperfunktionen zentral sind und unter Stress nicht übermäßig belastet werden sollten. Produktionssysteme sind komplexe soziotechnische Systeme, die immer wieder unterschiedlich funktionieren und gestaltet sind. Zentrale Elemente können sich wiederholen und ähnlich sein, z.B. könnte hier die Fertigung, welche die Kerntechnologie eines Unternehmens enthält, genannt werden. Die Akzeptanz der Ergebnisse des Stresstests kann deutlich erhöht werden, indem in dieser Phase eine systematische, individuelle Prozessaufnahme und Identifikation der zentralen Elemente erfolgt.

### 5.2.1 Prozessaufnahme

Die Prozessaufnahme zu Beginn des Stresstests ist eine Ist-Analyse des zu betrachtenden Produktionssystems. Für die systematische Aufnahme der Prozesse kann eine Wertstromaufnahme (engl.: Value Stream Mapping) genutzt werden. In der Wertstromaufnahme werden alle Material- und Informationsflüsse des Produktionssystems aufgenommen und visualisiert (ERLACH 2010, S. 31-35). Hiermit wird ein Modell des Produktionssystems erzeugt, das dieses zwar vereinfacht, aber zweckmäßig darstellt. Der Detaillierungsgrad ist dem Anwendungsfall entsprechend auszuwählen und besteht aus sechs Grundelementen: den Produktionsprozessen, den Geschäftsprozessen, dem Informationsfluss, dem Materialfluss sowie dem Anfang, dem Lieferant, und dem Ende, dem Kunden.<sup>9</sup> Hierbei wird das Augenmerk mit Hilfe der Wertstromaufnahme auf das Zusammenspiel und die Verknüpfung der Prozessschritte untereinander gelenkt (ERLACH 2010, S. 31-35). Die Prozessaufnahme ist die Grundlage für die Identifikation der risikoreichsten Prozessschritte. Weiterhin ist das Ziel der Prozessaufnahme ein gemeinsames, fachübergreifendes Verständnis für das Produktionssystem zu entwickeln und die Verbindungen zwischen den Prozessen zu erkennen. Die Aufnahme sollte, wenn möglich, beschleunigt werden, indem auf vorhandene Daten und Informationen zurückgegriffen wird, dies können BDE-Systeme, Planungsdaten oder Arbeits- und Organisationspläne sein.

### 5.2.2 Risikoschwerpunkte identifizieren

Basierend auf dem Rahmenmodell des Stresstests in der Finanzindustrie gilt es in dieser Phase die Risikoschwerpunkte als Testfokus und Anwendungsbereich vorauszuwählen. Das Ziel ist es den Betrachtungsbereich für den Stresstest klar abzugrenzen. Die Abgrenzung erfolgt, um den Fokus des Stresstests auf die relevanten Prozesse, Elemente und Subsysteme zu lenken und dadurch den Zeit- und Ressourcenaufwand für den Test sinnvoll zu begrenzen. Wenn das gesamte System, ungeachtet einer Priorisierung von Risikoschwerpunkten, getestet würde, könnte dies je nach Größe und Komplexität des Produktionssystems eine umfangreiche Aufgabe werden. Die Testung ohne Priorisierung birgt das Risiko, dass sich die Anwender\*innen im Detail verlieren und der Aufwand in keinem vorteilhaften Verhältnis zur Erkenntnis steht.

---

<sup>9</sup> Für detaillierte Informationen zu diesem Standardwerkzeug wird auf ERLACH 2010 verwiesen.



Hierfür wird das Vorgehen an den Rahmen einer Business-Impact-Analyse (BIA) angelehnt, welche im Risikomanagement als Methode genutzt wird, um kritische Geschäftsprozesse zu identifizieren – dabei wird die Frage beantwortet, welche Abläufe funktions- und erfolgskritisch sind und welche Prozessabhängigkeiten beachtet werden müssen (ROMEIKE 2018, S. 104, ROMEIKE & HAGER 2013, S. 397-405). Dabei ist die BIA sehr gut geeignet für die Identifikation leistungswirtschaftlicher Risiken (ROMEIKE 2018, S. 60), welche für die Produktion die vorherrschende Risikoart sind (vgl. hierzu Kapitel 2.2).

Für die Produktionssysteme, welche dem Stresstest unterzogen werden sollen, gilt, dass einzelne Prozesse gut abgrenzbar sind, aber vielfältige Abhängigkeiten bestehen, welche die besondere Komplexität der Systeme ausmachen. Die BIA kann dieser Tatsache gerecht werden, da besonders Prozessabhängigkeiten analysiert werden können (ROMEIKE 2018, S. 104). Der Stresstest für Produktionssysteme, welcher besonders an der Schnittstelle zwischen strategischem Risikomanagement und der Testung des Produktionssystems arbeitet, beruht zu einem großen Umfang auf Experteneinschätzungen. Hier reiht sich auch die BIA ein und greift auf die gleichen Experten zurück, welche den Stresstest gestalten. Die Analyse kann mit quantitativen Modellen unterstützt werden. Der genaue Einsatz von Daten wird je nach Unternehmen und betrachtetem Teilprozess stark variieren und sollte individuell festgelegt werden (ROMEIKE 2018, S. 108) Das Ergebnis und somit der Input für das weitere Vorgehen sind die kritischen Prozesse und damit der „Testgegenstand“. Die Stärken des Verfahrens sind die ganzheitliche Betrachtung und die zahlreichen Outputs, die gut weiterzuverwenden sind (ROMEIKE 2018, S. 109). Zudem können aus der BIA direkte Handlungsempfehlungen abgeleitet werden (ROMEIKE 2018, S. 109). Für den Stresstest können diese Handlungsempfehlungen in Form von möglichen Maßnahmenkatalogen weiterverwendet werden.<sup>10</sup> Obwohl eine reguläre BIA ein eigenes Projekt ist, welches der Steuerung bedarf, soll die BIA als Werkzeug in den Stresstest eingebunden werden (ROMEIKE 2018, S. 109). Die Organisation und Steuerung muss im Rahmen des Stresstests ohnehin durchgeführt werden und bedingt keinen zusätzlichen Aufwand. Die systematische Identifikation von Schwachstellen im Prozess ist eine Grundvoraussetzung für nützliche und sinnvolle Ergebnisse des Stresstests, deswegen wird an dieser Stelle auf ein umfangreiches Tool wie eine BIA zurückgegriffen. Die BIA gehört zu den Standardwerkzeugen

---

<sup>10</sup> Für die Business-Impact-Analyse existieren nationale und internationale Standards, welche detaillierte Informationen zum Vorgehen enthalten, vgl. hierzu BSI-Standard 100-4 Notfallmanagement, ISO 22301, ISO 22313 und ISO/IEC 2700) (ROMEIKE 2018, S. 109).

des Business Continuity Managements, welches in Firmen mit fortgeschrittenem Risikomanagement eingesetzt wird (ROMEIKE 2018, S. 105). Demgegenüber sollte beachtet werden, dass die Qualität der Ergebnisse sehr abhängig von den Fähigkeiten, der Motivation und den Kompetenzen der involvierten Expert\*innen ist (ROMEIKE 2018, S. 109).

Dabei sind die Prozesse auszuwählen, die mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllen:

- Der Prozess beinhaltet eine große Anzahl von Risiken
- Bei Eintritt bestimmter Risiken werden diese im großen Maß an andere Prozesse weitergegeben
- Es wird ein großer Schaden bei Eintritt von Risiken erwartet

Das Vorgehen der Business-Impact-Analyse lässt sich nach ROMEIKE (2018, S. 104-105) in drei Phasen und sechs Schritte untergliedern. Es ist ein Workshop-basiertes Vorgehen, welches sich auf das bereits vorhandene Wissen von unternehmensinternen Expert\*innen stützt (ROMEIKE 2018, S. 104-105). In der ersten Phase werden die Organisation, der Umfang und die Konzeption des Vorgehens festgelegt. Dabei werden durch den Stresstest die Grenzen der Analyse durch das Produktionssystem als solches determiniert. Auch die Organisation sowie die Speicherung und Aufbereitung der Daten werden durch den Aufbau und die Durchführung des Stresstests mitausgewählt. Die verbleibende Aufgabe für die erste Phase ist es, ein Bewertungsschema festzulegen und Fragebögen und Vorlagen zur Erarbeitung in den unterschiedlichen Funktionsbereichen vorzubereiten. In der zweiten Phase werden die benötigten Informationen und Daten erhoben. Mit Hilfe von Fragebögen werden potentielle Risiken und Schwachstellen in den Prozessen aufgedeckt und gesammelt. Die Informationen werden untereinander ausgetauscht und schließlich dokumentiert. In der letzten Phase werden die vorhandenen Informationen analysiert und die Entscheidungen gefällt. In Workshops werden aus den Prozessen mit Hilfe der festgelegten Kriterien die funktions- und erfolgskritischen Geschäftsprozesse identifiziert. Basierend darauf werden Anforderungen an die betroffenen Prozesse und Ressourcen erarbeitet und es können Maßnahmenkataloge entwickelt werden.

### 5.3 Entwicklung der Umfeldszenarien

Ein Bild von möglichen, zukünftigen Entwicklungen zu erzeugen, die zu Stress im betrachteten Produktionssystem führen können, ist das Ziel für die Entwicklung der Umfeldszenarien. Für den Stresstest ist es die zentrale Auseinandersetzung mit den Veränderungen im Umfeld, also der Möglichkeit, dass die Zukunft sich grundlegend anders entwickelt, als es zum Zeitpunkt der Analyse erwartet wird. Dafür werden Szenarien identifiziert, welche Beachtung und Vorbereitung erfordern, weil sie zu Schocks und Belastungen führen können. Dies entspricht dem Vorgehen von Stresstests in der Finanzindustrie und wird ebenso für Produktionssysteme durchgeführt.

Explorative Szenarien, die auch „Was-wäre-wenn-Szenarien“ genannt werden (MIETZNER 2009, S. 111, GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 111), werden für diesen Anwendungsfall genutzt. Von der Gegenwart ausgehend kann so die Entwicklung in beliebige Richtungen „erforscht“ und durchdacht werden. Die Unsicherheiten, die mit Hilfe dieser Analyse einbezogen werden, werden größtenteils systematische Unsicherheiten sein. Dies macht eine systematische Analyse zur Identifikation von Abhängigkeiten und zur Ableitung der wichtigsten Einflussfaktoren sinnvoll (SCHOLL 2001). Da Szenarioanalysen unterschiedlich ausgestaltet werden können (vgl. Kapitel 2.3.1), werden im Folgenden die Rahmenbedingungen der Szenarioanalyse für den Stresstest von Produktionssystemen beschrieben. Die Systematisierung orientiert sich an der Methodenevaluation von HAMBACH & ALBRECHT (2014) und MIETZNER (2009)<sup>11</sup>.

Grundlage für die Entwicklung des Stresstests ist die systematische, hypothetische Zukunftsvorschau, welche zu Beginn primär qualitativ ist. So wird die Erarbeitung von Zukunftsbildern ermöglicht, ohne den Fokus auf eine quantitative Abbildung zu lenken. Die Verarbeitung quantitativer Daten muss jedoch dort möglich sein, wo diese sinnvoll einzubinden sind.

Basierend auf den Anforderungen an die Methodik dieser Arbeit (vgl. Kapitel 4.2) muss ein formales und systematisches Vorgehen entwickelt werden. Der Stresstest für Produktionssysteme stellt eine Ergänzung zu gängigen Risikomanagementbetrachtungen dar und unterstützt eine neue Perspektive auf die Auseinandersetzung mit der Zukunft und Risiken,

---

<sup>11</sup> Die Grundlage für die Auswahl bildet eine Reihe von Veröffentlichungen: GAUSEMEIER ET AL. 1996, GAUSEMEIER ET AL. 1998, HAMBACH & ALBRECHT 2014, LIPPOLD & WELTERS 1976, MIETZNER 2009, MIßLER-BEHR 1993, SCHOLL 2001, REIBNITZ 1992, REIBNITZ ET AL. 1982.

deswegen wird mit der Vielzahl von Einflussfaktoren gearbeitet, welche zu Szenarien „integriert“ werden (HAMBACH & ALBRECHT 2014, S. 119). Folglich ist ein induktives Vorgehen auszuwählen.

Die Unsicherheit über die Entwicklung des Umfeldes von produzierenden Unternehmen umfasst Ungewissheit sowie Risiken und Unwissen (vgl. Kapitel 2.2). Für den Stresstest sind Unsicherheiten, die ihre Ursache außerhalb des Unternehmens haben, zu identifizieren und mit Hilfe der Szenarien zu beschreiben und handhabbar zu machen. Wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben, entsteht Stress durch Prozesse oder eine Kombination von Prozessen, welche durch eine Einwirkung von außen ausgelöst werden. Dieser Anforderung wird durch die Identifikation der Unsicherheiten außerhalb des Unternehmens mit der Szenarioanalyse Rechnung getragen. Streng genommen liegt dabei eine Ungewissheitssituation vor (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 144). Die Veränderungen der Umwelt können „strukturell“ trotzdem als Szenarien erarbeitet werden (ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 144). Der gängige Ansatz der Szenarioanalyse ist, dass keine Angaben zur Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien gemacht werden. Für den Stresstest für Produktionssysteme sind hypothetische Zukunftsentwicklungen zu betrachten, deswegen wird auch hier der Weg gewählt mit der Ungewissheitssituation zu arbeiten (HAMBACH & ALBRECHT 2014, S. 119-120).

Die Vorgehen der Szenarioanalyse nach REIBNITZ (1992) und nach GAUSEMEIER ET AL. (1996) entsprechen den zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen (HAMBACH & ALBRECHT 2014, S. 119). Basierend auf den Ausführungen von REIBNITZ (1992) und GAUSEMEIER ET AL. (1996) wird nun in den folgenden Absätzen die Szenarioanalyse des Unternehmensumfeldes im Rahmen des Stresstests für Produktionssysteme vorgestellt.<sup>12</sup> Wie in Abbildung 12 veranschaulicht, werden im ersten Schritt die Einflussfaktoren analysiert, gefolgt von der Erstellung von Trendprojektionen und der Entwicklung der Szenarien.

Für die Entwicklung der Szenarien muss im Rahmen des Stresstest ein Zeithorizont gewählt werden. GAUSEMEIER ET AL. (1996, S. 115) geben je nach Art des Projektes einen Zeitraum zwischen zwei und zehn Jahren vor. Der Zeithorizont für den Stresstest muss abhängig von dem Unternehmen und den Entwicklungen des Umfeldes gewählt werden. Der Stresstest findet nicht nur auf strategischer Ebene statt, sondern bezieht auch die operativen

---

<sup>12</sup> Die Indizierungen der Variablen, sowie die Formeln und Gleichungen werden basierend auf den mathematischen Ausführungen zur Szenarioanalyse von MIßLER-BEHR (1993) angegeben.

Auswirkungen im Produktionssystem ein. Aus diesem Grund sollte der Zeitraum im Bereich der mittelfristigen Planung von ungefähr 5 Jahren liegen.

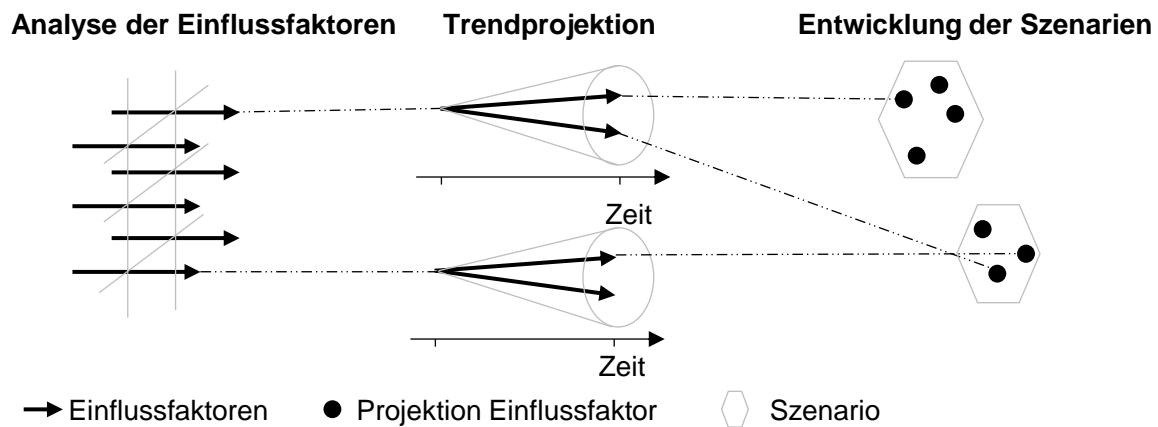


Abbildung 12: Schematische Darstellung für die Entwicklung der Umfeldszenarien (in Anlehnung an GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 19)

Organisatorisch gesehen erfolgt die Entwicklung der Umfeldszenarien auf der Ebene der Gesamtunternehmung und bezieht sich nicht spezifisch auf das Produktionssystem. Für diesen Arbeitsabschnitt ist der Einbezug der Unternehmensführung und des Managements essentiell, sodass sichergestellt werden kann, dass die Perspektiven der unterschiedlichen Unternehmensbereiche vertreten sind. Nur diese ganzheitliche Perspektive ermöglicht Umfeldszenarien zu entwickeln, welche den möglichen Zukunftsraum sinnvoll beschreiben.

### 5.3.1 Analyse der Einflussfaktoren

Als Grundlage für die Erarbeitung der Einflussfaktoren werden die externen Bereiche, welche einen Einfluss auf das Unternehmen haben, strukturiert. Die Einflussfaktoren können dabei aus bestehenden, unternehmensspezifischen Analysen entnommen werden oder werden vom Projektteam ermittelt. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, sind typische Bereiche für die Strukturierung des globalen Umfelds: die Ökologie, die Ökonomie, die Gesellschaft/Kultur, die Wissenschaft und die Politik / das Recht. Typische Bereiche im Unternehmensumfeld umfassen den Wettbewerb, den Absatzmarkt, die Kunden, die Lieferanten, die Ressourcen, die Partner/Netzwerke, den Arbeitsmarkt und die Technologien (vgl. Abbildung 5).

Für jeden Einflussbereich werden anschließend die relevanten Einflussfaktoren für das betrachtete Unternehmen ermittelt.<sup>13</sup> Das Ziel ist es mit den Einflussfaktoren den gegenwärtigen Zustand, aber auch die zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten sowie die Wechselwirkung mit anderen Bereichen beschreiben zu können (GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 173).

Wie in Abbildung 13 dargestellt, werden dabei  $q$  Umfelder (hier  $q = 4$ ) betrachtet mit  $p$  Einflussfaktoren ( $V_1, \dots, V_p$ ), wobei gilt  $q \leq p$ . Pro Umfeld sollten ungefähr gleich viele Einflussfaktoren identifiziert werden. Anschließend werden die Einflussfaktoren in einem Katalog zusammengestellt und wertneutral beschrieben. Die Analyse der Einflussfaktoren dient dazu die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Faktoren zu verdeutlichen und die relevantesten Faktoren, auch Schlüsselfaktoren genannt, zu identifizieren. Diese Analyse erfolgt mit Hilfe einer Einflussmatrix (vgl. Abbildung 14), mit welcher die Einflüsse der Faktoren systematisch bewertet und ausgewertet werden.

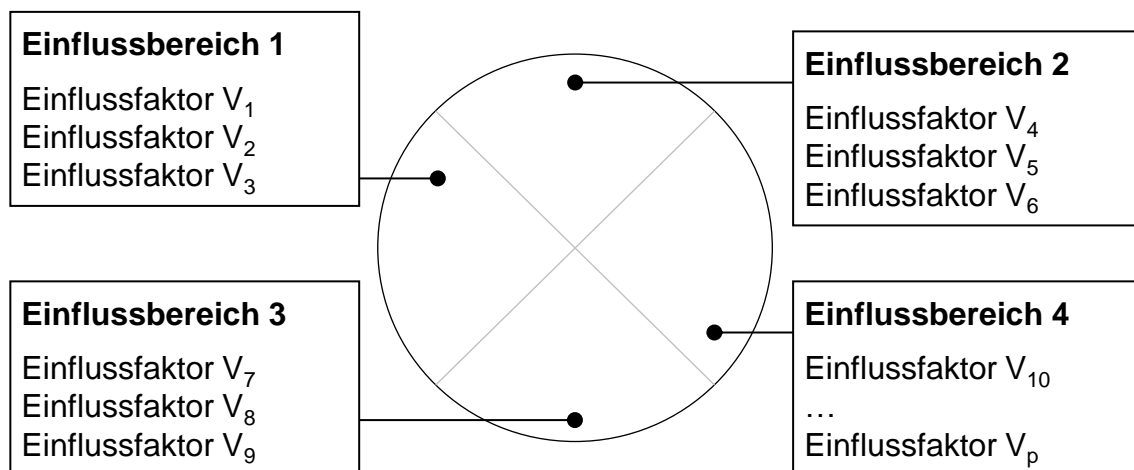


Abbildung 13: Verteilung der Einflussfaktoren auf die Einflussbereiche (in Anlehnung an GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 187)

Die Einflussmatrix wird befüllt, indem die Frage beantwortet wird, wie stark einzelne Einflussfaktoren andere Einflussfaktoren beeinflussen. Dazu werden die Einflussfaktoren paarweise verglichen und der Einfluss eines Einflussfaktors  $V_1$  (Zeile) auf einen Einflussfaktor

<sup>13</sup> Die Ermittlung der Einflussfaktoren kann nach GAUSEMEIER ET AL. (1996, S. 174) mit Hilfe von diskursiven und intuitiven Verfahren wie z.B. der Methode 635 oder dem Brainstorming unterstützt und durchgeführt werden. Die Details der Ermittlung sollen an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Interessierte Leser\*innen werden auf die Beschreibung dieser Methoden in GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 174-194 und ROMEIKE 2018, S. 61-188 verwiesen.

V<sub>2</sub> (Spalte) wird beurteilt. Die Beurteilung erfolgt anhand eines 4-stufigen Bewertungsmaßstabes, mit dem angegeben wird, ob ein Einflussfaktor einen Einfluss auf den anderen Faktor hat und wie stark dieser Einfluss ist (schwach, mittel, stark). Die Stärke der Wirkung eines Einflussfaktors auf die Szenarien steigt mit der Summe der Zeile. Demgegenüber zeigt die Summe der Spalte mit zunehmendem Wert an, wie stark ein Faktor von anderen Einflussfaktoren beeinflusst wird.

	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	...	V <sub>p</sub>	<b>Aktivsumme</b>
Einflussfaktor V <sub>1</sub>		2	2	1	0	...		5
Einflussfaktor V <sub>2</sub>	1		3	0	2	...		6
Einflussfaktor V <sub>3</sub>	0	1		0	1	...		2
Einflussfaktor V <sub>4</sub>	0	1	2		2	...		5
Einflussfaktor V <sub>5</sub>	3	0	2	0		...		5
...	...	...	...	...	...			...
Einflussfaktor V <sub>p</sub>								
<b>Passivsumme</b>	4	4	9	1	5	...		

Bewertungsmaßstab:

0 = kein Einfluss

1 = schwacher, verzögerter Einfluss

2 = mittlerer Einfluss

3 = starker, unmittelbarer Einfluss

Abbildung 14: Beispielhafte Einflussmatrix

Auf Basis der Einflussmatrix wird eine Ähnlichkeitsanalyse der Einflussfaktoren durchgeführt. Das Ziel ist, Einflussfaktoren, die inhaltlich eng verwandt sind und eine große Überschneidung der Deskription haben, zusammenzufassen. Zur Unterstützung kann zuvor ein theoretisches Distanzmaß berechnet werden. Das Distanzmaß ist die Summe der euklidischen Distanzen zwischen den Einflusswerten von jeweils zwei Faktoren.

**Distanzmaß**

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{h=1}^p (k_{ih} - k_{jh})^2} \tag{5-1}$$

$d_{ij}$  = Distanz zwischen Objekt i und j

$p$  = Anzahl der Einflussfaktoren

$k_{ih}$  = Einflusswert von Einflussfaktor i (Zeile) für Einflussfaktor h (Spalte)

Je kleiner das Distanzmaß ist, desto ähnlicher sind die Bewertungen der Einflüsse tendenziell. Die Einflussfaktorpaare werden nach aufsteigendem Distanzmaß sortiert und ihre Ähnlichkeit wird in dieser Reihenfolge evaluiert. Die Einflussfaktoren, welche als eng verwandt oder ähnlich identifiziert werden, werden zu einem Einflussfaktor zusammengefasst.

	$V_1 \dots V_p$	$AS_i$
Einflussfaktor $V_1$ ... Einflussfaktor $V_p$	$k_{ij}$	$\vdots$
$PS_i$	...	$\sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} k_{ij}$

Abbildung 15: Erweiterte Einflussmatrix (in Anlehnung an MIRLER-BEHR 1993, S. 55)

Das Ziel der Auswahl der Schlüsselfaktoren ist, die verständliche und prägnante Beschreibung des Szenarioumfeldes und seiner Entwicklungen zu ermöglichen. Für den Stresstest von Produktionssystemen sollen mittel- bis langfristige Umfeldszenarien entwickelt werden. Durchaus können die Szenarien einzelne lenkbare (interne) Faktoren enthalten und damit Systemszenarien sein. Aufgrund dieser zwei Voraussetzungen werden im Folgenden Auswahlkriterien, die im Rahmen des Stresstests für die Umweltszenarien verwendet werden, der Aktivitätsindex (AS) und der Dynamikindex (DI), eingeführt. Diese schließen sich nicht gegenseitig aus, sondern können nebeneinanderstehen und für die Auswahl der Schlüsselfaktoren kombiniert werden. Die Grundlage für die Einführung der Kennzahlen



ist die erweiterte Einflussmatrix. Die Berechnung der Aktivitätssumme und des Dynamikindex folgt den Berechnungsvorschriften von MIßLER-BEHR (1993, S. 55).

### Aktivitätssumme

$$AS_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^p k_{ij} \quad (5-2)$$

$AS_i$  = Aktivitätssumme von Einflussfaktor i (i-te Zeilensumme)

$p$  = Anzahl der Einflussfaktoren

$k_{ij}$  = Einflusswert von Einflussfaktor i (Zeile) für Einflussfaktor j (Spalte)

Der Aktivitätsindex entspricht der Aktivsumme des jeweiligen Einflussfaktors. Durch die Nutzung des Aktivitätsindex werden Einflussfaktoren bevorzugt, die einem großen Einfluss auf die anderen Einflussfaktoren ausüben.

### Dynamikindex

$$DI_i = AS_i \times PS_i \quad (5-3)$$

mit

$$PS_j = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^p k_{ij} \quad (5-4)$$

$DI_i$  = Dynamikindex von Einflussfaktor i

$AS_i$  = Aktivitätssumme von Einflussfaktor i (i-te Zeilensumme)

$PS_j$  = Passivitätssumme von Einflussfaktor j (j-te Spaltensumme)

$p$  = Anzahl der Einflussfaktoren

$k_{ij}$  = Einflusswert von Einflussfaktor i (Zeile) für Einflussfaktor j (Spalte)

Der Dynamikindex errechnet sich durch Multiplikation aus Aktiv- und Passivsumme. Der Dynamikindex ist ein Indikator für die „Einbindung des Einflussfaktors in das Gesamtsystem“ (GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 194). Je höher der Wert des Index im Vergleich zu den anderen Einflussfaktoren ist, desto stärker ist der Einflussfaktor im System vernetzt, beeinflusst also andere Faktoren, wird aber auch von diesen beeinflusst.

Die Sortierung der Variablen nach absteigender Aktivsumme lässt die „aktivsten“ Einflussfaktoren vor weniger „aktive“ Einflussfaktoren treten. Der Dynamikindex bietet eine zweite sinnvolle Möglichkeit die Einflussfaktoren nach ihrer Bedeutung für den Stresstest zu sortieren. In Abbildung 16 sind in einem Koordinatensystem, mit der Aktivsumme auf der y-Achse und der Passivsumme auf der x-Achse, die Auswahlrichtungen graphisch dargestellt.

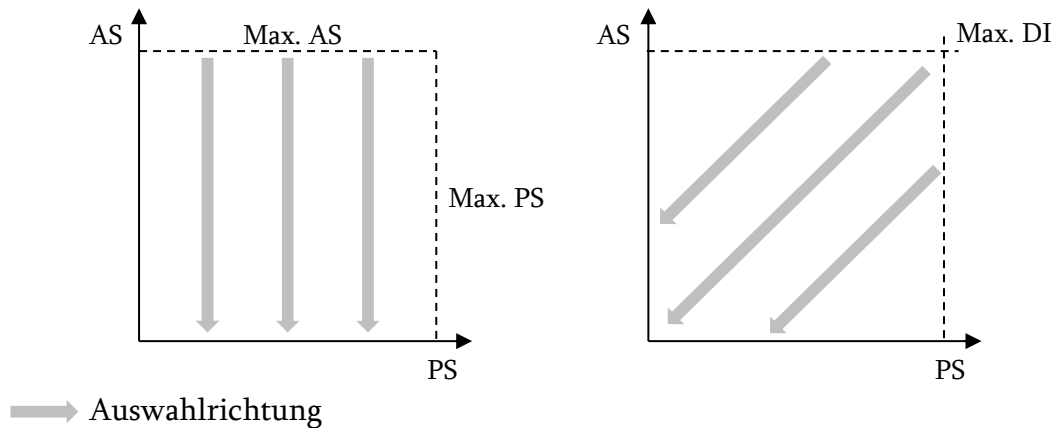


Abbildung 16: Richtung der Kriterien für die Bildung einer Reihenfolge für die Einflusskriterien

Nachdem die Einflussfaktoren anhand der Faktoren in eine Reihenfolge gebracht wurden, muss die Grundmenge der Einflussfaktoren festgelegt werden; hierzu gilt als entscheidendes Maß vor allem die sinnvolle inhaltliche Handhabbarkeit und Überschaubarkeit der Anzahl der Faktoren. Die Bildung der Szenarien entspricht einer Entwicklung von Zukunftsbildern, hierbei hilft eine unüberschaubare Menge an Einflussfaktoren nicht – obwohl natürlich nicht aus Scheu vor Komplexität wichtige Einflussfaktoren ausgeklammert werden sollten. Als gut handhabbares und verständliches Maß werden 15 Faktoren als maximale Anzahl vorgeschlagen (GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 207). Aber auch 30 Faktoren lassen sich laut GAUSEMEIER ET AL. (1996, S. 211) noch gut handhaben – bei einer größtenteils automatisierten Analyse sind heute kaum Grenzen gesetzt. Weiterhin ist wichtig zu beachten, dass viele Schlüsselfaktoren nicht nur einen großen Arbeitsaufwand verursachen können, sondern auch zu einer Undurchsichtigkeit der erarbeiteten Szenarien führen können (GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 212).

Die Grundlage für die Auswahl der Schlüsselfaktoren ist bis zu diesem Punkt die „einfache“ Einflussmatrix. Innerhalb dieser Matrix befinden sich auch indirekte Beziehungen durch

die Beeinflussung von Faktoren über andere Faktoren hinweg. Für ein ausgeglichenes Bild ist es wichtig, vor der finalen Auswahl noch zu prüfen, ob Faktoren durch diesen Effekt über- oder unterbewertet werden. Mit Hilfe der MICMAC-Analyse<sup>14</sup> können diese indirekten Einflüsse angenähert werden und es wird eine angepasste Rangfolge der Einflussfaktoren erstellt. Die beiden Rangfolgen können sodann miteinander verglichen werden. Durch den Vergleich sind zwei Gruppen von Faktoren noch einmal zu evaluieren: die Faktoren, die durch die indirekte Einflussanalyse aus der Menge der Schlüsselfaktoren herausfallen (1), und die Faktoren, die hinzukommen (2). Für die Faktoren der ersten Gruppe gilt, diese könnten in der direkten Einflussanalyse „überbewertet“ worden sein. Dies ist im Rahmen der Analyse mit der Einschätzung der Projektgruppe zu überprüfen und der Faktor gegebenenfalls aus den Schlüsselfaktoren zu streichen. Für Einflussfaktoren der Gruppe 2 gilt, dass diese bisher versteckte Einflussfaktoren sein könnten. Hier gilt es vor der Aufnahme der Einflussfaktoren als Schlüsselfaktoren die Fragen zu klären, ob der Faktor auch nach Einschätzung der Projektgruppe in die Auflistung der Schlüsselfaktoren gehört. Dieser manuelle Schritt beendet die Analyse der Einflussfaktoren im engeren Sinne und eröffnet die Möglichkeit einer manueller Korrektur der Liste. Hierbei ist zu überprüfen, ob einzelne Schlüsselfaktoren noch ausgetauscht werden sollen, um die Aussagekraft zukünftiger Szenarien zu erhöhen. Jedoch sollten in diesem letzten Schritt nur marginale Anpassungen vorgenommen werden, um eine zu starke subjektive Färbung der Liste der Schlüsselfaktoren zu verhindern.

### 5.3.2 Trendprojektion

Die Ermittlung der Trendprojektionen ist entscheidend für die Qualität und Relevanz der Szenarien, denn hier werden die hypothetischen Entwicklungen der Zukunft erarbeitet. Bevor mit den Projektionen begonnen wird, werden die Schlüsselfaktoren mit Deskriptoren, also neutralen, beschreibenden Dimensionen, veranschaulicht. Hiermit beginnt der Prozess sich über die Dimensionen möglicher Projektionen klar zu werden und den Schlüsselfaktor in seiner Tragweite zu begreifen. Nachdem mit Hilfe der Deskriptoren der Ist-Zustand pro Schlüsselfaktor erarbeitet wurde, beginnen die Projektionen. Mögliche Entwicklungen werden pro Einflussbereich und über die Schlüsselfaktoren hinweg erarbeitet.

---

<sup>14</sup> Die MICMAC-Methode (Matrice d'Impacts Croisés – Multiplication Appliquée à un Classement) wurde in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt. Für eine detaillierte Darstellung der Methode siehe GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 197 und MIßLER-BEHR 1993, S. 67.

Dabei kann damit begonnen werden die Entwicklung sehr stark zu überzeichnen und damit die extremsten Entwicklungen des Schlüsselfaktors zu beschreiben. Als weiteren Schritt gilt es die Entwicklungen der Faktoren stark zu beschleunigen, sowohl die extremen als auch die Entwicklungen, die man sowieso erwartet. Als dritten Schritt gilt es über die Umfeldentwicklungen nachzudenken und diese mit Hilfe der Schlüsselfaktoren abzubilden. Dabei kann es vorkommen, dass für einzelne Deskriptoren eine eindeutige Entwicklung beschrieben wird. Entsprechend den ausgewählten Zeithorizonten für die Entwicklung der Szenarien werden mögliche alternative Entwicklungen für die Deskriptoren systematisch durchdacht. Aus den entstandenen Zukunftsprojektionen werden nun zwei oder drei geeignete Projektionen ausgewählt. Hierbei ist das Ziel den Raum der Entwicklungen möglichst vollständig abzudecken, also nicht nur Entwicklungen auszuwählen, die als „sehr wahrscheinlich“ und gut vorstellbar betitelt werden. Dies ist für den Stresstest von zentraler Bedeutung, da die Stressszenarien aus den „extremen“ und fast undenkbaren Zukunftsentwicklungen resultieren. GAUSEMEIER ET AL. (1996, S. 224) sprechen hier von Extrempjektionen, die das gesamte Feld der Zukunftsprojektion abbilden können.

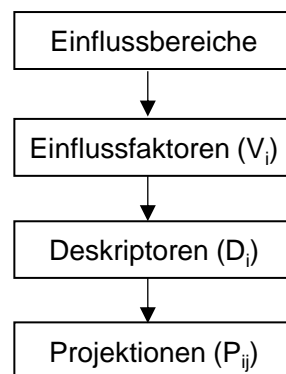


Abbildung 17: Hierarchische Beziehungen zwischen den Ausgangsgrößen (in Anlehnung an MIßLER-BEHR 1993, S. 24)

Die Trendprojektion wird abgeschlossen mit der Erläuterung der ausgewählten Projektion. Hierbei geht es auf der einen Seite um eine prägnante Benennung für ein einfaches Verständnis und auf der anderen Seite um eine eindeutige Erklärung zur Projektion, welche das Verständnis der Projektion erhöht. Das Ergebnis ist ein Katalog der Projektionen für alle Schlüsselfaktoren. Dieser bildet die Basis für die Entwicklung der Zukunftsszenarien.

In Abbildung 16 sind die Ausgangsgrößen für die Entwicklung der Szenarien – die Einflussbereiche, die Einflussfaktoren, die Deskriptoren und ihre Projektionen – in ihrer Hierarchie dargestellt.<sup>15</sup>

### 5.3.3 Entwicklung der Szenarien

Die Entwicklung von Szenarien basiert auf konsistenten, zueinanderpassenden Kombinationen der Zukunftsprojektionen. Pro Szenario kann eine Projektion je Schlüsselfaktor aufgenommen werden. Bei einer Anzahl von weniger als 15 Deskriptoren ist ein intuitives, gesprächsbasiertes Vorgehen möglich, um konsistente Kombinationen für die Szenarien zu entwickeln (REIBNITZ 1992, S. 49). Das intuitive Vorgehen kann dabei die Szenariobildung deutlich vereinfachen, birgt aber auch das Risiko, dass nur einseitige Perspektiven abgebildet werden. Für eine größere Anzahl an Deskriptoren wird eine Konsistenzmatrix als Hilfsmittel genutzt. Das schematische Vorgehen mit Hilfe der Konsistenzmatrix unterteilt sich in drei Schritte: die Konsistenzanalyse, die Bildung und Auswahl der Szenarien und die Beschreibung der ausgewählten Szenarien. Dieses Vorgehen wird in den folgenden Absätzen vorgestellt.

#### *Konsistenzanalyse*

Schrittweise wird in der Konsistenzanalyse die Frage beantwortet, ob zwei Projektionen in der Zukunft gemeinsam auftreten können. Dabei werden die Zukunftsprojektionen der Schlüsselfaktoren paarweise gebündelt und wird die Konsistenz der Vorstellung, ob diese Faktoren gemeinsam auftreten können und/oder inwiefern sich ihr Auftreten in der Zukunft bedingt, bewertet. Dabei kann auf der einen Seite erarbeitet werden, dass sich die beiden Zukunftsprojektionen widersprechen, also nicht gemeinsam auftreten werden. Demgegenüber steht die Erkenntnis, dass sich zwei Zukunftsprojektionen gegenseitig bedingen und mit dem Eintritt einer Projektion im Zusammenhang mit der anderen gerechnet werden kann. Diese eindeutigen Zusammenhänge existieren nicht zwischen allen Pro-

---

<sup>15</sup> Es wird dabei von  $m$  Deskriptoren ( $D_1, \dots, D_m$ ) ( $m \leq q$ ) mit  $n_i, i=1, \dots, m$  Projektionen ( $P_1, \dots, P_n$ ) ausgegangen und  $n$  ist die Gesamtzahl der Projektionen. Für die exakte Zuordnung der Projektionen zu den Deskriptoren wird eine Doppelindizierung gewählt. Die  $j$ -te Projektion,  $j=1, \dots, n_i$ , des  $i$ -ten Deskriptors,  $i=1, \dots, m$  wird angegeben mit:  $P_{ij}$  mit  $i \in \{1, \dots, m\}$   $D_{j \in \{1, \dots, n_i\}}$

jektionspaaren, sondern diese können auch neutral zueinander sein oder die Aussagen können nur tendenziell getroffen werden. Die einseitige Konsistenzmatrix ist in Abbildung 18 dargestellt.

	$P_{11}, P_{12}, P_{21}, \dots$
Projektion $P_{11}$ Projektion $P_{12}$ Projektion $P_{21}$ ...	$k_{ij}$

Abbildung 18: Konsistenzmatrix

Der paarweise Vergleich wird mit einer fünfstufigen Bewertungsskala durchgeführt:

- $k_{ij} = 1$  Widerspruch, d.h., die beiden Projektionen treten in der Zukunft nicht zusammen auf und schließen einander aus
- $k_{ij} = 2$  partieller Widerspruch, d.h., die beiden Projektionen widersprechen sich teilweise und führen eher zu einem inkonsistenten Bild der Zukunft
- $k_{ij} = 3$  Unabhängigkeit, d.h., die Projektionen beeinflussen einander nicht und sie können gleichzeitig in der Zukunft auftreten
- $k_{ij} = 4$  gegenseitiges Begünstigen, d.h., die Projektionen begünstigen sich gegenseitig und ein gemeinsames Auftreten ist gut denkbar
- $k_{ij} = 5$  starkes Begünstigen, d.h., die Projektionen treten in einem Zukunftsbild gemeinsam ein, sie bilden ein sehr konsistentes Paar für ein Szenario

Mit Hilfe von theoretische Bündeln der Projektionen wird ein theoretischer Katalog mit möglichen Szenarien gebildet, diese Bündel von Projektionen werden Rohszenarien genannt. Die Lösung dieses kombinatorischen Problems muss im Fall einer großen Anzahl von Schlüsselfaktoren automatisiert erfolgen, da der Aufwand für eine händische Erarbeitung zu groß ist (vgl. S. 5.3.2). Formal kann nach MIßLER-BEHR (1993, S. 94-95) ein Rohszenario (RS) als ein  $m$ -Tupel der  $m$  Deskriptoren, indiziert mit der jeweilig eintretenden Projektion, beschrieben werden:

$$S = (1_{i_1}, 2_{i_2}, 3_{i_3}, \dots, m_{i_m}) \quad (5-5)$$

mit  $i_1 \in \{1, \dots, n_1\}$

$i_2 \in \{1, \dots, n_2\}$

$i_3 \in \{1, \dots, n_3\}$

...

$i_m \in \{1, \dots, n_m\}$

$S$  = Menge aller möglichen Szenarien. Es gilt:

$$|S| = \prod_{i=1}^m n_i \quad (5-6)$$

Für die Bildung der Tupel kann die Software Origin® benutzt werden. Ein theoretischer Katalog ist in Abbildung 19 dargestellt.

Für die Reduktion der Anzahl möglicher Zukunftsszenarien werden die Rohszenarien nach absteigenden Konsistenzwerten sortiert. Der Konsistenzwert eines Rohszenarios wird aufsummiert über die Konsistenzwerte aller im Rohszenario enthaltenen Projektionspaare.

$$KS = \sum_{\substack{i,j \in S \\ i < j}} k_{ij} \quad (5-7)$$

$KS$  = Konsistenzsumme eines Szenarios

$k_{ij}$  = Konsistenzzahl zwischen der  $i$ -ten und  $j$ -ten Projektion

Als zweiter Wert wird die Anzahl der partiellen Widersprüche einbezogen, denn enthält ein Szenario eine große Menge partiell widersprüchlicher Projektionsbündel, so wird ein zukünftiger Zustand, der diesem Szenario entspricht, immer unglaubwürdiger. Als Zwischenergebnis entsteht hier ein vorläufiger Projektionsbündelkatalog.

Rohszenario	Projektionen				Konsistenzwert	Anzahl partieller Inkonsistenzen
Rohszenario RS <sub>1</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>21</sub>	...	P <sub>m1</sub>	56	5
Rohszenario RS <sub>2</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>21</sub>	...	P <sub>m1</sub>	55	4
Rohszenario RS <sub>3</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>22</sub>	...	P <sub>m1</sub>	55	6
Rohszenario RS <sub>4</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>22</sub>	...	P <sub>m1</sub>	54	5
...	...	...	...	...	...	...
Rohszenario $RS_{\prod_{i=1}^m n_i}$	P <sub>1ni</sub>	P <sub>2ni</sub>	...	P <sub>mni</sub>	...	...

Abbildung 19: Beispiel für einen vorläufigen Katalog über mögliche Rohszenarien

### Clusteranalyse

Der Katalog mit den vorläufigen Projektionsbündeln dient als Grundlage für eine Clusteranalyse. Das Ziel der Clusteranalyse ist sogenannte Grundlagenszenarien zu erstellen. Die Grundlagenszenarien entstehen mit Hilfe der Clusteranalyse, indem ähnliche Projektionsbündel in Clustern zusammengefasst werden. Jedes Clustern bildet die Grundlage für ein Rohszenario – dabei ist ein Rohszenario eine analytisch-mathematische Zusammenstellung von Projektionsbündeln, die sich stark ähneln. Für die Clusteranalyse wird zur Bestimmung der Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit von jeweils zwei Rohszenarien ein binäres Proximitätsmaß genutzt.

$$\frac{u}{2a + u} \tag{5-8}$$

$u$  = Anzahl der Projektionen, die nur in einem der beiden Rohszenarien vorkommen

$a$  = Anzahl der Projektionen, die in beiden Rohszenarien vorkommen

Basierend auf der Berechnung wird die Clusteranalyse durchgeführt. Die Clusteranalyse wird mit Hilfe der Software SPSS® vorgenommen. Auf das Vorgehen der Clusteranalyse wird an dieser Stelle nicht detaillierter eingegangen, da es sich um ein Standardverfahren



der multivariaten Analyseverfahren handelt.<sup>16</sup> In Abbildung 20 ist ein beispielhaftes Ergebnis einer Clusteranalyse mit Hilfe einer Matrix auf Basis der multidimensionalen Skalierung dargestellt.

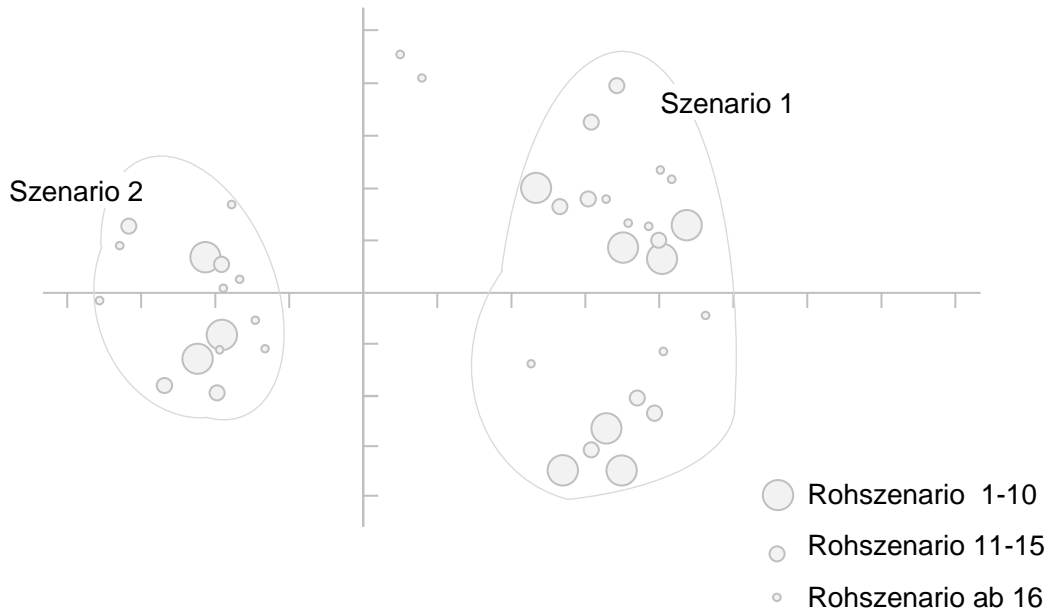


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Ergebnisses einer Clusteranalyse als multidimensionale Skalierung

Die hierarchische Clusteranalyse wird mit dem Complete-Linkage-Verfahren<sup>17</sup> durchgeführt, sodass Rohszenarien mit einer ähnlichen Anzahl Projektionsbündel entstehen (GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 276). Die Gütekriterien für die Festlegung der Partition sind abhängig vom Anwendungsfall zu bestimmen.<sup>18</sup>

Basierend auf dem Ergebnis der Clusteranalyse erfolgt die Erarbeitung der Szenarien. Das Ziel ist, aus den Rohszenarien in sich konsistente, stabile und unterschiedliche Szenarien

<sup>16</sup> Die Clusteranalyse wird in den folgenden Werken detailliert beschrieben: BACKHAUS ET AL. 2018, S. 435-496, ECKEY ET AL. 2002, S. 203-289, RUDOLF & MÜLLER 2012, S. 287-290. Die Clusteranalyse für die Szenarioanalyse wird in GAUSEMEIER ET AL. 1996, S. 273-288 angewendet.

<sup>17</sup> Das Average-Linkage-Verfahren für die hierarchische Clusteranalyse wird in den folgenden Werken detailliert beschrieben: BACKHAUS ET AL. 2018, S. 435-496, ECKEY ET AL. 2002, S. 203-289, RUDOLF & MÜLLER 2012, S. 287-290. Eine Alternative bildet für den Stresstest auch das Single-Linkage-Verfahren, falls die Ergebnisse mit dem Average-Linkage-Verfahren nicht zu interpretieren sind und zu einem Vertrauensverlust bei den Anwender\*innen führen.

<sup>18</sup> Für mehr Informationen über die Gütekriterien, die bei der Partitionsfestlegung in der Szenarioanalyse genutzt werden können, wird auf MIBLER-BEHR (1993) verwiesen.

zu entwickeln. Pro Rohszenario werden die Schlüsselfaktoren und ihre Projektionen ausgewählt, die für die Beschreibung am aussagekräftigsten sind. Die Erarbeitung ist eine Diskussion, in der sich in iterativen Schleifen vorgearbeitet werden kann. Diese Stelle ist zentral für die Entwicklung der Szenarien. Die Basis sind die Ergebnisse der Analyse. Diese werden in einen kreativen Prozess zur Erarbeitung der Szenarien überführt. Ein Schema für die Beschreibung der Szenarien ist in Abbildung 21 visualisiert.

<b>Name des Szenarios</b>			
Einflussfaktoren mit ihren Projektionen			
V <sub>1</sub>	Einflussfaktor		
D <sub>2</sub>	Deskriptor	P <sub>1,1</sub>	Beschreibung
V <sub>4</sub>	Einflussfaktor		
D <sub>10</sub>	Deskriptor	P <sub>10,2</sub>	Beschreibung
V <sub>5</sub>	Einflussfaktor		
D <sub>11</sub>	Deskriptor	P <sub>11,1</sub>	Beschreibung
V <sub>8</sub>	Einflussfaktor		
D <sub>16</sub>	Deskriptor	P <sub>16,3</sub>	Beschreibung
Beschreibende des Szenarios			
Zusammenfassung der hypothetischen Zukunftsprojektion in einem Absatz, die beschreibt, was diese Entwicklung ausmacht.			
Detaillierte Beschreibung in Stichpunkten:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ....</li> </ul>			

Abbildung 21: Schema für die Beschreibung der Umfeldszenarien

Für die Anwendung der Szenarioanalyse in der Praxis hat sich die Entwicklung der Szenarien in einer eher intuitiven Form, z.B. in Form von Workshops, als sehr erfolgreich erwiesen – eine automatisierte Auswertung der Konsistenzanalyse und die Clusteranalyse sind nicht unbedingt notwendig (REIBNITZ 1992, S. 53). Die Auswahl zwischen intuitivem und analytischem Vorgehen sollte abhängig vom Anwendungsfall entschieden werden. Die Szenarien bilden die Zukünfte ab, die das Unternehmen im Rahmen des Stresstests untersucht wird.

## 5.4 Entwicklung der Belastungsszenarien

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, werden mit Hilfe der Umfeldszenarien die multiplen Zukünfte beschrieben, welche für ein Unternehmen vorstellbar sind. Mit diesen Szenarien ist die Grundlage für den Stresstest gelegt. Eine Übertragung der Szenarien auf das Produktionssystem, um die Belastung des Systems zu überprüfen, ist der nächste Schritt für den Stresstest. Die übertragenen Szenarien sind die Belastungsszenarien, und mit der Anwendung der Belastungsszenarien werden anschließend die Auswirkungen, welche die multiplen Zukunftsszenarien für die Produktion haben, untersucht.

Die Anwendung der Szenarien auf das Produktionssystem erfordert die Beschreibung der Szenarien mit Hilfe von direkten Einflussfaktoren für das Produktionssystem. Die Einflussfaktoren für das Produktionssystem werden nicht individuell entwickelt, sondern durch die Größen des Rezeptormodells vorgegeben. Wie in Abbildung 22 beschrieben, sind die Rezeptoren die Schlüsselfaktoren für das Produktionssystem, die Planungsgrößen sind damit die Deskriptoren und die Projektion wird entsprechend für die einzelnen Deskriptoren vorgenommen.

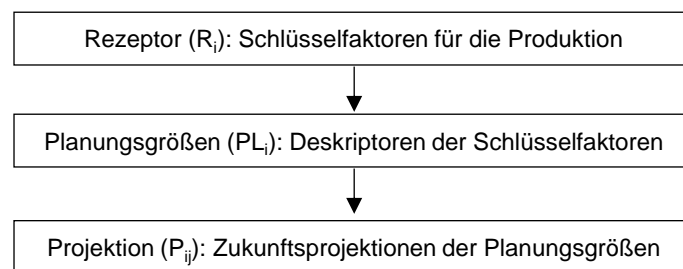


Abbildung 22: Hierarchische Beziehungen zwischen den Ausgangsgrößen der Belastungsszenarien des Produktionssystems

Die Belastungsszenarien werden mit Hilfe des Rezeptormodells entwickelt. Die Entwicklung der Belastungsszenarien erfolgt nicht mit einer losgelösten explorativen und induktiven Szenarioanalyse, sondern die Belastungsszenarien werden aus den bereits entwickelten Umfeldszenarien abgeleitet. Der Zusammenhang zwischen den Umfeldszenarien und den produktionsspezifischen Belastungsszenarien wird schematisch in Abbildung 23 dargestellt.

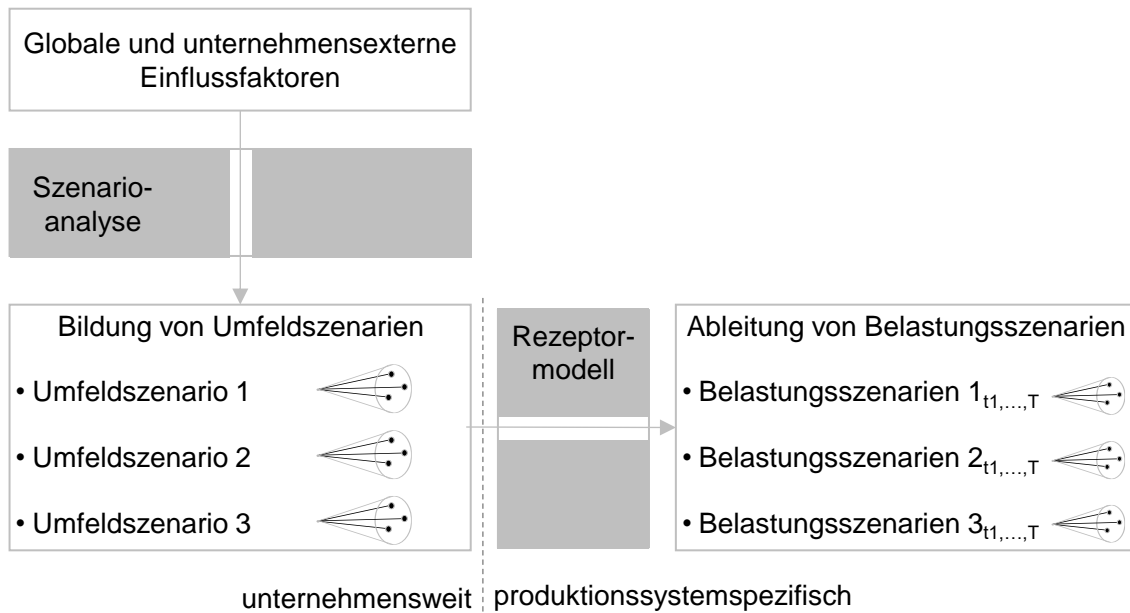


Abbildung 23: Vorgehen zur Entwicklung von Belastungsszenarien

Die Tragweite des Szenarios für das Produktionssystem wird abgeleitet. Die Übertragung der strategischen Größen auf das Produktionssystem vereint die strategische Sichtweise mit der operativen Sichtweise und kann so die Frage beantworten, was die einzelnen Umfeldszenarien für das Produktionssystem bedeuten. Die Umfeldszenarien werden gewissermaßen interpretiert oder ergänzt.

In Abbildung 24 ist das Zukunftsszenario in seiner typischen Trichterform dargestellt. Das Vorgehen der Ableitung von Belastungsszenarien ähnelt einer erweiterten Szenarioanalyse in Form eines Gedankenexperimentes. Der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Belastungsszenarien ist die Zukunft der Umfeldszenarien – von diesem Zeithorizont aus wird deduktiv gearbeitet. Der Ausgangspunkt dieser Betrachtung ist das jeweilige zukünftige Szenario. Für die Belastungsszenarien wird weiterhin der Prozess, also die Entwicklung zu diesem Szenario, einbezogen – da diese für die Produktion eine laufende oder plötzliche Veränderung darstellt, die es zu bewältigen gilt.

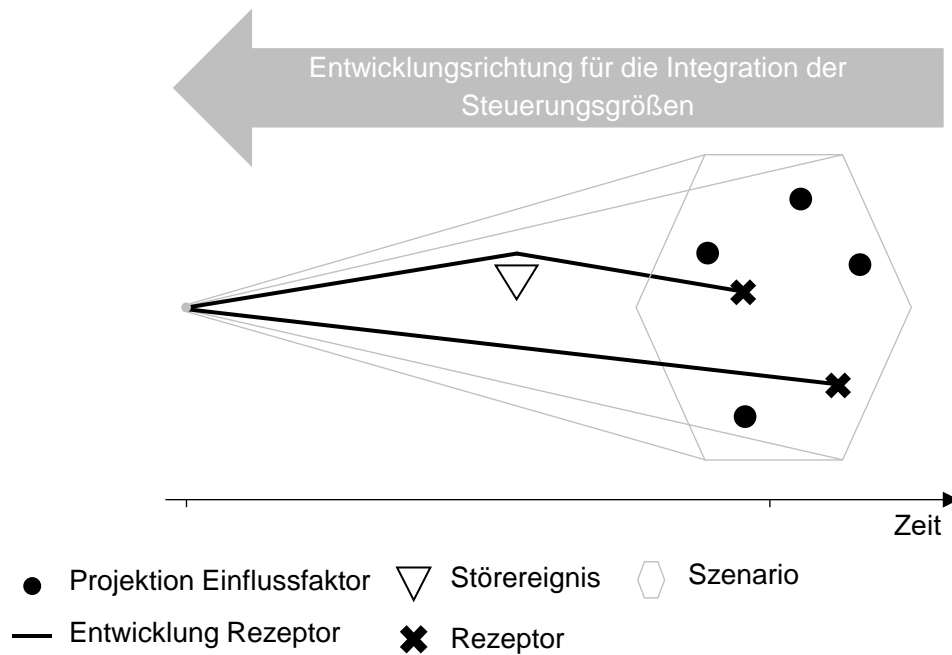


Abbildung 24: Integration der Steuergrößen (in Anlehnung an MIßLER-BEHR 1993, S. 4)

Für die Ableitung der Belastungsszenarien werden im ersten Schritt die Rezeptoren in die Umfeldszenarien integriert. Damit werden die Umfeldszenarien um Projektionen der Rezeptoren ergänzt. Anschließend wird die notwendige Entwicklung, welche die Rezeptoren zur Projektion durchlaufen, abgeleitet. Sodann werden die Störereignisse und Dynamiken herausgearbeitet. Abschließend werden die Belastungsszenarien für die Produktion abgeleitet. Das Vorgehen zur Entwicklung der Belastungsszenarien wird in Abbildung 25 dargestellt.

Vor der Ableitung der Testszenarien aus den Zukunftsszenarien ist zu klären, ob die jeweiligen Zukunftsszenarien eine Implikation für das Produktionssystem haben. Im Regelfall der produzierenden Industrie wird dieser Umstand gegeben sein. Sollte doch ein Zukunftsszenario entstanden sein, welches für die Produktion keine Implikation oder Bewandtnis hat, wird dieses Szenario für den Stresstest von Produktionssystemen nicht weiterverfolgt. In den folgenden Kapiteln wird das Vorgehen detailliert beschrieben.

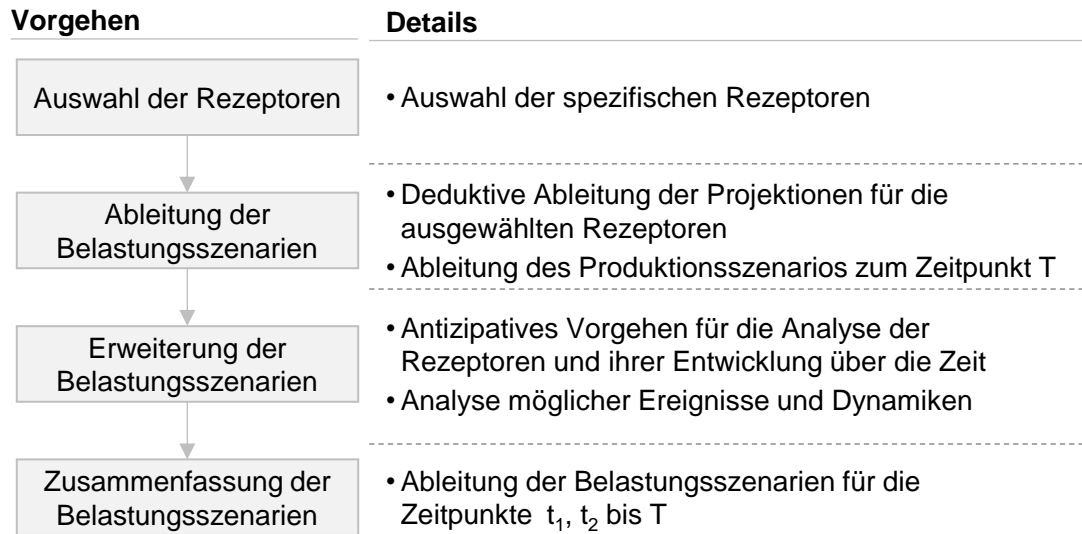


Abbildung 25: Vorgehen für die Ableitung der Belastungsszenarien

#### 5.4.1 Auswahl und Beschreibung der Rezeptoren

Für die Entwicklung der Belastungsszenarien sollen die Auswirkungen, welche die externen Einflüsse der Szenarien auf das Produktionssystem haben können, untersucht werden. Für das Vorgehen in dieser Arbeit wird das Rezeptormodell genutzt, da alle Veränderungen durch äußere Einflüsse mit Hilfe der Rezeptoren auf die Produktion übertragen werden können (WONSAK ET AL. 2021). Wie in Tabelle 5 aufgezeigt, werden die sieben Hauptrezeptoren weiter in Planungsgrößen detailliert.

Die Auswahl der aktivierten Rezeptoren pro Szenario ist der erste Schritt zur Erarbeitung der Belastungsszenarien. Dabei gilt es die Relevanz der Planungsgrößen pro Szenario zu erfassen und entsprechend auszuwählen. Damit wird eine Auflistung der Rezeptoren bereitgestellt, mit denen das jeweilige Szenario für die Produktion beschrieben wird.

Tabelle 5: Rezeptoren mit den Planungsgrößen der Produktion

Rezeptor	Planungsgrößen der Produktion	
Quantität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt Stückzahl</li> <li>• Prozesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitarbeitende</li> <li>• Betriebsstätten und -mittel</li> </ul>
Produkt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Struktur</li> <li>• Form</li> <li>• Material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberflächen</li> <li>• Design und Farbe</li> </ul>
Qualität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt</li> <li>• Prozess</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeitsleistung</li> <li>• Logistik</li> </ul>
Zeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organisation</li> <li>• Prozess</li> <li>• Prüfung und Nacharbeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport und Wiederbeschaffung</li> <li>• Verteilzeiten und Stillstand</li> </ul>
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material, Werkstoffe</li> <li>• Mitarbeitende, Lohn und Gehalt</li> <li>• Equipment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Service</li> <li>• Gesellschaft</li> </ul>
Technologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkt</li> <li>• Produktion</li> <li>• Material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Information/IT</li> <li>• Logistik</li> </ul>
Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regularien und Gesetze</li> <li>• Verfügbarkeit von Mitarbeitenden</li> <li>• Materialverfügbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dienstleistungsverfügbarkeit</li> <li>• Informationsverfügbarkeit</li> </ul>

#### 5.4.2 Ableitung der Belastungsszenarien

Auf Basis der Auflistung wird das Belastungsszenario abgeleitet. Hierfür wird für jede ausgewählte Planungsgröße eine Projektion erstellt, welche zum jeweiligen Umfeldszenario passt. Die Ableitung der Belastungsszenarien erfolgt damit deduktiv, wobei die Umfeldszenarien den Rahmen für die Zukunftsbilder vorgeben und die Projektionen der Planungsgrößen in dieses Zukunftsbild integriert werden. Für den Stresstest sind die Projektionen (auch Ausprägungen) der Planungsgrößen eine Konsequenz aus den Umfeldszenarien. Aus

diesem Grund werden Belastungsszenarien deduktiv abgeleitet. Dabei werden mit Hilfe der Rezeptoren und Planungsgrößen die externen Einflüsse der Szenarien auf das Produktionssystem übertragen. Die Projektionen sind so abzuleiten, dass ein widerspruchsfreies Bündel an Projektionen für jedes Szenario entsteht, welches den Zustand des Produktionssystems für das Eintreten dieses zukünftigen Zustands beschreibt. Diese Bündel enthalten folglich nicht alle Planungsgrößen, sondern nur diejenigen, die sich aus dem Zukunftsszenario eindeutig ergeben. Die Erarbeitung der Projektionsbündel zeigt auf, wie die Szenariozukunft für das Produktionssystem eingeschätzt wird und welche Entwicklungen der Planungsgrößen zwangsläufig mit dem Szenario einhergehen. Die Projektionen können qualitativ sein und sind für einen hypothetischen zukünftigen Zustand zu beschreiben, über den noch nicht alle Informationen vorliegen. Zum Beispiel für eine Produktionserweiterung ist die Planungsgröße *Quantität von Prozessen* auszuwählen. Es wird für das Belastungsszenario eine Erweiterung des Produktionssystem abgeleitet, es muss aber noch lange nicht in den Informationen enthalten sein, wo und wie diese realisiert wird. Das Zwischenergebnis ist ein Belastungsszenario zum Zeitpunkt T, dem Eintrittszeitpunkt des Umfeldszenarios. Im Anschluss wird dieses Zukunftsbild analysiert, um zu erarbeiten, was geschehen muss, damit das Belastungsszenario eintritt. Diese Analyse wird im folgenden Kapitel beschrieben.

### 5.4.3 Analyse und Erweiterung der Belastungsszenarien

Die Belastungsszenarien sind die Voraussetzung für die Durchführung des Stresstests. Die stressvollen Belastungsszenarien bilden die Einflüsse ab, die das Produktionssystem auf dem Weg in die Zukunft treffen kann. Hierzu wird antizipativ vorgegangen, da pro Szenario mögliche Ereignisse, die auftreten können, identifiziert werden. Weiterhin werden die möglichen Dynamiken und Risiken, die mit diesen Ereignissen einhergehen, erarbeitet. Ein Schema, um die Dynamik von Führungsgrößen mit ihren dazugehörigen Strukturbrüchen und Ereignissen zu beschreiben, nutzt MÖLLER (2008) zur Erstellung von sogenannten qualitativen Umfeldprofilen. Die Belastungsszenarien greifen Elemente dieses Schemas auf. Für die Entwicklung wird es erweitert und im Folgenden wird ein entsprechendes systematisches Vorgehen vorgestellt. So werden systematisch die möglichen Belastungen und Aufgaben des Produktionssystems für das Eintreten der Szenarien analysiert.



Für jedes Belastungsszenario zum Zeitpunkt T werden die Projektionen der Planungsgrößen untersucht. Hierfür sind zwei Analyseschritte vorgesehen: die Identifikation von spezifischen Ereignissen, die zur Entwicklung gehören, und die Analyse der Dynamik der Entwicklungen. Diese sind detaillierter in den folgenden Absätzen beschrieben.

### *Identifikation der Ereignisse*

In einem ersten Schritt werden die Steuerereignisse und -anlässe identifiziert (vgl. hierzu auch Abbildung 24). Anschließend werden die zugehörigen Dynamiken analysiert. REIBNITZ (1992, S. 59) stellt eine Störereignisanalyse als Teilschritt der Szenarioanalyse vor, um plötzlich auftretende externe Ereignisse zu sammeln, ihre Bedeutung zu bewerten und möglich Maßnahmen zum Umgang zu ermitteln. Für die Belastungsszenarien im Stresstest wird dieses Vorgehen auf die Identifikation von internen „Ereignissen“, welche bei der Entwicklung der Planungsgrößen bedacht werden müssen, übertragen. Hierzu zählen alle Arten von Ereignissen, wie plötzliche Entwicklung und Veränderungen, sowie Auslöser für Veränderungen, weiterhin alle Arten von Wendepunkten der Führungsgrößen, die eine Anpassung oder Veränderung auslösen können. Während der Analyse sind auf der einen Seite Störungen, die durch äußere Veränderungen ausgelöst werden, und auf der anderen Seite Steuerereignisse, die für den Umgang mit äußeren Veränderungen veranlasst werden, zu beachten. Diese Ereignisse sind für den Stresstest als Belastungen in Betracht zu ziehen. Der Stresstest arbeitet mit extremen hypothetischen Ereignissen, deswegen werden hier alle Arten von internen Ereignissen gesammelt, die im Rahmen des Szenarios auftreten können (REIBNITZ 1992, S. 61), auch wenn diese aus Sicht der Produktion als unwahrscheinlich eingeschätzt werden. Diese Analyse ermöglicht die Schwachstellen eines Unternehmens zu erkennen, da so neben einfachen Kausalbeziehungen auch Muster und Wiederholungen identifiziert werden können. Eine solche Störereignisanalyse dient dazu Schwachstellen des Systems erkennen zu können (REIBNITZ 1992, S. 62). Beispiele für diese zu identifizierenden Ereignisse sind eine Produkteinführung, der Wechsel zwischen Fertigungstechnologien, der Neustart eines Produktions- oder Fertigungsprozess, das Inkrafttreten einer Regulierung und die Einführung einer neuen Software, um nur einige zu nennen. Das Ergebnis für die Analyse der Rezeptoren ist eine Auflistung zur Entwicklung des Belastungsszenarios gehörender Produktionsereignisse. Nachfolgend werden Informationen zur Dynamik der Projektionen ergänzt. Das Vorgehen zur Analyse der Dynamik wird im nächsten Unterkapitel beschrieben.

### *Analyse der Dynamik*

Unter Dynamik werden die Änderungen der Rezeptoren über die Zeit verstanden (angelehnt an MÖLLER 2008, S. 95). Diese wird für jede Projektion analysiert. Dafür werden die Änderungen, die die Planungsgröße vom Startzeitpunkt der Betrachtung bis zum Erreichen des Zeitpunktes T des Belastungsszenarios durchläuft, beschrieben. Skizziert wird, ob eine kontinuierliche oder eine diskrete Entwicklung des Faktors zu erwarten ist oder mit einer Mischform gerechnet werden muss. Für kontinuierliche Entwicklungen ist weiter zu determinieren, wie schnell diese voranschreiten werden, mit welchen Wendepunkten im Laufe der Zeit zu rechnen ist und welche Volatilitäten auftreten können. Darüber hinaus sind die identifizierten Veränderungsereignisse, welche den Beginn einer Entwicklung kennzeichnen oder am Ende einer Entwicklung stehen, zuzuordnen. Zur Vereinfachung der Beschreibung der Dynamik werden für die Belastungsszenarien Zeitperioden ausgewählt, die das Belastungsszenario in einzelne Zeitscheiben unterteilen. Die Länge der Zeitscheiben hängt von dem Zeithorizont des Szenarios und dem Detailgrad des Stresstests ab. Für ein Belastungsszenario, welches eine mögliche Zukunft T in fünf Jahren beschreibt, können z.B. Unterszenarien pro Jahr mit  $t_1, \dots, t_4$  gebildet werden. Damit würden zusätzlich zum Hauptbelastungsszenario vier Unterszenarien entstehen, die jeweils die Entwicklungen pro Jahr beschreiben. Die zusätzlichen Erkenntnisse durch diese Analyse werden weiterhin mit den vorherigen Ergebnissen zusammengefasst.

#### 5.4.4 Zusammenfassung der Belastungsszenarien

Die Szenarien, mit denen der Stresstest für ein Produktionssystem durchgeführt werden soll, ergeben sich aus einzelnen Belastungsprofilen, die aus der vorhergehenden Analyse entstehen. Die erarbeiteten Veränderungsereignisse und die Dynamiken werden mit den Projektionen zu Belastungsszenarien zusammengefasst. Ein schematischer Auszug eines Belastungsszenarios ist in Abbildung 26 dargestellt.

Ein Belastungsszenario zum Zeitpunkt T kann wie oben beschrieben mit mehreren Unterszenarien auftreten. Die identifizierten Ereignisse können so einer zeitlichen Struktur zugeordnet werden und die Dynamiken der Entwicklungen über die Zeit genauer beschrieben werden. Jedes Unterbelastungsszenario stellt eine Zeiteinheit zwischen der Szenario-zukunft und dem heutigen Zustand dar, in welcher bestimmte Veränderungen, Ereignis-

nisse und Dynamiken erwartet werden. Die Übertragung der hypothetischen Umfeldszenarien auf Belastungsszenarien ist hiermit abgeschlossen. Auf Basis der Belastungsszenarien erfolgt die Risikobeurteilung, welche in den nächsten Kapiteln vorgestellt wird.

Planungsgröße	Projektion	Ereignisse	Dynamik
QNT Produkt Stückzahl	Produkt A: 6000 #		stetig, stark steigend, volatil übers Jahr
Z Prozess	Fertigung mit verkürzter Durchlaufzeit	Umstellung auf Bearbeitungszentrum	Mehrere Einzelereignisse innerhalb eines Jahres
P Material	Produkt A wird nur in Variante mit Kunststoffgehäuse gefertigt	Einführung neues Kunststoffgehäuse	Mehrere Einzelereignisse über den gesamten Zeithorizont
G Regulatorien	Neue Prüfstandards für Elektrokomponenten	Inkrafttreten Dokumentationspflicht	Einzelereignis
K Material	Gestiegene Marktpreise für Zukauf von Halb- und Fertigerzeugnissen	Qualitätsinitiative für weniger Ausschuss	Mehrere Einzelereignisse

P: Produkt Z: Zeit QNT: Quantität K: Kosten G: Gesellschaft

Abbildung 26: Schematische Darstellung eines Auszugs für ein Belastungsszenario

## 5.5 Auswirkungsanalyse und Beurteilung der Risiken

Die Stressbeurteilung erfolgt auf Basis einer Risikobeurteilung. So wird erarbeitet, welche Risiken entstehen können und wie schwerwiegend diese für das Unternehmen sind. Ob die potentiellen Risiken vom Produktionssystem getragen oder kompensiert werden können, ist der zentrale Indikator für den Stresstest. Für die Beurteilung der Risiken wird auf Methoden des Risikomanagements zurückgegriffen. Die Stresstestung beginnt mit der qualitativen Beurteilung der Risiken. Diese wird in drei Schritten durchgeführt: Als Erstes werden die Risiken, die durch die Szenarien ausgelöst werden, identifiziert und analysiert, als Zweites wird eine Bewertung und Priorisierung vorgenommen und als Drittes werden die Korrelationen der Risiken untereinander analysiert.

Für die Umsetzung in der Praxis ist anzumerken, dass die Risikobeurteilung eng verknüpft mit der Entwicklung der Belastungsszenarien sein wird, da die Identifikation von Risiken in den Expertenworkshops automatisch während der Beschreibung der Belastungsszenarien aufgegriffen werden kann.

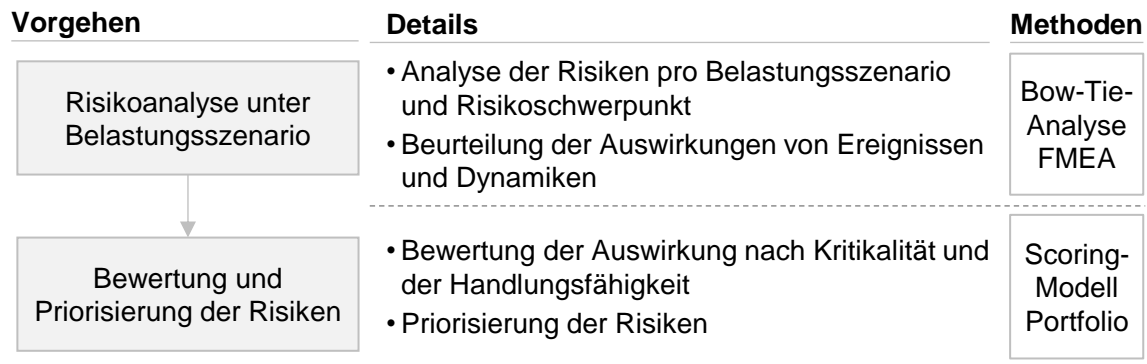


Abbildung 27: Vorgehen zur Beurteilung der Risiken

### 5.5.1 Risikoidentifikation und -analyse

Die Risikoidentifikation und -analyse baut direkt auf die entwickelten Belastungsszenarien auf. Pro Belastungsszenario werden die negativen Auswirkungen für das Produktionssystem systematisch identifiziert bzw. ergänzt. Die Identifikation der Risiken erfolgt hier erst einmal qualitativ (ROMEIKE & HAGER 2009, S. 36). Dabei geht es darum Risiken zu beschreiben, die eintreten könnten, wenn ein Belastungsszenario zur Realität wird.

Für diesen Prozess wird ein gängiges Instrument der Risikoanalyse zur Hilfe genommen werden – die Bow-Tie-Analyse.<sup>19</sup> Die Analyse wird genutzt, um die Ursachen und Wirkungen von Risiken zu identifizieren. Die Methode vereint verschiedene Identifikations- und Analysemethoden, wie die Fehlerbaumanalyse, Ereignisbaumanalyse und Ursache-Wirkungs-Diagramme, in sich und eignet sich sehr gut für die Anwendung im Produktionskontext (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 325). Sie unterstützt eine strukturierte Darstellung dieser Zusammenhänge, wie in Abbildung 28 veranschaulicht wird. An dieser Stelle im Stresstest sind die Ursachen in Form von externen Einflüssen und Belastungsszenarien bereits erarbeitet. Der Eintritt des Risikoereignisses ist im Stresstest das Eintreten des Belastungsszenarios. Innerhalb des Vorgehens ist folglich der rechte Teil, nämlich die Auswirkungen des Belastungsszenarios, zu erarbeiten.

<sup>19</sup> Bow tie (engl.) = Fliege. Die Analyse hat ihren Namen basierend auf einem für sie symbolischen Bild, welches aussieht wie eine Fliege, wobei damit eine als Querschleife gebundene Krawatte gemeint ist (DUDENREDAKTION O.J.A, ROMEIKE 2018, S. 74-75). Mit dem Bild wird der Zusammenhang von Ursachen, Ereignissen und Auswirkungen von Risiken schematisch dargestellt.

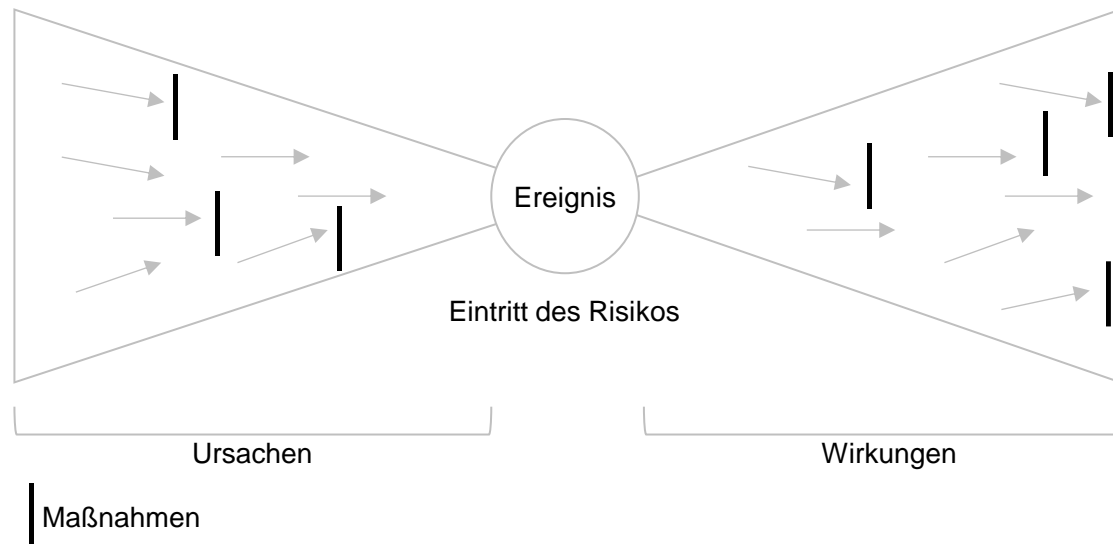


Abbildung 28: Schematische Grundlage für eine Bow-Tie-Analyse (in Anlehnung an ROMEIKE 2018, S. 75)

Für die Belastungsszenarien sind die identifizierten Ereignisse, Auslöser und Dynamiken als mögliche Auslöser für Risiken innerhalb des Produktionssystems zu sehen. Der Eintritt des Risikos selbst wird als „Top Event“ verstanden (ROMEIKE 2018, S. 75). Auf der rechten Seite des „Top Events“ werden die unerwünschten Auswirkungen gesammelt, welche eintreten können. Dabei kann jede Abweichung von der erfolgreichen „Erfüllung“ des Belastungsszenarios als Risiko betrachtet werden. Das Schema zur Analyse der Risiken und Auswirkungen ist in Abbildung 29 aufgezeigt.

Planungsgröße	Ereignisse	Dynamik	Risikoauswirkung	KR	HF
Z Prozess	Umstellung auf Bearbeitungszentrum	Mehrere Einzelereignisse innerhalb eines Jahres	Qualitätsrisiko, führt zu erhöhtem Ausschuss	3	2
P Material	Einführung neues Kunststoffgehäuse	Mehrere Einzelereignisse über den gesamten Zeithorizont	Prozessrisiko, verlängerte und volatile Durchlaufzeit, Ressourcenbindung in der AV und Mgmt.	2	3
G Regulatorien	Inkrafttreten Dokumentationspflicht	Einzelereignis	Erhöhte Durchlaufzeit, steigende Fertigungskosten	4	4
K Material	Qualitätsinitiative für weniger Ausschuss	Mehrere Einzelereignisse	Ablaufstörungen, erhöhte Durchlaufzeit	1	2
<b>Summe</b>				<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Durchschnitt</b>				<b>2,5</b>	<b>2,75</b>

P: Produkt Z: Zeit QNT: Quantität K: Kosten G: Gesellschaft

Abbildung 29: Ursachen, Ereignisse und Auswirkungen für ein Belastungsszenario in tabellarischer Übersicht ( in Anlehnung an ROMEIKE 2018, S. 78)

Das Ergebnis in Form einer Tabelle oder von Diagrammen wird für jedes Belastungsszenario und auch die dazugehörigen Unterszenarien erstellt. Den Fokus bilden auch für diesen Schritt die ausgewählten Risikoschwerpunkte, wobei während der Analyse durchaus Auswirkungen außerhalb des Einwirkungsbereichs der Produktion erarbeitet werden können. Diese werden als Teil der Ergebnisse gleichermaßen aufgenommen. Die Auswirkungsanalyse kann durch die Anwendung von qualitativen und quantitativen Methoden, wie z.B. einer FMEA, Fehlerbaum- und Ereignisanalyse, Ablaufsimulationen oder anderen, unterstützt werden. Eine FMEA sollte für komplexe Produktionssysteme ergänzend durchgeführt werden. Zur weiteren systematischen Unterstützung wird die FMEA<sup>20</sup> zur Hilfe genommen. Die kritischen Prozesse werden mittels der Analyse untersucht – eine Prozess-FMEA, welche den Fokus auf die Untersuchung der Produktionsprozesse legt, kann hierfür genutzt werden (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 317). Durch den Einsatz der FMEA kann ein zusätzlicher Mehrwert für die Dokumentation, Bewertung und Steuerung der Risiken geschaffen werden, besonders kann der Kommunikationsprozess zusätzlich systematisch unterstützt werden (ROMEIKE 2018, S. 87). Je nach Risikoschwerpunkt und Szenario ist auch die Nutzung von System- oder Software-FMEAs eine sinnvolle Detaillierung der Analyse. Der Ausgangspunkt der Analyse ist das Eintreten des jeweiligen Szenarios, dabei werden anhand der beschriebenen Ereignisse und Dynamiken die auftretenden Risiken im System benannt. Die konkreten Belastungsszenarien ermöglichen eine gezielte Identifikation von Risiken im Gegensatz zur Anwendung von Identifikationsverfahren für das gesamte System und Zustände. An dieser Stelle können auch andere Identifikationsmethoden zum Einsatz kommen; diese Entscheidung hängt vom betrachteten Produktions- und dem dazugehörigen Risikomanagementsystem ab. Der Stresstest ist hier skalierbar und erweiterbar.

Die Anwendung zusätzlicher Hilfsmittel und die Durchführung von Zwischenschritten hängen vom Komplexitätsgrad der Analyse, aber auch von den entwickelten Belastungsszenarien und vom betrachteten Produktionssystem ab. Dies ist für den Stresstest in dieser Arbeit nicht allgemeingültig festzulegen. Ein Ergebnis, welches von unternehmensinternen Expert\*innen in Workshops ermittelt wird, bildet in den meisten Fällen eine sinnvolle Grundlage für den weiteren Verlauf des Stresstests (ROMEIKE 2018, S. 80).

---

<sup>20</sup> Weitere Informationen zur Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) finden sich bei ROMEIKE & HAGER (2020) und HUTH & ROMEIKE (2016).

Im Rahmen dieser Analyse werden weiterhin die Maßnahmen zur Risikobewältigung gesammelt (ROMEIKE 2018, S. 76). Gerade in Workshops mit Expert\*innen, aber auch bei der Nutzung anderer Kreativitätsmethoden, ist die Wirkungsanalyse nur schwer von der Entwicklung oder zumindest Nennung von Gegenmaßnahmen zu trennen. Eine inhaltliche Trennung im Rahmen des Stresstests ist gegeben, aber die Sammlung von Maßnahmen wird auch an dieser Stelle unterstützt, um den weiteren Verlauf des Stresstests vorzubereiten. Die genannten Maßnahmen können in Form eines Kataloges mitnotiert werden. Im Anschluss an die Analyse werden die Risiken bewertet und priorisiert.

### 5.5.2 Bewertung und Priorisierung der Risiken

Die Priorisierung der Risiken ist Bestandteil verschiedener Risikomanagementmethoden (vgl. hierzu Bow-Tie-Analyse und FMEA) und findet in der Forschungsliteratur Anwendung, z.B. bei BREDOW (2012, S. 100), GREBNER (2015), KÖNIG (2008), MÖLLER (2008) und ZÄH ET AL. (2005B). Für den Stresstest von Produktionssystemen übernimmt die Priorisierung der Risiken eine wichtige Funktion. Es wird sichergestellt, dass ein angemessener Komplexitätsgrad für das weitere Vorgehen erreicht wird (BREDOW 2012, S. 100). Die Kontrolle des Komplexitätsgrades trägt erheblich zur Erweiterbarkeit und Praxistauglichkeit des Stresstests bei. Für den Stresstest wird an dieser Stelle eine qualitativere Variante der Priorisierung vorgenommen. Dadurch kann hier mit „einfacheren“ Mitteln eine erste Bewertung durchgeführt werden. Eine detaillierte, quantitative Bewertung erfolgt in den nächsten Schritten in Form einer stochastischen Analyse. Der Vorteil der Schätzung der Relevanz von Risiken ist, dass es in sehr einfacher Form ein gemeinsames Verständnis für die Schwere eines Risikos gibt. Weiterhin wird die Kommunikation der Ergebnisse oder auch einzelner Risiken innerhalb des Unternehmens vereinfacht (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 102).

Dabei wird auf einen Scoring-Ansatz zurückgegriffen und mit Hilfe von mindestens zwei Dimensionen eine Einordnung vorgenommen. Die gängigen Bewertungsdimensionen der Bow-Tie-Analyse für die Produktion sind die Kritikalität und die Handlungsfähigkeit. Sie werden als Basis für die Priorisierung genutzt. In Abbildung 29 ist eine beispielhafte Einschätzung der Kritikalität und Handlungsfähigkeit aufgelistet.

Die Kritikalität<sup>21</sup> basiert auf der Einschätzung der Auswirkungen der Risiken und deren Bedeutung für das Produktionssystem. Mit Hilfe von Scoring-Werten zwischen 1 und 5 wird für die Auswirkungen eingeschätzt, welche Relevanz diese für das Produktionssystem haben, wobei 1 eine geringe Kritikalität und 5 extreme Kritikalität bedeutet. Das Maß ist dabei von den folgenden Parametern abhängig (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 102):

- Mittlere Ertragsbelastung (Erwartungswert)
- Realistischer Höchstschaden
- Wirkungsdauer

Bei einem zweiten Scoring wird die Handlungsfähigkeit in Bezug auf die Auswirkungen beurteilt. Hier gilt es abzuschätzen:

- Zeitraum zwischen Entdeckung und Eintritt
- Wahrscheinlichkeit der Erkennung
- Durchschnittliche Umsetzungszeit von Maßnahmen zur Abwendung

Dabei steht 1 dafür, dass die Möglichkeit besteht reaktionsschnell und ausreichend effizient auf das Risiko zu reagieren, und 5 dafür, dass die Fähigkeit zur Abwendung des Risikoeintritts als nicht gegeben angesehen wird.

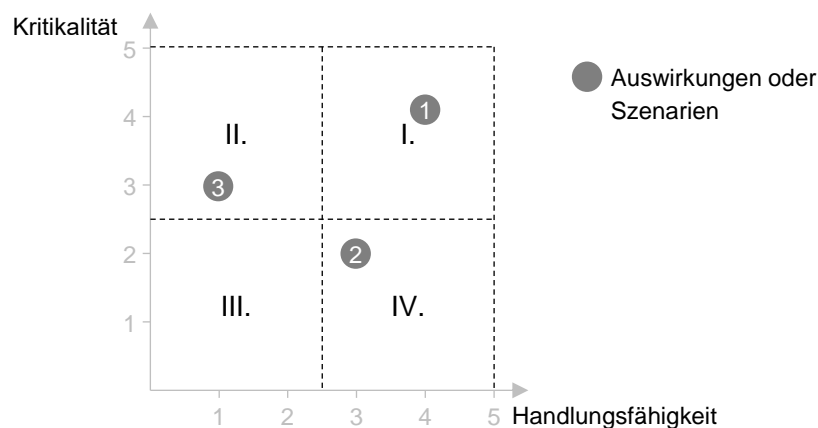


Abbildung 30: Visualisierung der Bewertung von Risiken (in Anlehnung an ROMEIKE & HAGER 2020, S. 329)

<sup>21</sup> Kritikalität wird an dieser Stelle im Stresstest mit Relevanz gleichgesetzt, da für Produktionssysteme die kritischsten Risiken auch die relevantesten sind.



Das Portfolio für die Beurteilung kann in vier grobe Bereiche eingeteilt werden:

- I. Hohe Kritikalität und geringe Möglichkeit zu reagieren
- II. Hohe Kritikalität und gute Möglichkeiten zu reagieren
- III. Niedrige Kritikalität und gute Möglichkeiten zu reagieren
- IV. Niedrige Kritikalität und geringe Möglichkeit zu reagieren

Der Verlauf der Grenzen ist unternehmensindividuell festzulegen.

Die Einschätzung mit Hilfe der zwei Dimensionen kann auf die Szenarien erweitert werden und so kann eine qualitative Einordnung der Szenarien in Bezug auf ihre „Schwere“ erreicht werden. Pro Szenario wird die Durchschnittsbewertung errechnet und mit diesen Werten erfolgt eine Einordnung der Szenarien in das Portfolio (vgl. Abbildung 30).

## 5.6 Zuordnen von Maßnahmen zur Risikosteuerung

Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben ist es das Ziel der Risikosteuerung Maßnahmen zu entwickeln und auszuwählen, um den erkannten Risiken zu begegnen (MIKUS 2001, S. 17). Für die entwickelten Belastungsszenarien und ihre Risiken sollen Bündel aus Maßnahmen identifiziert werden, welche die Zukunftsrobustheit von Produktionssystemen sichern. Maßnahmen können in ursachenbezogene und wirkungsbezogene Maßnahmen unterschieden werden (MIKUS 2001, S. 17), wie auch in Abbildung 28 als Teil der Bow-Tie-Analyse aufgezeigt ist. Mögliche Maßnahmen zur Risikosteuerung sind vielfältig und höchst individuell für jedes Produktionssystem, für die Risikoschwerpunkte und die untersuchten Belastungsszenarien (MIKUS 2001). Die Entwicklung und deterministische Bewertung von Maßnahmen wird für den Stresstest in dieser Arbeit nicht detailliert betrachtet. Die Voraussetzung für die Durchführung des Stresstests ist, dass die grundlegenden Maßnahmen, und dies bezieht sich besonders auf strukturelle Maßnahmen im Unternehmen, bereits vorliegen. Die Entwicklung der Maßnahmen sollte auf strukturierte Weise erfolgen und kann sich an bestehenden Informationen und Katalogen orientieren. Von KÖNIG (2008, S. 87-94) wird beispielsweise eine Strukturierung von operativen Maßnahmen für die produzierende Industrie vorgestellt. Die Entwicklung von Ideen für Maßnahmen ist integraler Bestandteil des Vorgehens und wird in der Praxis mit den Expert\*innen selbstverständlich auch zu zu-

sätzlichen Erkenntnissen über Maßnahmen führen. Die detaillierte Ausplanung von strukturellen oder informationstechnischen Veränderungen ist Teil von Planungsaktivitäten und diese werden in diversen Forschungen detailliert untersucht.

Der Fokus der Risikosteuerung liegt in der Identifikation der „richtigen“ Maßnahmen für das Unternehmen und vor allem für das Produktionssystem. Für die Auswahl und Zuordnung von Maßnahmen werden im Folgenden Mechanismen vorgestellt und es wird eine Einordnung der Mechanismen in Bezug auf das Risikoportfolio gegeben.

Alle Maßnahmen können nach ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR (2005, S. 279) in Hinsicht auf ihre Wirkungsweise in Grundvarianten zur Bewältigung des Risikos eingeteilt werden (siehe hierzu auch Kapitel 2.3):

- Vermeidung
- Reduktion und Begrenzung
- Selbstbehalt oder Tragen
- Überwälzung oder Verlagerung
- Teilung

Für den Stresstest von Produktionssystemen werden, wie in Abbildung 31 visualisiert, die Mechanismen dem Risikoportfolio zugeordnet – so können Maßnahmen einfacher eingeschätzt und zugeordnet werden.

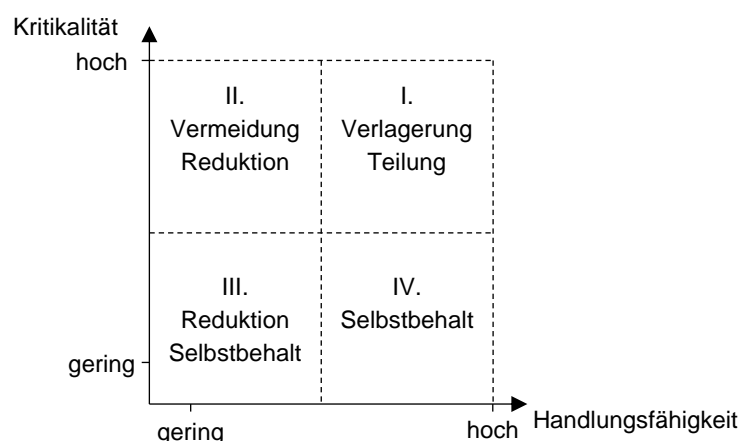


Abbildung 31: Mechanismen der Risikobewältigung (in Anlehnung an ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 279)

Das Portfolio bietet einen Anhaltspunkt für die Zuordnung von Maßnahmen zu Risiken. In der unternehmerischen Praxis werden Maßnahmen aus den verschiedenen Bereichen kombiniert. Eine genaue Zuordnung von Maßnahmen zu den einzelnen Kategorien ist dabei nicht immer möglich. Die Grenzen im Portfolio sind individuell zu ziehen.

Beispiele für die Maßnahmen in Produktionssystemen nach Mechanismen der Risikobehandlung sortiert werden in Tabelle 6 aufgezählt.

Tabelle 6: Mechanismen der Risikobewältigung und Maßnahmen für Produktionssysteme (in Anlehnung an ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005, S. 280)

Risikobehandlung	Maßnahmen zur Risikosteuerung
Vermeidung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zukauf von Teilen</li> </ul>
Reduktion und Begrenzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investition in Schulung und Ausbildung</li> <li>• Verlängerte Anlaufphasen</li> <li>• Verstärkte Qualitätskontrollen</li> </ul>
Selbstbehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rückstellungen und Rücklagenbildung</li> <li>• Aufbau von Lagern und Puffern</li> </ul>
Verlagerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abschluss von Versicherungen</li> </ul>
Teilung und Diversifikation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kooperationen</li> <li>• Auslagern von Produktionen in andere Gesellschaften</li> <li>• Produktion mit Partnern</li> </ul>

Die vorige Liste umfasst Beispiele aus unterschiedlichen Bereichen, unter anderem organisatorische und finanzwirtschaftliche Aspekte, sowie Maßnahmen zur Kooperation und Prozessveränderung. Ein wichtiger Veränderungshebel für Produktionssysteme sind Strukturveränderungen; die Anpassung von Strukturen zur verbesserten Zukunftsrobustheit ist ein wichtiges Element bei Produktionsplanungen. Eine Einordnung von möglichen Strukturmaßnahmen als Mechanismen der Risikosteuerung kann sinnvoll sein, um die Zuordnung von Maßnahmen zu ermöglichen. Mögliche Strukturmaßnahmen werden in Abbildung 32 den Möglichkeiten zur Risikosteuerung zugeordnet. Eine eindeutige Zuordnung für die Risikosteuerung ist nicht möglich. Für den erfolgreichen Umgang mit Risiken wird eine Reihe von Maßnahmen miteinander kombiniert werden müssen.

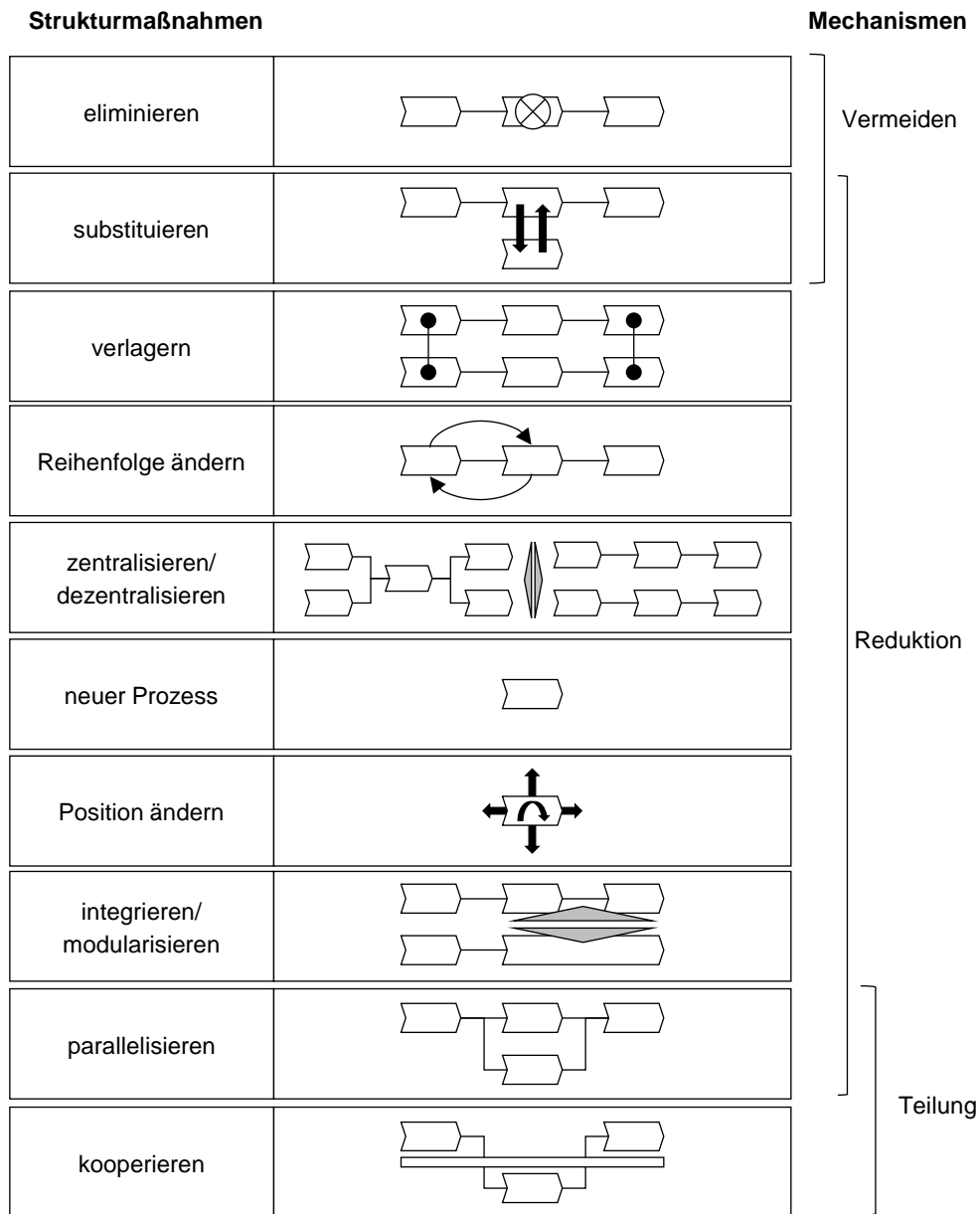


Abbildung 32: Zuordnung von Strukturmaßnahmen zu Mechanismen der Risikosteuerung (in Anlehnung an POHL 2013, S. 86)

Eine Auswahl möglicher Maßnahmen erfolgt für jedes Belastungsszenario und die dazugehörigen Risiken sowie deren Auswirkungen. Für einige Risiken und Auswirkungen gibt es mehrere Maßnahmen und diese werden sich auch über die Belastungsszenarien hinweg wiederholen. Das Ergebnis ist eine Maßnahmenzuordnung, welche aufzeigt, was unternommen werden kann, um einem eintretenden Belastungsszenario zu begegnen. Es gilt pro Belastungsszenarien ein sinnvolles Maßnahmenbündel zu identifizieren; dieses kann zu einer Konfiguration für das Produktionssystem zusammengefasst werden.

Innerhalb der Konfigurationen wird die Priorisierung der Maßnahmen von der Priorisierung der Risiken abgeleitet. Die zeitlichen Zusammenhänge innerhalb des Belastungsszenarios geben auch für die Maßnahmen eine zeitlich Abfolge vor.

Neben den „konkreten“ physischen und digitalen Maßnahmen zur Risikosteuerung ergibt sich für die Zukunftsrobustheit von Produktionssystemen eine Reihe von weniger physischen, entscheidungsorientierten Vorteilen und Informationen.

Wie auch in der Finanzindustrie ist die Durchführung des Stresstests eine Form der Risikosteuerung – das systematische Durchdenken von möglichen Belastungsszenarien sowie das Erkennen von Zusammenhängen und Dynamiken sind eine Vorbereitung auf eine robuste Reaktion in der Zukunft in sich. Dies geschieht vor allem durch die Sensibilisierung des Managements und der Mitarbeiter\*innen. So kann das soziotechnische System Produktion zusätzliches Wissen erlangen und idealerweise die Zukunftsrobustheit in Entscheidungen berücksichtigen und schwache Signale für Veränderungen und Risiken frühzeitig wahrnehmen, einfach kommunizieren und somit bessere und schnellere Reaktionen garantieren. Von WOLKE (2016, S. 74) wird angemerkt, dass der Stresstest in sich eine Art Zirkelschluss enthält, denn die unbekanntes, hypothetischen Zukunftsszenarien sind ja in dem Moment, in dem sie benannt und durchdacht werden, nicht mehr unbekannt. Genau das, was hier als Schwäche in der Theorie von Stresstests angesehen wird, kann in der Risikosteuerung für eine erhöhte Robustheit eine Maßnahme in sich selbst sein. Auf Basis der Zuordnung von Maßnahmenbündeln oder auch Konfigurationen für das Produktionssystem erfolgt die quantitative Bewertung der Belastungsszenarien in Bezug auf das Produktionssystem und seine Konfigurationen.

## 5.7 Monetäre Bewertung der Belastungsszenarien

Als letzter Schritt des Stresstests erfolgt die quantitative Bewertung der Auswirkungen, welche durch die Risiken der Belastungsszenarien entstehen. Die Bestimmung eines „Gesamtrisikoumfangs“ durch eine Aggregation der Risiken setzt voraus, dass die Risiken Positionen in der Unternehmensplanung zugeordnet werden können (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 118). Die Aggregation der Risiken erfolgt mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation. Das Verfahren ermöglicht innerhalb des Stresstests für Produktionssysteme, dass beliebige, verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet werden können und dass der Zu-

sammenhang zwischen den identifizierten Risiken und einer monetären Bewertung hergestellt werden kann (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 118). Für die Bewertung werden die identifizierten Risiken mit einer Profitabilitätsrechnung verknüpft, so können Risiken z.B. als Schwankungsbreite um einen Planwert modelliert werden (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 118). Das Vorgehen in diesem Schritt lehnt sich an die Bewertung von Unsicherheiten oder Risiken an, wie sie in den Arbeit von BREDOW (2012), KREBS (2011), MÖLLER (2008) und POHL (2013) vorgestellt wird. Das Schema für die monetäre Bewertung der Auswirkungen der Risiken aus den Belastungsszenarien wird in Abbildung 33 veranschaulicht.

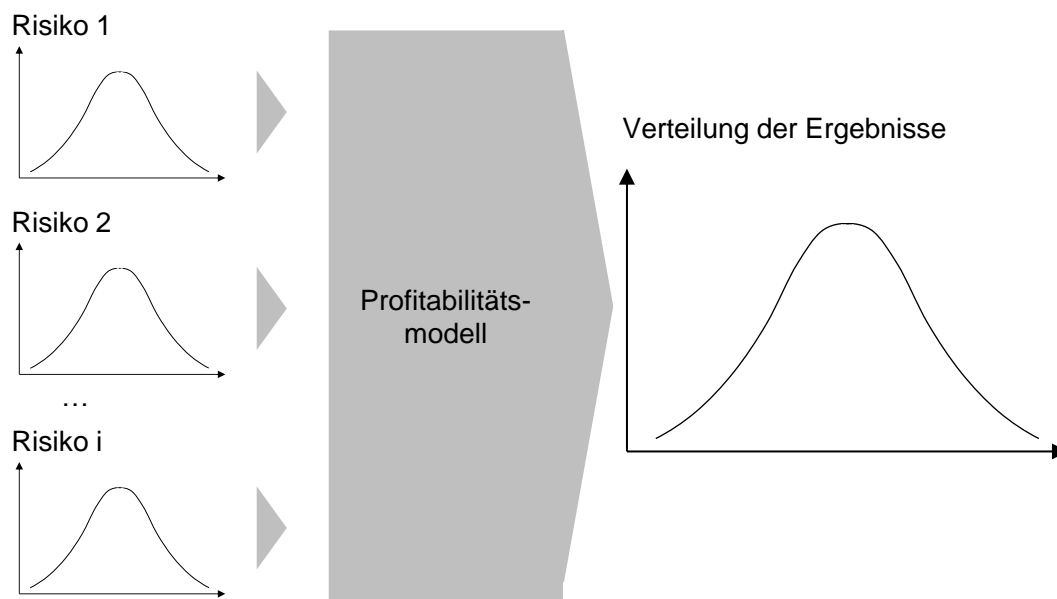


Abbildung 33: Bewertung der Risikoauswirkungen aufgrund von Belastungsszenarien

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick zur Auswahl eines Profitabilitätsmodells gegeben. Anschließend wird darauf eingegangen, wie die Auswirkungen der Risiken mit Hilfe von Modellen abgebildet werden können. Danach werden die Simulationsläufe erläutert, um sodann die Berechnung des Value at Risk und die Sensitivitätsanalyse zu beschreiben.

### 5.7.1 Profitabilitätsmodell

Die monetäre Bewertung hat das Ziel, den potentiellen Verlust bei Eintreten der Belastungsszenarien zu ermitteln. Hierbei geht es um den sogenannten „Stressverlust“, welcher durch extreme Ereignisse ausgelöst wird. In der Praxis sind für diese Art von Verlusten

typischerweise nicht genügend historische Daten vorhanden, deswegen kann dieser entweder mit theoretischen Zufallsverteilungen errechnet werden oder, wie im Verlauf dieser Methodik, mit potenziellen Szenarien erarbeitet werden (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 103).<sup>22</sup> Für eine monetäre Bewertung muss ein Profitabilitätsmodell des Produktionssystems und seiner Konfiguration vorliegen. Aufgrund der Heterogenität der Testobjekte, der Produktionssysteme, der zugehörigen Rechnungsmodelle und Unternehmen, ist eine einheitliche Auswahl der Risikomaße und des Profitabilitätsmodells nicht zielführend.<sup>23</sup>

Für den Stresstest ist es nicht zwingend notwendig eine Zielgröße festzulegen, mit deren Hilfe die Bewertung der Szenarien vorgenommen werden kann. Wichtig ist, dass die quantifizierbaren Risiken und Konfigurationen des Produktionssystems, die für die einzelnen Belastungsszenarien identifiziert wurden, abgebildet werden können. Damit dies möglich ist, werden die Erlöse und Erträge den Kosten und Aufwendungen für die einzelnen Belastungsszenarien gegenübergestellt (SCHURIG 2016, S. 101). Eine geeignete Struktur für die monetäre Bewertung liefern Berechnungen des operativen Ergebnisses, wie z.B. des Betriebsergebnisses oder des EBIT (SCHWAB 2008, S. 145). Den EBIT als Zielgröße nutzen die deterministischen Bewertungsmodelle der Stresstests von SCHURIG (2016) und GREBNER (2015) (vgl. Kapitel 3.3). Das EBIT und das dazugehörige EBITDA stammen aus der internationalen Rechnungslegung und setzen sich immer mehr auch in der DACH-Region durch (WÖHE ET AL. 2020, S. 732). Die Struktur des EBIT entspricht dem Bruttogewinn oder Jahresüberschuss und das EBITDA ähnelt einer Cashflow-Rechnung, da Abschreibungen als nicht zahlungswirksamer Posten herausgerechnet werden (WÖHE ET AL. 2020, S. 732). Die Berechnungsvorschrift ist in Abbildung 34 dargestellt.

Der Jahresüberschuss setzt sich wiederum zusammen aus dem Betriebsergebnis, dem Finanzergebnis und dem Gesamtbetrag der Steuern (WÖHE ET AL. 2020, S. 731). Für die Berechnung des EBIT kann weiter heruntergebrochen werden auf das Betriebsergebnis und die Erträge aus Finanzgeschäften.

---

<sup>22</sup> Für die Abbildung von katastrophalen Ereignissen (sogenannten Jahrhundertereignissen), wie z.B. Fluten oder Pandemien, die fatale Schadenssummen auslösen können, wird auch auf Extremwert-Theorien und die Peaks-over-Threshold-Methode zurückgegriffen. Obwohl sich der Stresstest mit extremeren Belastungsszenarien auseinandersetzt als üblicherweise in Planungen angenommen, wurden diese extremen Natur- und Sozialkatastrophen ausgeschlossen, da sie nur auf unternehmensweiter Ebene versichert und beurteilt werden könnten. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit nicht weiter auf diese Schadensmaße eingegangen.

<sup>23</sup> Genauso wird es auch von POHL (2013, S. 93). für die Bewertung von Produktionsstrukturen unter Unsicherheit gehalten.

$$\begin{array}{r}
 \text{Betriebsergebnis} \\
 + \text{ Finanzergebnis} \\
 - \text{ Gesamtbetrag} \\
 \text{Steuern} \\
 \hline
 = \text{ **Jahresüberschuss**} \\
 + \text{ Ertragsteuern} \\
 + \text{ Zinsaufwand} \\
 \hline
 = \text{ **EBIT**}
 \end{array}$$

Abbildung 34: Zusammenhang EBIT und Jahresüberschuss (in Anlehnung an WÖHE ET AL. 2020, S. 731-732)

Für den Stresstest von Produktionssystemen sollen die Belastungen des Produktionssystems in Form von potentiellen Risikoverlusten berechnet werden. Hierfür werden die betrieblichen Erträge und Aufwendungen, für welche die Risiken untersucht werden, fokussiert (SCHURIG 2016, S. 103). Die Ergebnis- oder auch Profitabilitätsrechnung gibt die Struktur für das Bewertungsmodell vor. Die unsicheren Einflüsse, die aufgrund der Belastungen entstehen, müssen den einzelnen Positionen im Bewertungsmodell zugeordnet werden. Die Bewertung anhand einer Zielgröße wie des EBIT erfolgt entlang der einzelnen Kalkulationsgrößen und ihren dazugehörigen Einzelpositionen. Das Berechnungsmodell ist individuell auszuwählen. In Abbildung 35 ist eine beispielhafte Struktur für die Berechnung des EBIT aufgezeigt.

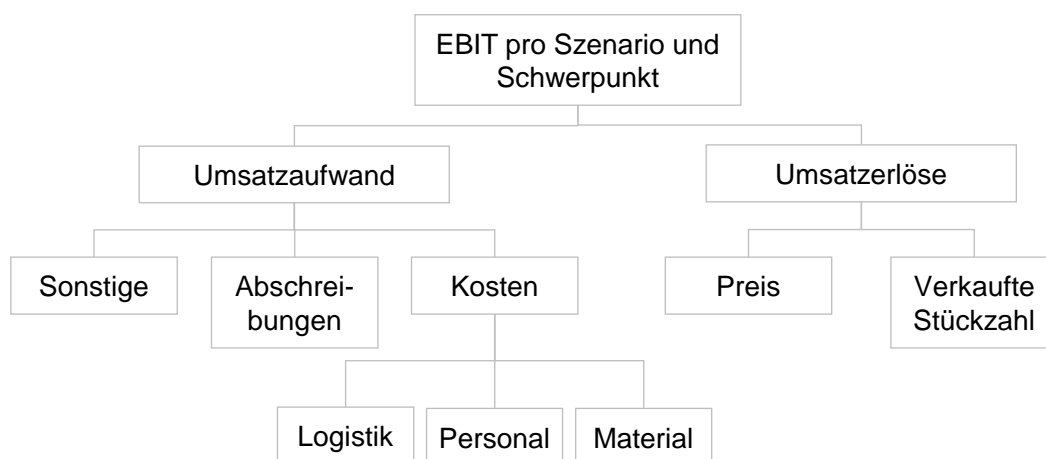


Abbildung 35: Beispielhafte, vereinfachte EBIT-Berechnung pro Szenario

Für die Ertrags- bzw. Erlösseite ist die Zuordnung innerhalb der Auswirkungen der Risiken leicht zuzuordnen, da es sich um die zu vertreibenden Produkte und die Marktpreise han-



delt. Diese sind klar der Erlösseite zuzuordnen. Die Umsätze werden stark durch die Szenarien bestimmt und determinieren den Planerwartungswert maßgebend. Die Fähigkeit des Produktionssystems die benötigten Stückzahlen zu produzieren, ist der Risikofaktor, der durch das Produktionssystem auf der Erlösseite zu beeinflussen ist. Demgegenüber stehen die Aufwendungen und Kosten, die in diesem Vorgehen fokussiert werden. Auch hier sollte sich das Modell für die Bewertung innerhalb des Stresstests auf die betriebszweckbezogenen Wertminderungen fokussieren; andere Wertminderungen können, wenn benötigt, einbezogen werden, sind aber im ersten Schritt nicht Teil der Modellierung. Denn die Kostenseite ist maßgeblich durch das Produktionssystem charakterisiert. Ein größerer Teil der Risikoauswirkungen, die durch die Belastungsszenarien entstehen, werden sich auf der Kostenseite durch erhöhte Kosten oder Aufwendungen niederschlagen. Für die kostenbezogene Abbildung der Risiken wird eine Kostenstruktur benötigt, die eine Zuordnung zulässt.

### 5.7.2 Quantitative Beschreibung von Risiken

In diesem Kapitel wird die Erweiterung der qualitativen Analyse beschrieben. Die Einflüsse, welche die zuvor identifizierten Risiken auf das EBIT des Produktionssystems haben, werden mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert.

Für die quantitative Abbildung von Risiken innerhalb des Stresstests wird eine Risikoaggregation mit Hilfe einer stochastischen Simulation genutzt. Hierfür werden die Risiken stochastisch abgebildet und mit einem deterministischen Rechnungsmodell verknüpft. Mit Methoden der Statistik hingegen würden Verteilungen und Parameter auf historischen Daten basieren – eine analytische Bestimmung von Risikomaßen führt in der Regel zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 113). Ausreichend Daten liegen zum einen in vielen Fällen nicht vor und zum anderen widerspricht dieses Vorgehen dem Grundsatz des Stresstests, dass sich dieser nicht auf historische Daten stützen sollte. In vielen Fällen sind die Erfahrungen des Managements und der Mitarbeiter\*innen der Produktion das probateste Mittel die Werte zu schätzen (MÖLLER 2008, S. 124). Die Abweichungen und Auswirkungen, die die Risiken auf das Profitabilitätsmodell ausüben, werden durch Verteilungsfunktionen abgeschätzt. Für jede Risikoauswirkung wird eine geeignete Verteilungsfunktion ausgewählt. Über die Modellierung von Unsicherheiten kann keine

generalisierte Aussage getroffen werden (MÖLLER 2008, S. 124, MUN 2002, S. 116). Das Verhalten einer Zufallsgröße ist im Einzelfall zu analysieren und basierend auf den Eigenschaften der Verteilung auszuwählen (MÖLLER 2008, S. 124, MUN 2002, S. 116).

Für die Bewertung von Projekten unter Unsicherheit ist es nach ZÄH ET AL. (2005B) nicht notwendig alle Risiken im Detail zu beschreiben und zu modellieren, da in den meisten Projekten nur einige wenige Faktoren (2-3) für die Abweichungen im z.B. NPV verantwortlich sind. Für die quantitative Bewertung der Szenarien wird davon ausgegangen, dass eine Modellierung der „wichtigsten“ Risiken zu einer ausreichenden Genauigkeit für die Bewertung der Profitabilität führt. Für die Modellierung werden aus der priorisierten Liste (vgl. Kapitel 5.5.2) ungefähr die ersten 3-7 Risiken für die Modellierung ausgewählt. Durch die Expert\*innen kann eine individuelle Auswahl der Risiken getroffen werden, welche im mathematischen Modell berücksichtigt werden sollen. So kann die Komplexität der Simulation begrenzt und gesteuert werden.

Für die Auswahl einer geeigneten Verteilungsfunktion für die Abbildung in einem Belastungsszenario kann zwischen stetigen und diskreten Verteilungen unterschieden werden. Eine diskrete Zufallsvariable  $X$  kann nur abzählbar unendlich oder endlich viele Werte  $\{x_1, x_2, \dots\}$  annehmen. Die Verteilung von  $X$  wird durch ihre Wahrscheinlichkeitsfunktion  $f(x_i)$  und ihre Verteilungsfunktion  $F(x)$  definiert (SIBBERTSEN & LEHNE 2012, S. 215-221). Eine allgemeine Definition der Funktionen für diskrete Verteilungen findet sich in Anhang B. Beispiele für wichtige diskrete Verteilungen sind die Binomial- und die Poissonverteilung (BREDOW 2012, S. 102). Für eine stetige Zufallsvariable  $X$  wird die Verteilung durch die Verteilungsfunktion  $F(x)$  und die dazugehörige Dichtefunktion gegeben (SIBBERTSEN & LEHNE 2012, S. 224-229). Eine Zufallsvariable  $X$  heißt stetig, wenn sie im Intervall  $[a, b]$  mit  $a < b$  jeden Wert annehmen kann. Eine Definition der Funktionen für stetige Verteilung findet sich auch im Anhang B. Häufig vorkommende Vertreter der stetigen Verteilung sind z.B. Normalverteilung, die Lognormalverteilung und die Beta-PERT-Verteilung.

Für Details zur Auswahl von geeigneten Verteilungsfunktionen und sinnvolle Vereinfachungen dieses Vorgangs wird auf die Arbeiten von BREDOW (2012) und KREBS (2011) verwiesen. Eine detaillierte Tabelle zu den gängigsten Wahrscheinlichkeitsverteilungen findet sich in Anhang C. Mit Hilfe der vorgestellten Methoden können Risikoverteilungen für jeweils einen Zeitpunkt abgebildet werden. Damit können einzelne stochastische Ereignisse und unabhängige stochastische Prozesse innerhalb der Szenarien dargestellt werden.

### Korrelation von Risiken

Für die Beurteilung der Vernetzung der Risiken wird deren Korrelation bewertet. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe eines Korrelationskoeffizienten  $r$ . Der Koeffizient kann die Stärke und Richtung von Abhängigkeiten zwischen zwei Faktoren darstellen. Die Abbildung der Korrelation dient der Erhöhung der statistischen Genauigkeit (BREDOW 2012, S. 105), um Dynamiken zwischen den Risiken zu veranschaulichen. Die Abschätzung der Korrelation durch die Beurteilung von Expert\*innen wird entsprechend dem vorherigen Vorgehen einer historischen Betrachtung vorgezogen. In der Praxis sind die Daten für eine Analyse der Korrelationen zusätzlich häufig nicht verfügbar. Im Rahmen des Stresstests wird vereinfacht von einer linearen Korrelation zwischen den Risiken ausgegangen. Für die Abschätzung wird die folgende Skala vorgeschlagen (vgl. hierzu KREBS 2011, S. 113):

$r = 0$	Keine Korrelation
$r = 0,2$	Sehr geringe Korrelation
$r = 0,4$	Geringe Korrelation
$r = 0,6$	Mittlere Korrelation
$r = 0,8$	Hohe Korrelation
$r = 1$	Sehr hohe Korrelation

Die Abschätzung erfolgt mit Hilfe einer Korrelationsmatrix, in welcher paarweise die Korrelationen bestimmt werden. Die Richtung der Korrelation wird durch das Vorzeichen angegeben (KREBS 2011, S. 114). Die Summe der Zeile  $S_z$  zeigt an, wie stark ein Risiko die anderen Risiken beeinflusst. Die Summe der Spalte  $S_s$  hingegen zeigt an, wie stark das Risiko selbst beeinflusst wird. Für Details zur Abbildung von Korrelationen zwischen quantitativen Unsicherheiten wird auf den Stand des Wissens, genauer die Arbeit von KREBS (2011, S. 83 und S. 113), verwiesen.

### 5.7.3 Simulation

Die Simulation für den Stresstest der kritischen Produktionsprozesse beginnt mit der Verknüpfung des Berechnungsmodells mit den modellierten Risiken. Der Prozess der stochastischen Simulation ist in Abbildung 36 dargestellt. Der enthaltene Zyklus wird für jedes Belastungsszenario und für jede Konfiguration der Risikoschwerpunkte durchlaufen. Mit dem Monte-Carlo-Verfahren wird der Erwartungswert simuliert, anschließend wird der

VaR festgelegt und berechnet. Basierend auf den Ergebnissen der Simulation kann die Sensitivität untersucht werden. In der Literatur sind bereits Bewertungsverfahren dieser Art beschrieben und ausgearbeitet, für die Simulation zur Risikobewertung wird das Vorgehen von BREDOW (2012, S. 108-119) zu Grunde gelegt. Die Simulation erfolgt als zufällige Ziehung aller modellierten Einflüsse auf das EBIT. Die Ziehungen werden mehr als 10.000-mal wiederholt, wobei auch wirklich große Ziehungen (< 100.000) heute technisch ohne Probleme möglich sind (BREDOW 2012, S. 108).

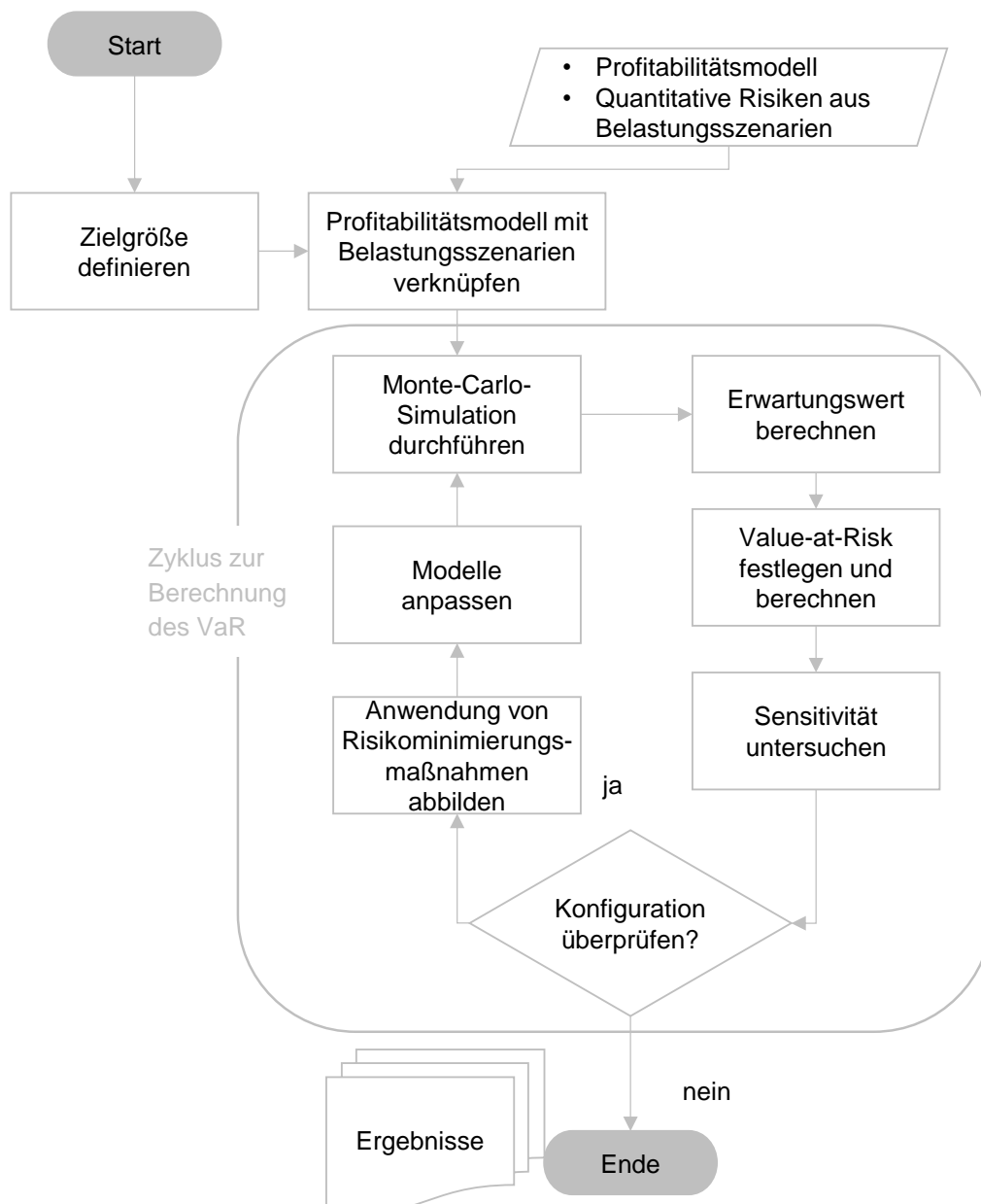


Abbildung 36: Ablauf der stochastischen Simulation

Im folgenden Kapitel werden die Kriterien zur Interpretation der Verteilungen der Ergebnisse aus der Simulation vorgestellt. Darauffolgend werden die Berechnung des Risikomaßes Value at Risk sowie die Analyse der Sensitivitäten beschrieben.

#### 5.7.4 Analyse der Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Zur Beurteilung der Schwere der Szenarien werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des EBIT analysiert und verglichen. Der Erwartungswert ist der Wert, der im Mittel am häufigsten in der Verteilung der Ergebnisse auftritt. Er gibt an, welches Betriebsergebnis im Mittel bei Eintritt des Szenarios zu erwarten ist. Ein höherer Erwartungswert deutet auf ein besseres Ergebnis hin. Sollte der Erwartungswert negativ sein, ist im Mittel mit Verlusten zu rechnen. Die Bewertung des Erwartungswertes erfolgt im Stresstest im Vergleich zu einem Planwert, welcher entweder mit Hilfe von Profitabilitätsmodellen des jeweiligen Szenarios berechnet wird oder aus der Unternehmensplanung heraus vorgegeben wird. Tendenziell haben folglich Szenarien, deren Erwartungswert größer ist als der anderer Szenarien, weniger schwere Auswirkungen auf das Produktionssystem. Ein negativer Erwartungswert deutet auf die Schwere des Szenarios hin und es müssten beim Eintritt des Szenarios Maßnahmen ergriffen werden, um den Unternehmenserfolg zu sichern. Der Erwartungswert sollte aber nicht isoliert betrachtet werden. Deswegen wird im Folgenden der Value at Risk als Risikomaß für die Verteilung der Ergebnisse der Simulation vorgestellt.

#### 5.7.5 Berechnung des Value at Risk

Die Verteilung des EBIT wird mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode simuliert. Die Ergebnisverteilung wird mit Hilfe des Value at Risk analysiert, um eine Kennzahl für die Risikobewertung zu generieren. Der Value at Risk (VaR) ist besonders in der Risikobewertung in der Finanz- und Versicherungsbranche ein gängiges Risikomaß (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 113) und gehört zu den Downside-Risikomaßen (WOLKE 2016, S. 30), die das Risikoverständnis für die Betrachtungen dieser Arbeit widerspiegeln, nämlich dass das Risiko als negative Abweichung vom erwarteten Wert abgeleitet wird (vgl. Kapitel 2.2). Der VaR hat den Vorteil, dass verschiedene Risikoarten miteinander verglichen und zusammengeführt werden können. Für die Bewertung der Szenarien kann so der Stress aus mehreren Risiken bewertet werden und die Szenarien können untereinander verglichen werden. Der VaR wird als Risikomaß in der Finanzindustrie auch kritisch gesehen (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 110, WOLKE 2016, S. 86). Aufgrund seiner Verbreitung, guten

Verständlichkeit und einfachen Berechnung wird der VaR anderen Risikomaßen für die Anwendung im Stresstest vorgezogen. Das Maß wird in der produzierenden Industrie bereits genutzt und deswegen wird eine höhere Akzeptanz des VaR gegenüber anderen Risikomaßen angenommen.

Der VaR berechnet sich aus der Differenz zwischen dem Erwartungswert und einem Quantil einer Verteilung. Das x%-Quantil gibt den Wert an, bis zu dem x % aller möglichen Werte einer Verteilung liegen (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 112). In Abbildung 37 ist der Zusammenhang anhand einer Dichtefunktion dargestellt. Die analytische Ermittlung des VaR ist mit verhältnismäßig hohem Aufwand verbunden (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 113), deswegen wird weiter ausschließlich auf die simulative Ermittlung zurückgegriffen.

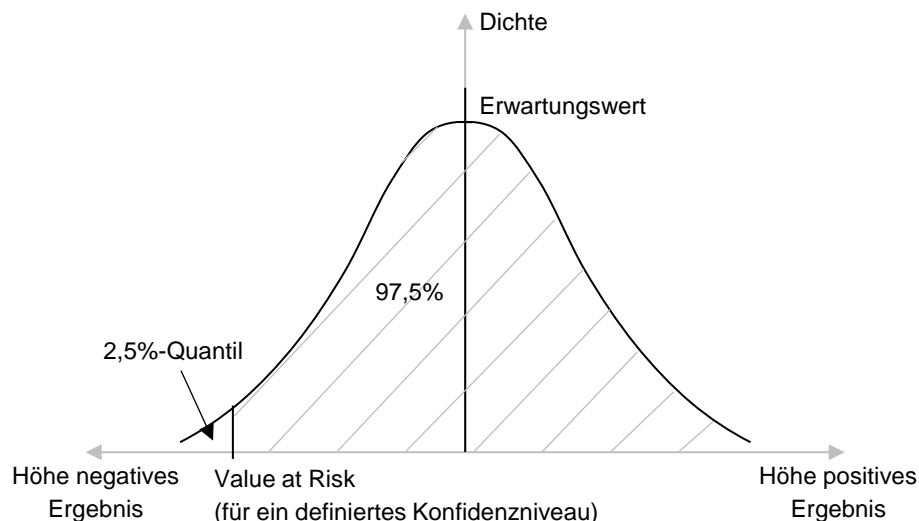


Abbildung 37: Value at Risk bei normalverteilten Risikofunktionen

### 5.7.6 Sensitivitätsanalyse

Nachdem die Bewertung der Szenarien mit Hilfe der stochastischen Risikoaggregation durchgeführt wurde, werden mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse die Einflüsse der einzelnen Risiken auf das Gesamtergebnis untersucht. Dies wird erreicht, indem die einzelnen Eingangsparameter auf das Rechenmodell verändert werden, um zu berechnen, welche Auswirkungen diese Veränderungen auf die Zielgröße, in diesem Fall das EBIT, haben. Beispielhafte Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 38 dargestellt.



Abbildung 38: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in einem Tornado-Diagramm (in Anlehnung an BREDOW 2012, S. 114)

Der Einfluss der Risiken innerhalb des Belastungsszenarios hängt von dem relativen Anteil der zugeordneten Position in der EBIT-Rechnung und der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Risikos ab. Im Vergleich können die Belastungsszenarien ein ähnliches Gesamtrisiko bergen, aber die Zusammensetzung der Ursachen für diese Risiken kann sehr unterschiedlich sein. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse erlauben damit eine weitere Analyse der Szenarien und legen den Grundstein für die Risikosteuerung und vor allem eine Priorisierung bei der Auswahl von Maßnahmen.

## 5.8 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Stresstests enthalten mehrere Elemente, welche in der Gesamtbetrachtung eine Interpretation der Auswirkungen der Szenarien auf das Produktionssystem ermöglichen. Sie geben den Anwender\*innen die Möglichkeit zu evaluieren, ob das untersuchte Produktionssystem den Belastungen des Szenarios gewachsen ist und welche Höhe die Verluste durch die Stressbelastung annehmen können.

### 5.8.1 Einschätzung der Schwere der Szenarien

Wie in Kapitel 5.7.4 beschrieben, kann der Erwartungswert negative oder positive Werte annehmen. Ist der Erwartungswert der Bewertung negativ, ist eindeutig, dass das Produktionssystem beim Eintritt des Szenarios den Anforderungen nicht gewachsen ist. Ein positiver Erwartungswert ist mit einem Planwert für das Betriebsergebnis der Unternehmensplanung zu vergleichen. Die Differenz zwischen den beiden Werten ist ein Indikator für die Fähigkeit des Produktionssystems die übergeordneten Unternehmensziele zu erreichen. Die eigentliche Einschätzung der Auswirkungen des Belastungsszenarios wird mit Hilfe des VaR vorgenommen. Je größer der VaR ist, desto verheerender können die Schäden unter

der jeweiligen Belastung sein. Die Höhe des VaR ist abhängig von der Risikobereitschaft des Unternehmens und kann somit abhängig von den Einschätzungen der eigenen Fähigkeiten gesteuert werden. Der VaR ist darüber hinaus beim Einsatz von Werkzeugen wie z.B. Rücklagen oder Versicherungen hilfreich. Der Vergleich der Schwere der Szenarien kann auf Basis dieser Werte erfolgen – dabei ist ein Szenario, welches einen positiven Erwartungswert und/oder einen festgelegten Planwert nicht unterschreitet, weniger belastend als andere Szenarien. Weiterhin ist das Szenario mit dem größten VaR das schwerwiegendste Szenario. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 39 dargestellt.

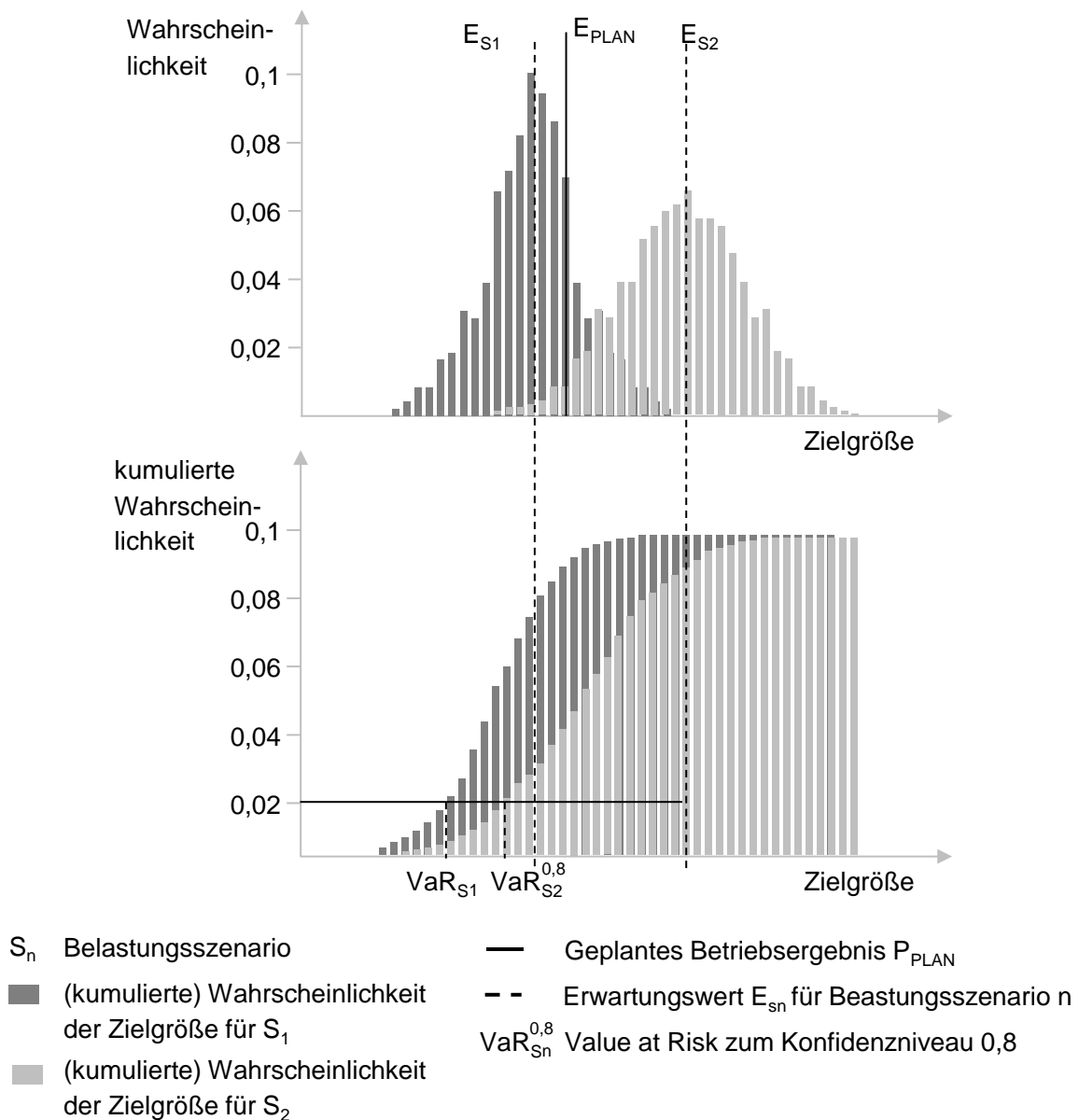


Abbildung 39: Ergebnis der Simulation von zwei Szenarien (in Anlehnung an POHL 2013, S. 98)



Generell ist ein Produktionssystem robuster gegenüber den untersuchten Szenarien, wenn die Erwartungswerte des Betriebsergebnisses im Planbereich liegen oder mindestens positiv sind. In Abbildung 39 liegt der Erwartungswert des Szenarios S2 über dem Vergleichswert. Aber auch Szenario S1 weist einen positiven Erwartungswert auf. In diesem Fall kann das Ergebnis des Stresstests in Bezug auf den Erwartungswert als positiv eingestuft werden, denn den untersuchten Belastungsszenarien kann gut begegnet werden. Der Value at Risk ist allerdings in Szenario S2 höher als in Szenario S1, das heißt, das Verlustrisiko bei Eintritt des Szenarios ist größer.

Für die Einordnung der Szenarien wird ein Bewertungsportfolio vorgeschlagen, wie es in Abbildung 40 dargestellt ist. Im Portfolio wird auf der Abszisse das Verhältnis von Erwartungswert zu Planwert abgetragen und auf der Ordinate das Verhältnis vom Value at Risk zum maximal tragbaren Value at Risk.

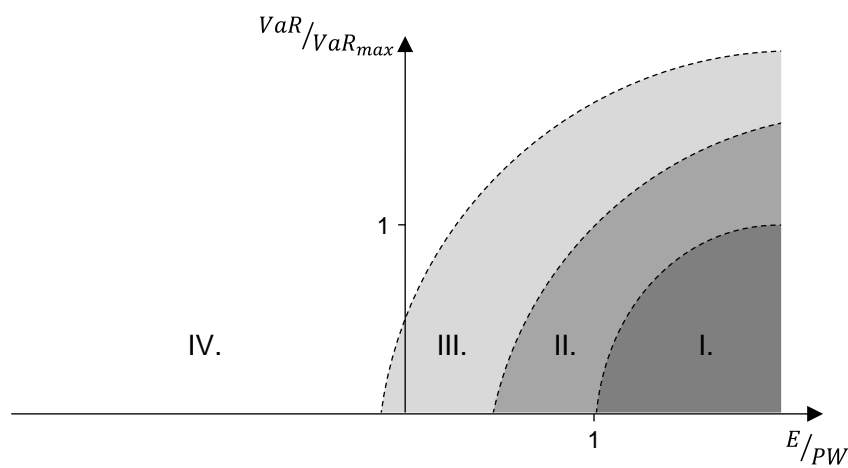


Abbildung 40: Severity-Portfolio: Portfolio zur Bewertung der Schwere der Szenarien (in Anlehnung an KREBS 2011, S. 125)

Im Feld I. befinden sich die Szenarien, in denen der Erwartungswert des Betriebsergebnisses höher ist als der Planwert und die Höhe des VaR tragbar ist. Das Produktionssystem besteht den Test für diese Szenarien. Das Feld IV. enthält alle Szenarien, deren Erwartungswerte negativ sind, und solche, die trotz eines guten Erwartungswertes einen zu hohen VaR haben. Für diese Szenarien ist das Produktionssystem nicht richtig und ausreichend robust aufgestellt. Hier bedarf es weiterer Strategien und Maßnahmen für die Vorbereitung auf das Szenario. Für die Felder II. und III., welche solche Szenarien enthalten, die kritisch,

aber nicht fatal sind, müssen individuelle Strategien, z.B. zur Minimierung oder Überwälzung des Risikos, gewählt werden. Auch die Unterteilung des Portfolios ist individuell zu wählen.

### 5.8.2 Priorisierung der Risiken

Die Evaluation der Risiken, die mit den Szenarien einhergehen, setzt sich aus den qualitativen und quantitativen Ergebnissen zusammen. Die bewerteten und priorisierten Risiken aus der qualitativen Risikoanalyse werden mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse abgeglichen. Anhand der zusätzlichen Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse wird die Einschätzung der Kritikalität der Risiken angepasst. Es ergeben sich pro Szenario eine neue priorisierte Risikoliste sowie eine neue Bewertungsmatrix. Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Risikobewertung zu einer Liste ermöglicht es, über die Szenarien hinweg, Rückschlüsse für die Risikoauswirkungen zu ziehen. Die Listen der Risikoauswirkungen werden zusammengeführt, dabei gilt es Wiederholungen bei den Risiken zu detektieren. So werden solche Risikoauswirkungen identifiziert, welche durch den Eintritt verschiedener Szenarien ausgelöst werden können. Eine beispielhafte Auswertung ist in Abbildung 41 dargestellt.

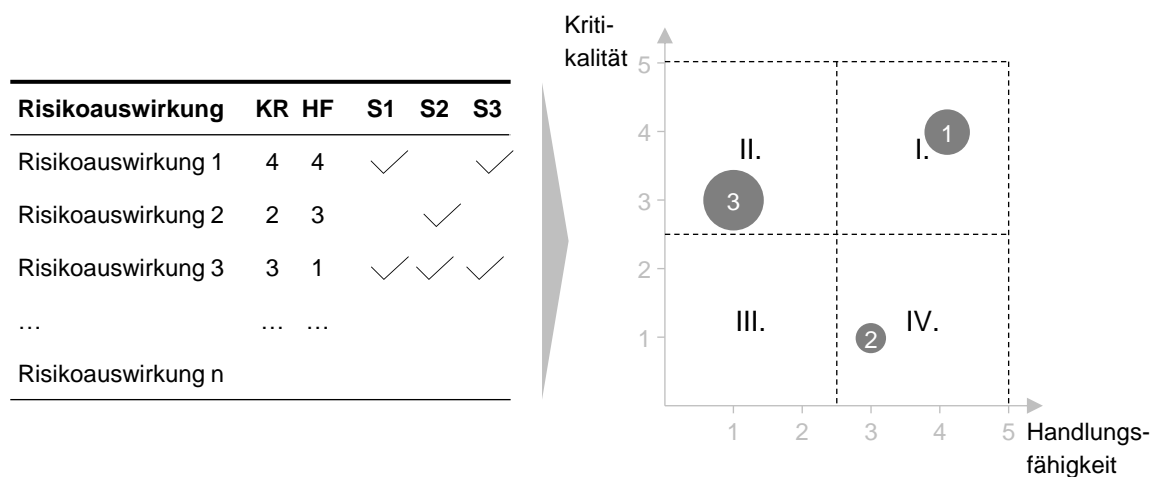


Abbildung 41: Priorisierung der Risikoauswirkungen

Über die Maßnahmen, welche den Risiken zugordnet wurden, lässt sich ein Rückschluss auf das Produktionssystem ziehen. Jene Elemente des Produktionssystems, die über mehrere Szenarien hinweg mit Maßnahmen zur Risikominimierung bedacht wurden, sind es,

die als „schwach“ identifiziert werden können. Die Änderung dieser Elemente ist ein wichtiger Hebel für die Erhöhung der Zukunftsrobustheit des Produktionssystems.

### 5.8.3 Subjektive Stressevaluation

Neben der Kritikalität ist vor allem die Einschätzung der Handlungsfähigkeit ein entscheidendes Kriterium für die Bewertung der Schwere des Szenarios – die Summe der Risiken, die von den Expert\*innen mit „geringem Handlungsspielraum“ für Gegenmaßnahmen eingestuft wurden, ist ein Indikator für den subjektiven Stress, den das Produktionssystem durch die Szenarien erfährt. Zur Erklärung dieses Zusammenhangs wird das Modell von Stress noch einmal aufgegriffen. Stress entsteht nicht nur in Abhängigkeit von der Belastung und Fähigkeiten, sondern auch durch die subjektive Bewertung dieses Verhältnisses (vgl. hierzu Kapitel 2.4.1). Deswegen wird für die abschließende Bewertung der Szenarien die Einschätzung der Handlungsfähigkeit in den Fokus gerückt. Dies bedeutet, dass Szenarien als umso schwerwiegender für das Produktionssystem eingeschätzt werden, je mehr Risiken als nicht oder nur schwer abwendbar eingeschätzt werden. Dies ist ein sehr qualitativer und subjektiver Wert. Aber er ermöglicht eine neue Perspektive auf die Bewertung der Risiken – nämlich dass die Fähigkeit mit dem Szenario umzugehen nicht nur an technischen und organisatorischen Maßnahmen hängt, sondern auch an der subjektiven Erwartung der Manager\*innen und Expert\*innen.

Weiterhin sind die qualitative Analyse der Belastungsszenarien und die daraus entstehenden Risiken ein zentrales Ergebnis des Stresstests (vgl. hierzu auch Kapitel 5.5). Die Analyse der Belastungsszenarien mit den jeweiligen Ereignissen und Dynamiken sollte gemeinsam mit den quantitativen Ergebnissen für eine vereinfachte Kommunikation anschaulich zusammengefasst und kommuniziert werden.



## 6 Validierung am Anwendungsbeispiel

### 6.1 Allgemeines

Die im vorherigen Kapitel erarbeitete Methodik wird an einem Anwendungsbeispiel validiert. Hiermit soll der Nachweis erbracht werden, dass sich der Stresstest für seinen Einsatzzweck eignet und die Anforderungen, wie in Kapitel 4.2 formuliert, erfüllt werden.

#### 6.1.1 Technische Umsetzung

Für die Zusammenarbeit mit Expert\*innen wurden Programme von Microsoft Office®, wie Power Point® und Word® genutzt. Die Meetings, die nicht persönlich stattfinden konnten, wurde mit Hilfe von Microsoft Teams® gestaltet. Für die mathematische Umsetzung wurde Microsoft Excel® genutzt und für die Durchführung der Monte-Carlo-Simulation Crystal Ball® von Oracle.

#### 6.1.2 Ausgangssituation und Hinweise

Im Folgenden wird das Anwendungsbeispiel vorgestellt, welches anhand eines Unternehmens mit Hauptsitz in Nordamerika durchgeführt wird. Das Unternehmen stellt Flugzeuge her. Aus Gründen der Geheimhaltung können nur modifizierte Daten für die Validierung genutzt werden. Der Name des Unternehmens, die Orte der Fertigung und Montage, sowie der Flugzeugtyp werden für die Publikation dieser Arbeit verändert. Das Unternehmen ist durch Investoren finanziert. Es wird im Folgenden ‚Caeli Aviation‘ genannt und beim Flugzeugtyp wird von einer Single-Engine-Piston-Maschine (SEP) des Modells G1 gesprochen. Das Produktionssystem für die Validierung umfasst zwei Standorte und es wird bisher nur ein Flugzeugtyp gefertigt und montiert. Eine grobe Übersicht zum Unternehmen ist in Abbildung 42 skizziert.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der beispielhaften industriellen Anwendung in Auszügen beschrieben. Abschließend werden die Ergebnisse kritisch diskutiert.

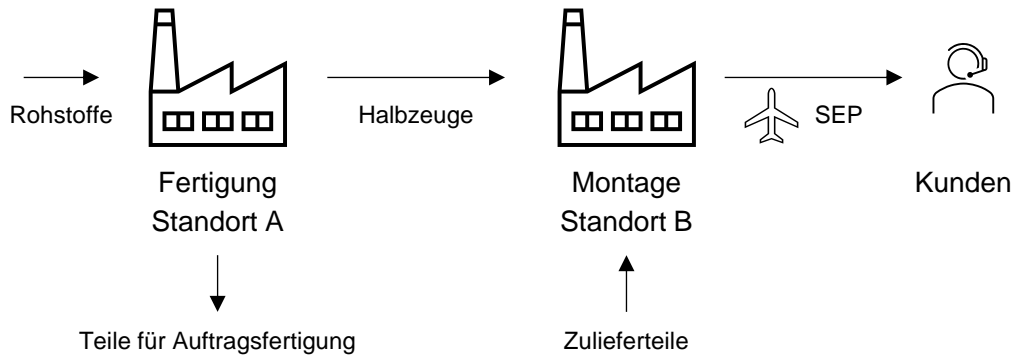


Abbildung 42: Grobes Schema für den Flugzeugbau im Anwendungsbeispiel

## 6.2 Identifikation kritischer Prozesse

Die Prozessaufnahme lag im Unternehmen bereits vor. Eine anonymisierte, vereinfachte Visualisierung der Fertigungs- und Montageprozesse wird in Abbildung 43 dargestellt.

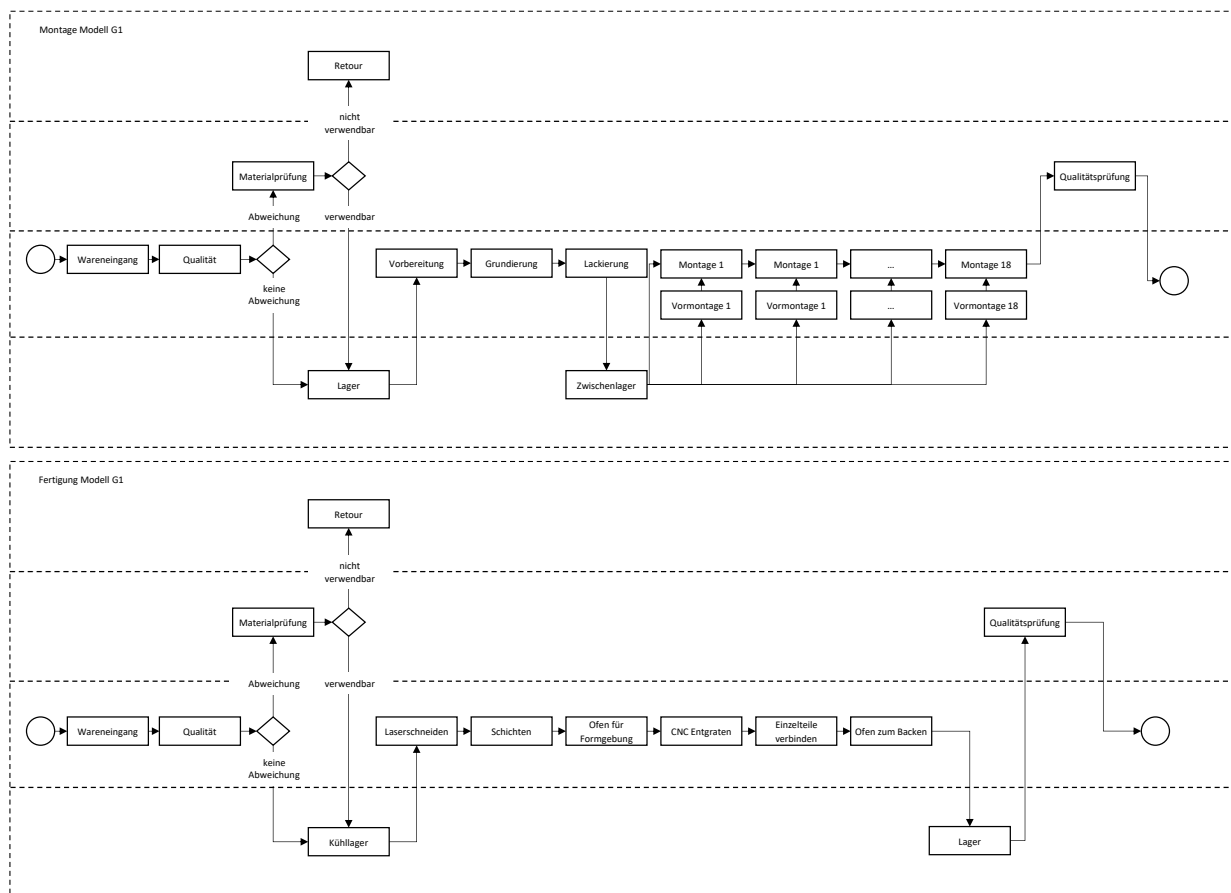


Abbildung 43: Überblick zu den Fertigungs- und Montageprozessen im Anwendungsbeispiel

Als kritische Prozesse für die industrielle Anwendung wurden die Fertigung, die Hauptmontage und die Montageversorgung mit Halbzeugen vorausgewählt.

### 6.3 Entwicklung der Umfeldszenarien

Im Rahmen der Szenarioanalyse wurden als erstes die Einflussfaktoren analysiert. Es wurden 12 Einflussbereiche mit 22 Einflussfaktoren identifiziert. Basierend auf den Einflussfaktoren wurden in Workshops Projektionen erarbeitet – der Zeithorizont für die Erarbeitung der Szenarien wurde auf 5 Jahre festgelegt.

Anschließend wurden konsistente, hypothetische Zukunftsszenarien entwickelt und beschrieben. Auszüge der Kurzbeschreibung der drei Szenarien mit den dazugehörigen Projektionen werden in Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 vorgestellt.

#### **Szenario 1: Das Boom-Szenario**

Die Weltwirtschaft und die Wirtschaft in Kanada, sowie die Konjunktur und die Kaufkraft sind stetig gewachsen. Die Arbeitsmarktlage ist entspannt und es gibt keinen Protektionismus des Arbeitsmarktes. Der Markt der SEP-Flugzeuge ist attraktiv für etablierte und insbesondere asiatische Hersteller. Aufgrund der Anzahl der Mitbewerber hat ein leichter Preisverfall zu niedrigeren Marktpreisen geführt. Zwar gibt es durch die florierende Wirtschaft ausreichend Lieferanten für die Teilefertigung, aber bei neuen Lieferanten sind umfassende Qualitätskontrollen und entsprechende Prozesse notwendig. Die TCCA (Transport Canada Civil Aviation) hat einen besonderen Fokus auf die Kontrolle und Regulierung des privaten Flugzeugmarktes. Daher ist die Anzahl der Prozess-Audits hoch und eine Zulassung mit neuer Motorenart innerhalb des SEP-Segmentes nicht möglich. Die Arbeitsmarktlage im Werk in China ist angespannt, da sich der Wettbewerb um gut ausgebildete Mitarbeiter\*Innen verstärkt hat.

Bündel der Projektionen:

<b>Einflussfaktor und Deskriptor</b>	<b>Projektionen</b>
<b>Klimawandel</b>	
Regulatorien, Abkommen und Gesetze	Keine Regulierung durch den Staat
<b>Konjunktur KA</b>	
Kaufkraft	Wirtschaftsaufschwung, Kaufkraft nimmt zu
<b>Politik KA</b>	
Zugang zum Produktionsstandort China	Keine Beeinträchtigung im Handel mit China
<b>Elektromotorenentwicklung</b>	
Batterieentwicklung	Verbesserte Batterietechnologie mit hoher Effizienz und extrem schneller Ladezeit

<b>Markt SEP-Flugzeuge</b>	
Anzahl Anbieter im Markt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl der Anbieter nimmt drastisch zu, große etablierte Flugzeughersteller steigen in den Markt ein</li> <li>• Chinesischer Hersteller steigt in den Markt ein und wird von der Regierung stark unterstützt</li> </ul>
Wachstum des Marktes	Markt für private Flugzeuge wächst
Durchschnittliche Produktpreise	Durchschnittspreise sinken, da etablierte Flugzeughersteller zu günstigeren Preisen produzieren können
<b>Auftragsfertigung</b>	
Auftragsfertigung	Es gibt so viele Aufträge für die Auftragsfertigung, dass alle laufenden Kosten gedeckt werden, Markt attraktiv und wachsend
<b>Lieferantenverfügbarkeit</b>	
Anzahl	Anzahl Lieferanten nimmt zu, Importe von anderen Lieferanten werden möglich
<b>Lieferantenqualität für Zukaufteile</b>	
	Schwankende Qualität, Produktqualität nimmt dadurch Schaden
<b>TCCA</b>	
Regulatorien SEP (Reife der Zertifizierung)	Regelmäßige Audits werden durchgeführt, strengere Kontrolle von Prozessen
Zulassung neuer Motoren	Zulassung im Segment SEP nicht möglich, Flugzeug müsste in neuem Segment für Elektro-Flugzeuge zugelassen werden
<b>Investoren</b>	
Investitionskapital	Zusätzliche Investoren steigen ein
<b>Arbeitsmarkt China</b>	
Anzahl anderer produzierender Unternehmen am Produktionsstandort	Ein neues Unternehmen mit großem Kapital öffnet am Produktionsort und wirbt gute Mitarbeiter ab

Abbildung 44: Szenario 1 des Anwendungsbeispiels



**Szenario 2: Das grüne Szenario mit einer starken Marke**

Die treibende Veränderung in Politik und Gesellschaft der letzten Jahre war der Klimaschutz und die Begrenzung der Erderwärmung. Aufgrund dieser Entwicklungen wurden von der Regierung Regularien und Gesetze erlassen, die zu einer Reduktion des Ausstoßes von CO<sub>2</sub> führen sollen. In Kanada wird eine Steuer auf den Ausstoß von CO<sub>2</sub> im Flugverkehr verhängt. Die Technologieentwicklungen haben große Sprünge gemacht und die Neuentwicklung von Batterietechnologien hat zu deutlich effizienteren Batterien geführt und die Ladezeit extrem verkürzt. Das Gewicht von Elektromotoren konnte zusätzlich reduziert werden. Der Markt wächst langsam und die Durchschnittspreise wurden über die Jahre gesteigert. Der Markenwert von Caeli ist stark gestiegen, da berühmte Persönlichkeiten Flugzeuge als Prestige-Objekt gekauft haben.

Bündel der Projektionen:

<b>Einflussfaktor und Deskriptoren</b>	<b>Projektionen</b>
<b>Klimawandel</b>	
Regularien, Abkommen und Gesetze	Starke Gesetze zur Reduktion von CO <sub>2</sub> Ausstoß, CO <sub>2</sub> -Steuer auf Flugverkehr
<b>Elektromotorenentwicklung</b>	
Batterieentwicklung	Verbesserte Batterietechnologie mit hoher Effizienz und extrem schneller Ladezeit
Gewicht der Motoren	Motorengewicht nimmt drastisch ab
<b>Markt SEP-Flugzeuge</b>	
Anzahl Anbieter im Markt	Anzahl der Anbieter nimmt ab, eine Marktflucht findet statt
Wachstum des Marktes	Leichtes Marktwachstum, SEP werden als privates Prestige-Objekt gegenüber Autos interessanter
Durchschnittliche Produktpreise	Durchschnittspreise steigen, da die Flugzeuge hoch "technologisiert" sind und viel Komfort und Sicherheit anbieten
<b>Marke Caeli Aviation</b>	
Markenwert (vernetzter Markt)	Die kanadische Premierministerin kauft mehrere Caeli Aviation Flugzeuge
<b>Lieferantenverfügbarkeit</b>	
Anzahl	Es gibt nur einen Lieferanten für ein besonderes Zulieferteil, totale Abhängigkeit
<b>TCCA</b>	
Regularien PSE (Reife der Zertifizierung)	Sehr viel striktere Vorgaben, neue Technologien und Bauteile
<b>Investoren</b>	
Investitionskapital	Zusätzliche Investoren steigen ein

Abbildung 45: Szenario 2 des Anwendungsbeispiels

**Szenario 3: Das Absturz-Szenario**

Das Szenario ist davon geprägt, dass sich Caeli Aviation als Flugzeugbauer nicht erfolgreich am Markt etabliert – die Reputation ist aufgrund eines Unfalls gesunken. Obwohl die Wirtschaft wächst und private Flugzeuge verkauft werden, bleibt das Markensegment SEP ein sehr kleiner Markt mit wenigen Verkäufen für Caeli Aviation. Aufgrund der generell guten wirtschaftlichen Situation wachsen andere Privatflugzeug-Segmente durchaus und mehr Anbieter treten in den Markt ein, auch chinesische Anbieter, welche sehr günstige Preise anbieten können und bisher ein adäquates Kundenvertrauen besitzen. Die TCCA hat nach dem Unfall strengere Zertifizierungsrichtlinie herausgegeben und es wurden mehr Audits durchgeführt. Das Geschäft der Auftragsfertigung entwickelt sich zu einem soliden Geschäftsmodell, da die Nachfrage für Zulieferteile groß ist.

Bündel der Projektionen:

<b>Einflussfaktor</b>	<b>Projektionen</b>
<b>Konjunktur Kanada</b>	
Kaufkraft	Wirtschaftsaufschwung, Kaufkraft nimmt zu
<b>Politik Kanada</b>	
Zugang zum Produktionsstandort China	Keine Beeinträchtigung in dem Handel mit China
<b>Elektromotorenentwicklung</b>	
Batterieentwicklung	Verbesserte Batterietechnologie mit hoher Effizienz und extrem schneller Ladezeit
Gewicht der Motoren	Motorengewicht nimmt drastisch ab
<b>Markt SEP Flugzeuge</b>	
Anzahl Anbieter im Markt	Chinesischer Hersteller steigt in den Markt ein, wird stark von Regierung unterstützt
Wachstum des Marktes	Leichtes Marktwachstum, SEP werden als privates Prestige-Objekt gegenüber Autos interessanter
<b>Marke Caeli Aviation</b>	
Markenwert	Mehrere Kunden haben tragische Unfälle und die Reputation stagniert
<b>Contract-Manufacturing</b>	
Contract-Manufacturing	Es gibt so viele Aufträge, dass alle laufenden Kosten gedeckt werden, Markt attraktiv und wachsend
<b>Lieferantenverfügbarkeit</b>	
Anzahl	Es gibt nur einen Lieferanten für ein bestimmtes Zulieferteil, totale Abhängigkeit
<b>TCCA</b>	
Regulatorien (Reife der Zertifizierung)	Regelmäßige Audits werden durchgeführt, strengere Kontrolle von Prozessen
<b>Investoren</b>	
Investitionskapital	Probleme bei der Nachfinanzierung

Zusammenarbeit	Investoren haben sehr hohe Anforderungen, Vertrauen in das Management verschlechtert sich
----------------	---

Abbildung 46 : Szenario 3 des Anwendungsbeispiels

## 6.4 Entwicklung der Belastungsszenarien

Eine Beschreibung der Szenarien mit Hilfe von direkten Einflussfaktoren für das Produktionssystem ist für die Anwendung der Szenarien auf das Produktionssystem erforderlich. Die Einflussfaktoren sind durch die Größen des Rezeptormodells vorgegeben. Die Auswahl der Rezeptoren basiert auf der Einschätzung, welche Größen durch die Umfeldszenarien aktiviert werden. Nachdem die Auflistung der Rezeptoren sowie die Planungsgrößen gemeinsam erläutert wurden, wird mit der Auswahl begonnen. Dabei gilt es die Relevanz pro Szenario abzuschätzen und entsprechend auszuwählen. So kann eine Auflistung der Rezeptoren für die produktionspezifische Beschreibung der Szenarien bereitgestellt werden.

Tabelle 7: Auswahl der Rezeptoren und Planungsgrößen

Rezeptor	Planungsgrößen der Produktion	SZ 1	SZ 2	SZ 3
Quantität	• Produkt Stückzahl	X	X	X
	• Prozesse	X	X	X
	• Mitarbeitende	X		X
	• Betriebsstätten und -mittel	X		X
Produkt	• Struktur		X	X
	• Form			
	• Material		X	
	• Oberflächen		X	
	• Design und Farbe			
Qualität	• Produkt	X	X	
	• Prozess	X	X	
	• Arbeitsleistung		X	
	• Logistik			X
Zeit	• Organisation			X
	• Prozess	X		
	• Prüfung und Nacharbeit		X	
	• Transport und Wiederbeschaffung			X
	• Verteilzeiten und Stillstand	X		X
Kosten	• Material, Werkstoffe		X	
	• Mitarbeitende, Lohn und Gehalt	X		X
	• Equipment			
	• Service		X	X
	• Gesellschaft		X	

Technologie	• Produkt		X	
	• Produktion	X	X	X
	• Material			
	• Information/IT	X		X
	• Logistik			
Gesellschaft	• Regularien und Gesetze		X	
	• Verfügbarkeit von Mitarbeitenden	X		
	• Materialverfügbarkeit			
	• Dienstleistungsverfügbarkeit			
	• Informationsverfügbarkeit			

Basierend auf der Vorauswahl der Rezeptoren werden die Projektionen für die Planungsgrößen für die Szenarien erarbeitet. Die drei Umfeldszenarien bilden jeweils den Rahmen für die Ableitung der Belastungsszenarien. Die Zukunftsprojektionen wurden deduktiv aus den Szenarien abgeleitet. Das Belastungsszenario 1 besteht aus 14 Projektionen, die ein widerspruchsfreies Bündel des zukünftigen Zustandes des Produktionssystems von Caeli Aviation beschreiben. Das Zukunftsbild für das Produktionssystem ist gekennzeichnet durch eine hoch optimierte Montage, mit welcher bis zu 200 Flugzeuge pro Jahr montiert werden können. Für die Fertigung ist das starke Wachstum gekennzeichnet durch einen höheren Grad an Automatisierung. Die Ergebnisse der Projektion werden in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Projektionen der Planungsgrößen für Szenario 1

Rezeptor	Führungsgröße der Produktion	Nr.	Beschreibung der Projektion
Quantität	Produkt Stückzahl	1A	Starkes, kontinuierliches Wachstum der Jahresstückzahl: Stückzahl pro Jahr 200
	Prozesse	4A	Prozesse zur Sicherung der Qualität nehmen zu
		5A	Anzahl der Produktionsprozesse bleibt wie sie ist, nur die Taktzahl erhöht sich
	Mitarbeitende	6A	Stetig steigende Anzahl Montage: linear (angenähert) zu Stückzahlwachstum: 54 MA Fertigung: 100 MA, Wachstum abhängig von Anzahl der Bearbeitungszentren Qualität: Proportional zur Stückzahl: 18 Inspectors und 6 MRBs
	Betriebsstätten und Betriebsmittel	7A	Flächenwachstum im Wareneingang und Warenausgang (Flächenreserven werden aufgebraucht)
Qualität	Produkt	11A	Verbesserte Qualität von Lieferanten
	Prozess	12A	Gleichbleibende Qualität der Produktionsprozesse wurde trotz Wachstum sichergestellt

<b>Zeit</b>	Prozess	16A	Anzahl der Lieferteile, die im Container via Flugzeug aus China kommen, liegt bei 4 pro Woche
	Verteilzeiten und Stillstand	18A	Stillstand ist minimiert, Disposition ist professionalisiert
<b>Kosten</b>	Mitarbeiter, Lohn und Gehalt	20A	Löhne und Gehälter steigen aufgrund des guten Arbeitsmarktes; Lohnsteigerung 24%, Stückzahl abhängige Bonusauszahlung
<b>Technologie</b>	Produktion	22A	Produktionstechnologien werden automatisiert, um erhöhte Stückzahl zu erreichen, neue CNC-Fertigungszentren werden eingesetzt, besonders für große Carbon-Teile Veränderungen des Kundeneingriffspunktes verschiebt sich nach hinten, da bestimmte Individualisierung mit CNC Programmen nicht mehr realisiert werden können
	Information/Informationstechnik	23A	ERP-System muss eingeführt sein

Auch im Belastungsszenario 2 wird für das Produktionssystem ein Wachstum der Stückzahlen, aber auch ein neues Modell des Flugzeuges mit verändertem Motor erwartet. Ebenso wird eine grundlegende Veränderung in der Montage erwartet, sowie eine unsichere Versorgungslage und steigende Kosten für Material, da Lieferanten abwandern. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 beschrieben.

Tabelle 9: Projektionen der Planungsgrößen für Szenario 2

Rezeptor	Führungsgröße der Produktion	Nr.	Beschreibung
Quantität	Produkt Stückzahl	1B	kontinuierliches Wachstum der Jahresstückzahl Modell G1: Stückzahl pro Jahr 70
	Produkt Stückzahl	2A	kontinuierliches Wachstum der Jahresstückzahl Modell G2: Stückzahl pro Jahr 30
	Prozesse	5B	Verdopplung einzelner Montagestationen zur Parallelisierung eines Teils der Montageprozesse, 24 Montagestationen, eine zusätzliche Vormontage, zunehmende Logistikprozesse
Produkt	Struktur	8A	Re-Design für das neue Produkt mit verändertem Motor
	Material	9A	Veränderungen zu leichterem Material, Batterien als neue Art von Zulieferteilen
	Design und Farbe	10A	Optische Anpassung im Bereich Branding und Farbe
Qualität	Produkt	11B	Produktionsqualität Modell G2 ist ausreichend aber nicht optimiert

## VALIDIERUNG AM ANWENDUNGSBEISPIEL

	Prozess	12B	Prozessqualität Modell G2 ist ausreichend aber noch nicht optimiert
	Arbeitsleistung	13A	Arbeitsleistung ist qualitativ hoch
Zeit	Transport und Wiederbeschaffung	17A	Verlängerung und Unregelmäßigkeiten in der Wiederbeschaffungszeit
Kosten	Material, Werkstoffe	19A	Erhöhte Materialkosten

Im Belastungsszenario 3 sind sinkende Stückzahlen eine eindeutig abzuleitende Projektion. Neben dem Rückgang der Anzahl von Mitarbeitenden sind die Veränderungen in der Fertigung hervorzuheben. Eine Übersicht zu den Projektionen im Belastungsszenario 3 findet sich in Tabelle 10.

Tabelle 10: Projektionen der Planungsgrößen für Szenario 3

Rezeptor	Führungsgröße der Produktion	Nr.	Beschreibung
Quantität	Produkt Stückzahl	1C	Kontinuierlich sinkende Stückzahlen für Modell G1: Stückzahl pro Jahr 10
	Produkt Stückzahl	3A	Steigende Absatzzahlen in der Auftragsfertigung: 120 Teile pro Jahr
	Prozesse	5C	Anzahl der Fertigungsprozesse nimmt zu (Integration neuer Anlagen) Zusätzliche Logistikprozesse für Auftragsfertigung
	Mitarbeitende	6B	Abnahme der Anzahl MA in der Montage: 10 MA Leichte Zunahme der Anzahl MA in der Fertigung (Fertigungslogistik): 65 MA
	Betriebsstätten und Betriebsmittel	7B	Anzahl unterschiedlicher Betriebsmittel und Maschinen in der Fertigung nimmt zu
Produkt	Struktur	8B	Anzahl Produktarten im CM nimmt zu, Produktstrukturen werden von außen vorgegeben
Qualität	Logistik	14A	Qualität ist sehr gut, stetige Professionalisierung
Zeit	Organisation	15A	Planungen werden flexibler und verschieben sich von Klein-Serien-Fertigung in Richtung Werkstattfertigung, die Organisationszeiten für Teambesprechungen, Planungen nehmen zu

	Transport und Wiederbeschaffung	17B	Wiederbeschaffungszeiten sind verlängert
	Verteilzeiten und Stillstand	18B	Stillstandzeiten steigen anteilig, da weniger Flugzeuge produziert werden, Stillstandzeiten in der Fertigung aufgrund von Fertigungsanläufen
Kosten	Mitarbeiter, Lohn und Gehalt	20A	Gehälter und Löhne steigen (+9%) über fünf Jahre
	Service	21A	Servicekosten nehmen zu, sowohl für die Audits als auch für die Dokumentation, es muss mit externer Unterstützung gearbeitet werden
	Produktion	22B	Es werden neue Technologien, wie z.B.: Oberflächenbearbeitungsverfahren eingesetzt
	Information/Informationstechnik	23B	Eine neue Software für die Handhabung der CM-Teile wird benötigt

Für die Erweiterung der Belastungsszenarien, wurde die Analyse der Ereignisse und Dynamiken durchgeführt. Pro Projektion wurden diese benannt – der Prozess erfolgte teilweise parallel zur Bildung der Projektionen. Die Belastungsszenarien wurden in einer Tabelle zur Übersicht zusammengefasst – beispielhafte Auszüge dieser Dokumente sind in Abbildung 47 zusammengestellt.

Rezeptor	Führungsgröße der Produktion	Beschreibung der Projektion	Dynamik	Ereignisse
Quantität	Produkt Stückzahl	1A Starkes, kontinuierliches Wachstum der Jahresstückzahl für	Stetiges Wachstum	
	Prozesse	4A Prozesse zur Sicherung der Qualität nehmen zu		Neue Regulierung tritt in Kraft, Einführung entsprechender Qualitätsprozesse
	Prozesse	5A Produktionsprozessenanzahl bleibt wie sie ist, nur die Taktzahl erhöht sich		
	Mitarbeitende	6A Stetig steigende Anzahl Montage: linear (angenähert) zu Stückzahlwachstum: 54 Fertigung: 100 MA, Wachstum abhängig von Anzahl der Bearbeitungszentren Qualität: Proportional zur Stückzahl: 18 Inspectors und 6 MRBs	Stetiges Wachstum direkt abhängig von der erwarteten Stückzahl	
Betriebsstätten & Betriebsmittel	7A	Flächenwachstum im Wareneingang und Warenausgang (Flächenreserven werden aufgebraucht) Eine Zwischenlagerung von einzelnen Flugzeugen muss möglich sein		
	Qualität	Produkt	11A Verbesserte Qualität von Lieferanten	Neue Lieferanten werden qualifiziert und Lieferantenwechsel können vorgenommen werden
Zeit	Prozess	12A Gleichbleibende Qualität der Produktionsprozesse wurde trotz Wachstum sichergestellt		Einführung zusätzlicher Qualitätsgate Verstärkung regelmäßiger Aktivitäten: Rootcause Analysis
	Prozess	16A Anzahl der Lieferteile, die im Container via Flugzeug aus China kommen, liegt bei 4 pro Woche		Erweiterung Wareneingang Personalerweiterung für Mehrschicht-system
	Verteilzeiten und Stillstand	18A Stillstände sind minimiert, Disposition ist professionalisiert		Ingenieure sind permanent an der Produktionslinie (material review board engineers), Veränderung der Arbeitsweise, MRBs
Kosten	Mitarbeiter, Lohn und Gehalt	20A Löhne und Gehälter steigen aufgrund von guten Arbeitsmarkt; Lohnsteigerung 24%		Maßnahmen: Bonus basierend auf Stückzahlen, Beteiligung am Wachstum, Transparenz (offenere Kommunikation).
	Technologie	Produktion	22A Produktionstechnologien werden automatisiert um erhöhte Stückzahl zu erreichen. Neue CNC-	
Information/Informationstechnik	23A	ERP-System muss eingeführt sein		Softwareprojekt zur Einführung des ERP-Systems

Abbildung 47: Auszüge der Analyse und Erweiterung der Belastungsszenarien

## 6.5 Auswirkungsanalyse und Beurteilung der Risiken

Als Auswirkungen der Belastungsszenarien entstehen Risiken. Diese werden im Rahmen der Analyse identifiziert, benannt und detailliert. Diese wurden mit Hilfe der Bow-Tie-Analyse strukturiert. Die Entwicklungen und Ereignisse stellen den Risikoeintritt dar und ihre Auswirkungen werden systematisch ergänzt. Ein Eindruck der Ergebnisse der Workshops ist in Abbildung 48 dargestellt.

Führungsgröße der			Risiko	Kriti-	Handlungs-	
Führungsgröße der			Risiko	Kriti-	Handlungs-	
Rezeptor	Produktion	Beschreibung der Projektion	Risiken	No.	kalität	fähigkeit
Qualität	Produkt	11A Verbesserte Qualität von Lieferanten	Montageunterbrechungen nach Lieferantenwechsel	1.1	3	2
			Verbau eines fehlerhaften Bauteils	1.2	5	4
	Prozess	12A Gleichbleibende Qualität der Produktionsprozesse wurde trotz Wachstum sichergestellt	Auftreten von Fertigungs- und Montagefehlern führt zu mehr Nacharbeit und weniger Produktionskapazitäten, Erhöhung der Herstellkosten	1.3	3	2
Zeit	Prozess	16A Anzahl der Lieferteile, die im Container via Flugzeug aus Mexiko kommen, liegt bei 4 pro Woche	Wareneingang wird zum Bottleneck. Kann zu Verlangsamung der Montageversorgung führen	1.4	4	3
	Verteilzeiten und Stillstand	18A Stillstände sind minimiert, Disposition ist professionalisiert	Risiko des Produktionsstillstands, sobald an einer Station Probleme sind; Risiko MRBs sind schwer zu finden; Herstellungskosten steigen, wenn es zu Überstunden, wegen fehlender MA kommt	1.5	3	2
Kosten	Mitarbeiter, Lohn und Gehalt	20A Löhne und Gehälter steigen aufgrund von gutem Arbeitsmarkt; Lohnsteigerung 24% Stückzahlabhängige Bonusauszahlung	Mitarbeiterverlust und Kündigungswelle Risiko: „Sozialunfrieden“ aufgrund von unregelmäßigen und ungleichmäßigen Gehaltserhöhung	1.6	2	1
Technologie	Information/IT	23A ERP-System muss eingeführt sein	Umstellung führt zu Produktionsstillstand Ressourcenbindung in Form von MA und Zeit	1.7	4	3

Abbildung 48: Auszug der Ergebnisse aus den Risikoanalysen und Bewertungen pro Belastungsszenario

Eine detaillierte Darstellung der Auswirkungsanalyse wird im Folgenden an zwei Beispielen aus Szenario 1 vorgestellt. Das erste Beispiel zum Risiko von Stillständen durch Überlastungen wird in Abbildung 49 vereinfacht visualisiert. Die Verteilzeiten und Stillstände wurden für das Szenario 1 als minimiert projiziert (Projektion 18A). Aufgrund der steigenden Stückzahlen wurde die Montage optimiert und die Taktzahl minimiert. Weiterhin wurde die Disposition professionalisiert, sodass die Bereitstellung der Zulieferteile gut synchronisiert ist. Die Konsequenz daraus ist, dass die ‚MRBs‘ und ‚Engineers‘ eine höhere Arbeitslast haben und primär ihre Aufgaben zur direkten Betreuung der Produktion wahrnehmen werden. Es wurden zwei Risikoauswirkungen benannt. Einmal das Risiko eines Montagestillstandes aufgrund von einer nicht ausreichenden Anzahl von Mitarbeitenden zur gleichen Zeit im Montagewerk oder aufgrund einer nicht adaptierten Verantwortlichkeitsstruktur für das gewachsene Team. Das zweite Risiko ist das Ansammeln einer hohen

<sup>24</sup> Funktionen bei Caeli Aviation. Die material review board (MRB) sind Mitarbeiter die Verantwortung für die Qualität der Prozesse tragen. Und die Engineers sind Produktionsingenieur\*innen.



Anzahl an Überstunden. Diese Überstunden können die Herstellungskosten unerwartet erhöhen.

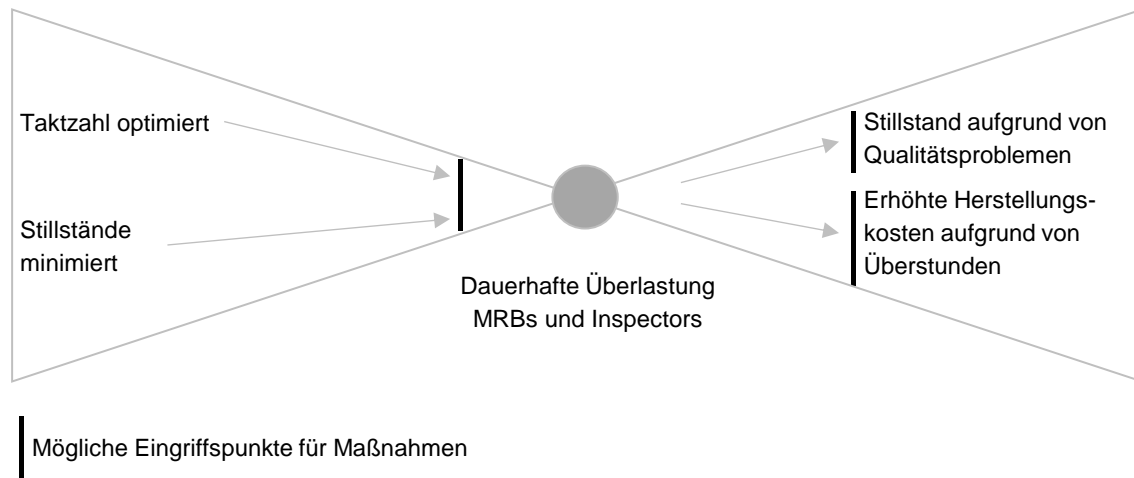


Abbildung 49: Bow-Tie-Analyse für die Belastung ausgelöst durch die Minimierung von Stillständen

Das zweite Beispiel beschäftigt sich mit dem potenziellen Verlust zentraler Mitarbeiter\*innen und wird in Abbildung 50 vereinfacht visualisiert. Im Szenario 1, dem Wachstumsszenario, wurden die Gehalts- und Lohnkosten als stark steigend projiziert (20A). Das zugehörige Ereignis war, dass die Lohnpolitik gleichbleibt und Bonusauszahlungen abhängig von der Stückzahl und individuellen Boni beibehalten werden. Das zugehörige Risiko ist der Mitarbeiterverlust und Kündigungswellen.

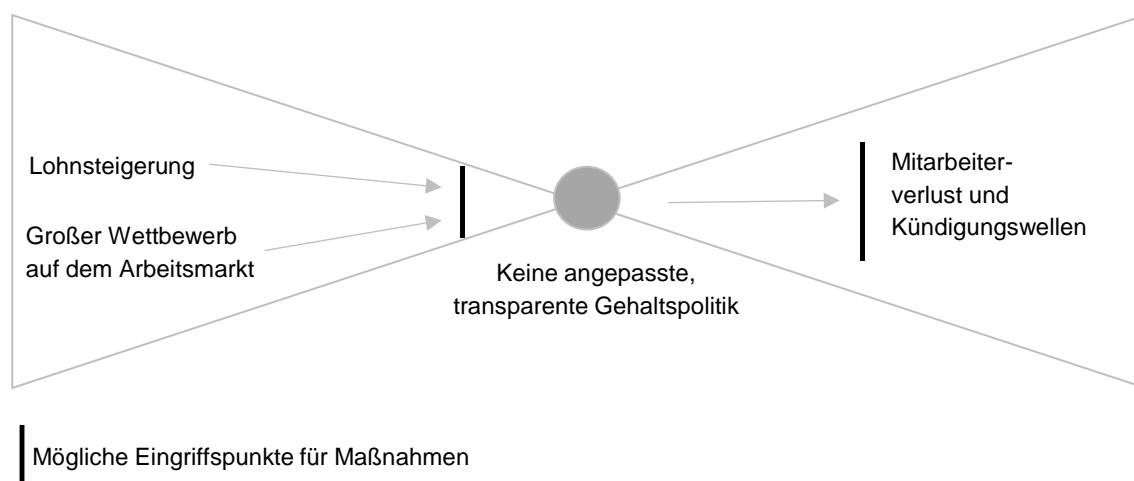


Abbildung 50: Bow-Tie-Analyse für die Gehaltspolitik in einem stark wachsenden Unternehmen und Markt  
Nach der Analyse der Belastungsszenarien wurden die identifizierten Risiken entsprechend der Kritikalität und Handlungsfähigkeit für das Unternehmen bewertet und in einem Risikoportfolio visualisiert (vgl. Abbildung 51).

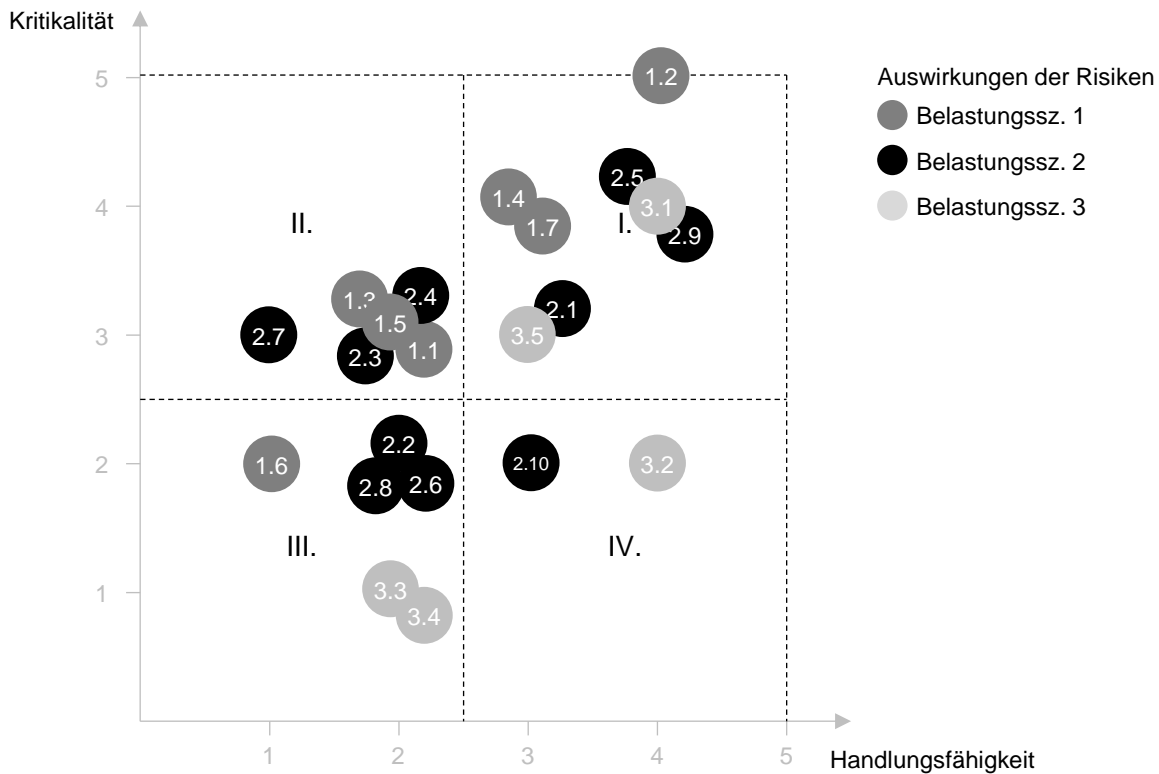


Abbildung 51: Risiko-Portfolio des Anwendungsbeispiels

Das Portfolio wurde für die Beurteilung der Risiken pro Szenario genutzt. Dabei wurde für Caeli Aviation die Kritikalität anhand der mittleren Ertragsbelastung, der realistische Höchstschaden und die Wirkungsdauer der Risiken abgeschätzt. Die Fähigkeit auf die Risiken adäquat reagieren zu können, wurde nach drei Kriterien bewertet: dem Zeitraum zwischen Entdeckung und Eintritt, der Wahrscheinlichkeit der Erkennung und der durchschnittlichen Umsetzungszeit von Maßnahmen zur Abwendung.

Für Szenario 1 sind die drei kritischsten Aspekte, das gesteigerte Risiko ein fehlerhaftes Bauteil zu verbauen (1.2), die räumlichen Restriktionen im Wareneingang (Bottleneck bei der Annahme von Halbzeugen) (1.4) und ein langer und erwarteter Produktionsstillstand aufgrund von Fehlern am ERP-System (1.7). Spezifisch für das Szenario 2 wurden drei Risiken im Quadranten I einsortiert. Erstens das Risiko, dass eine räumliche Trennung der Vormontagen beider Flugzeugmodelle durch die TCCA angeordnet wird, aber räumlich nicht ermöglicht werden kann (2.5). Zweitens das Risiko, dass Nachbesserungen und Wiederholungen von Audits zu zusätzlichen unerwarteten Nachweispflichten und zum zeitweiligen Produktionsstillstand führen (2.9). Drittens das Risiko, dass die Montage für das

neue Modell G2 nicht entsprechend der Umsatzzahlen umgestellt werden kann und so Auslastungsprobleme entstehen. Diese würden dann zu einer erhöhten Durchlaufzeit, Fehlbeständen (gebundenem Kapital) und erhöhten Herstellungskosten führen (2.1). Für das Szenario 3 ist die Kombination von 2 Risiken beispielhaft als erhöhte Belastung hervorzuheben. Einmal der Verlust von zentralen Arbeitskräften und damit die Gefährdung eines weiteren effizienten und reibungslosen Ablaufs der Produktion. Zum anderen, dass eine erhöhte Anzahl an Auftragsfertigungen eine neue Software erfordert. Die Einführung wird in dem Szenario als kritisch gesehen, weil sie unter Zeit und Kostendruck mit eingeschränkten Ressourcen durchgeführt werden müsste. Eine Übersicht zu allen Risiken und ihrer Priorisierung sind in Anhang D zu finden.

## 6.6 Zuordnung von Maßnahmen zur Risikosteuerung

Nach der qualitativen Bewertung wird die Risikosteuerung in den Fokus des Vorgehens gerückt, um Maßnahmen zu sammeln, mit denen den erkannten Risiken begegnet werden kann. Für die Zuordnung der Maßnahmen konnte auf bereits existierende Maßnahmen und Strategien zurückgegriffen werden. Darüber hinaus wurden zusätzliche Maßnahmen im Rahmen eines Brainstormings entwickelt. In Tabelle 11 wird eine Auswahl der Maßnahmen vorgestellt. Die Maßnahmen werden anhand der Mechanismen der Risikobehandlung sortiert.

Tabelle 11: Auszug von Maßnahmen zur Risikosteuerung

Risikobehandlung	Maßnahmen	Risiko
Reduktion und Begrenzung	Installationssequenz ändern	1.1 Montageunterbrechungen nach Lieferantenwechsel
	Produktionsumstellung szenariobasiert planen	2.2 Altes Modell wird langsamer substituiert als erwartet, das führt zu einer Fehlbelastung der Montage und zu Nachbestellungen von Zulieferteilen
Selbstbehalt	Schulungen	2.6 Großer Anteil an Nacharbeit
Verlagerung	Rückrufaktion / Versicherung des Rückrufs	1.2 Verbau eines fehlerhaften Bauteils
Teilung und Diversifikation	Vormontage für Modell G2 bei einem Partner	2.5 TCCA Audits führen zu Restriktionen für die Anpassung der Montage (z.B. räumliche Trennung)

## 6.7 Monetäre Bewertung der Belastungsszenarien

In dieser Phase des Stresstests soll der monetäre „Gesamtrisikoumfang“ der einzelnen Szenarien bewertet werden. Hierfür werden die Risikoauswirkungen quantitativ bewertet und mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation aggregiert. Das Verfahren ermöglicht es, beliebige, verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen abzubilden. Eine Aggregation setzt voraus, dass die Risiken einzelnen Positionen in der Unternehmensplanung zugeordnet werden können (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 118). Im Rahmen der hier vorgestellten industriellen Anwendung wurde keine monetäre Bewertung der Belastungsszenarien durchgeführt. In der Studie konnte kein Profitabilitätsmodell mit ausreichendem Detaillierungsgrad erarbeitet oder bereitgestellt werden. Weiterhin war eine monetäre Bewertung innerhalb der Studie nicht gewünscht. Die weitere Auswertung der Ergebnisse stützt sich deswegen auf die erarbeiteten, qualitativen Beurteilungen der Belastungsszenarien.

Eine Validierung des Bewertungsvorgehens an sich ist nicht notwendig, da das Vorgehen dem Stand der Technik entspricht und für den Stresstest lediglich eingebunden und nicht weiterentwickelt wurde.

## 6.8 Ergebnisse

Für die Evaluation wurden die Risiken über die Szenarien hinweg miteinander verglichen. Zusammengehörige Risikoauswirkungen wurden zu einer Auswirkung zusammengefasst. Die meisten Risiken hatten eine spezifische Bedeutung für die einzelnen Szenarien, aber es wurden auch gleiche Risikoauswirkungen in mehreren Belastungsszenarien identifiziert. Die Auswirkungen und möglichen Maßnahmen zur Steuerung verdienen folglich mehr Aufmerksamkeit als andere Risiken mit gleicher Priorisierung. Einen Auszug aus der erarbeiteten Risikopriorisierung und das zugehörige Risikoportfolio sind in Abbildung 52 dargestellt.

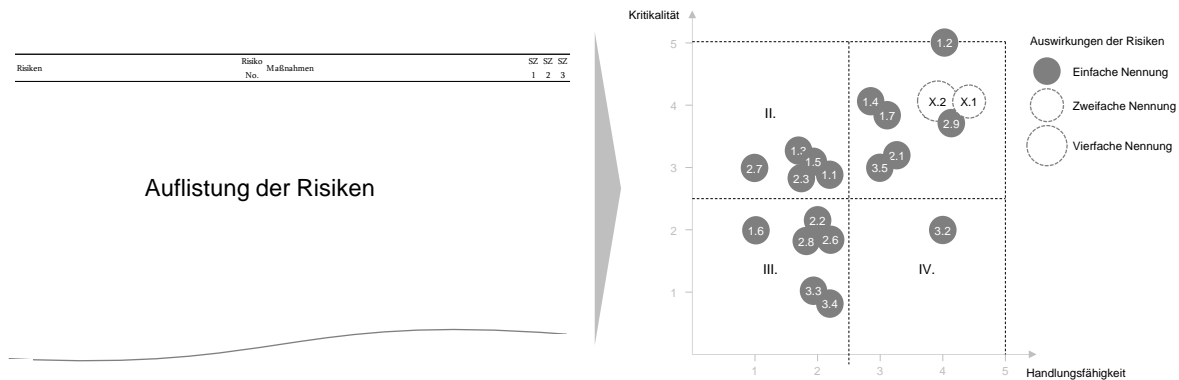


Abbildung 52: Priorisierung der Risikoauswirkungen

Eine Zusammenfassung der gesamten priorisierten Risiken und der zugehörigen Maßnahmen ist im Anhang D aufgelistet.

Die Auswirkungsanalyse und Zuordnung der Maßnahmen ermöglicht eine Evaluation dazu, welche Elemente des Produktionssystems von den Belastungsszenarien besonders ‚betroffen‘ sind oder auch über die Szenarien hinweg in den Fokus für ein zukunftsrobusteres System rücken sollten. Im Folgenden werden aus der Ergebnisanalyse zwei zentrale Aspekte vorgestellt:

- *Räumliche Einschränkungen im Montagewerk in Kanada*  
Auswirkungen der Belastungsszenarien 1 und 2 zeigen ein verstärktes Risiko durch die räumlichen Einschränkungen im Montagewerk in Kanada an. In beiden Szenarien sollten Maßnahmen ein Bottleneck oder die Restriktion für die Gestaltung der Vormontagen verhindern (X.2, 2.4, 2.5, 1.4, 2.1). Hierfür sind 4 mögliche Maßnahmen im Rahmen des Stresstests zugeordnet worden. Eine von den Maßnahmen ist, eine Vormontage / Montage im Werk in China zu ermöglichen. Damit würde die Vormontage für das aktuelle Modell schon von Kanada nach China verlagert werden, um eine Grundlage für eine schnelle Reaktion auf Entwicklungen in Richtung Szenario 1 und 2 zu ermöglichen.
- *Zentrale Arbeitskräfte*  
Der Verlust von zentralen Positionen in der Produktion, hierzu zählen die Ingenieur\*innen, welche die Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktion bilden, sowie die zuvor erwähnten MRB und Engineers, werden in Szenario 1 und

3 als Risiken hoch priorisiert. Maßnahmen für die Abwanderung dieser Mitarbeiter\*innen sind zur erfolgreichen Bewältigung der beiden Szenarien zentral und in beiden Fällen wäre ein Verlust der Arbeitskräfte ein großes Risiko (X.1, 1.6, 3.1). Eine der möglichen Maßnahmen ist die gezielte Mitarbeiterbindung über Unternehmensanteile oder andere Incentivierungen.

Die weiteren Ergebnisse beziehen sich auf die Veränderung und Priorisierung von Qualitätsprozessen in der Fertigung und Montage, das Bestands- und Teilemanagement, sowie die produktionsnahe Lagerhaltung und Disposition, die hier nicht weiter beschrieben werden.

## 6.9 Bewertung der Methodik

Für die Struktur der Evaluation werden die Evaluationsdimensionen nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 184) zu Grunde gelegt. Die Autor\*innen unterscheiden grundsätzlich drei Dimensionen der Evaluation, wobei sich zwei Dimensionen auf die Evaluation der Methodik im Rahmen dieses Forschungsvorgehens übertragen lassen: die Anwendungs- und die Erfolgsevaluation.

Ziel der Anwendungsevaluation ist die Untersuchung der Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit des Forschungsbeitrages. Hierfür sollen verschiedene Aspekte einbezogen werden, welche sich auch auf das Forschungsvorhaben dieser Arbeit übertragen lassen. So soll neben den oben genannten Aspekten auch evaluiert werden, ob die zentralen Aspekte, die diesem Forschungsvorhaben zu Grunde liegen, durch das Ergebnis berücksichtigt werden und ob die Ergebnisse wie erwartet erreicht werden konnten. Angepasst an das methodische Vorgehen dieser Arbeit (vgl. Kapitel 1.3) werden die Aspekte der Anwendungsevaluation für die formulierten Anforderungen (vgl. Kapitel 1) evaluiert. Die Evaluation ist auf der Basis der Forschungsergebnisse sowie den Erfahrungen und Rückmeldungen aus der industriellen Anwendung von der Autorin durchgeführt worden.

Eine Erfolgsevaluation, also eine Evaluation messbarer Erfolgsfaktoren, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgestellt werden. Die Erfolgsevaluation für den Stresstest von Produktionssystemen nimmt einen Zeitraum von mehreren Jahren ein, da die Zukunftsfähigkeit über mehr als drei Jahre beurteilt werden müsste. Eine solche, notwendigerweise breit

angelegte Evaluationsstudie konnte in der industriellen Anwendung aufgrund von limitierter Zeit und monetären Ressourcen nicht durchgeführt werden. In Abbildung 53 wird das Maß, mit dem das Vorgehensmodell die gestellten Anforderungen erfüllt, visualisiert.

<b>Anforderungen</b>	<b>Methodik dieser Arbeit</b>
<i>Spezielle Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme</i>	
Entwicklung von extremen Umfeldszenarien	●
Identifikation von Risikoschwerpunkten	●
Auswirkungsanalyse	●
Quantifizierung der Auswirkung	●
<i>Spezielle Anforderungen für die Übertragung auf Produktionssysteme</i>	
Entwicklung von Belastungsszenarien	●
Risikoidentifikation und -analyse	●
Aggregation der Risiken	
<i>Allgemeine Anforderung für die praktische Anwendung</i>	
Verständlichkeit	●
Übertragbarkeit	●
Transparenz	●
Skalierbarkeit	●

erfüllt  
  teilweise erfüllt  
 nicht Teil der Evaluation

Abbildung 53: Bewertung des Vorgehensmodells für den Stresstest

*Spezielle Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme*

Die Erfüllung der speziellen Anforderungen für den Stresstest für Produktionssysteme wird durch die vorgestellte Anwendung in der industriellen Praxis angezeigt.

Im Speziellen kann die Anforderung, dass die Entwicklung von extremen Umfeldszenarien berücksichtigt werden soll, erfüllt werden. Die Anwendung der Szenariotechnik ermöglicht und unterstützt systematisch die Entwicklung dieser Umfeldszenarien. Das intuitive Verfahren, welches im Anwendungsfall aufgrund der limitierten Schlüsselfaktoren genutzt wird, konnte erfolgreich angewendet werden. Für das systematische Verfahren wurde ein bereits validiertes Vorgehen in den Stresstest eingebunden – bei einem so etablierten Verfahren kann die Möglichkeit der erfolgreichen Anwendung vorausgesetzt werden.

Die Risikoschwerpunkte konnten identifiziert werden. Die Kombination der Standardwerkzeuge ermöglicht einen gezielten Einsatz und Fokus für den Stresstest.

Die Auswirkungen der Szenarien konnten erfolgreich beschrieben und untersucht werden. Die Analyse ergibt hilfreiche Ergebnisse für den Einfluss der Belastungsszenarien auf das Produktionssystem. Die Anforderung konnte hinreichend erfüllt werden.

Eine Quantifizierung der Auswirkungen erfolgt auf zwei Weisen, mit Hilfe des Scoring-Modells und Einordnung in das Risikoportfolio, sowie durch die Berechnung von Verlustrisiken und anschließende Einordnung in das Severity-Portfolio. Die Quantifizierung wird in der Anwendung erfolgreich mit Hilfe des Risikoportfolios durchgeführt.

#### *Spezielle Anforderungen für die Übertragung auf Produktionssysteme*

Die Anforderungen, die im speziellen durch die Übertragung der Methodik Stresstest von der Finanzindustrie auf Produktionssysteme entstehen, werden auf Basis der Fallanwendung als erfüllt gewertet.

Belastungsszenarien, mit deren Hilfe die externen Veränderungen für das Produktionssystem ‚testbar‘ gemacht werden, werden im Stresstest in einer eigenen Phase des Vorgehens umgesetzt. Die Ableitung und Detaillierung aus den Umfeldszenarien erfolgt auf Basis eines systematischen Vorgehens und mit Hilfe des Rezeptormodells, welches die Faktoren des Belastungsszenarios vorgibt. Mit Hilfe des methodischen Vorgehens werden die Szenarien für den Test des Produktionssystems übersetzt und die Anforderungen erfüllt.

Die Risikoidentifikation und -analyse bietet ein gezieltes Vorgehen, welches auf den Belastungsszenarien aufsetzt. Aufgrund der Kombination der Belastungsszenarien und dem systematischen Aufbau der Risikoanalyse entsteht die Möglichkeit für die Anwender\*innen, eine veränderte Perspektive auf die Risiken der Zukunft zu erarbeiten.

Die Bewertung der Auswirkungen der Szenarien mit Hilfe einer finanziellen Einordnung wird durch die Modellierung und stochastische Simulation erreicht. Hier wird auf den Stand des Wissens zurückgegriffen und die bereits bestehenden Bewertungsvorgehen in den Stresstest integriert. Dementsprechend ist die Anforderung erfüllt. Eine Validierung in der industriellen Anwendung konnte nicht durchgeführt werden. Hier wird für die grundsätzliche Einschätzung zur Erfüllung der Anforderungen auf die bereits bestehenden Validierungen im Stand des Wissens verwiesen.

#### *Allgemeine Anforderungen für die praktische Anwendung*

Für die praktische Anwendung werden die vier Anforderungen gut erfüllt.



Für Anwender\*innen in der industriellen Anwendung ist die Methodik gut zu verstehen. Die Anwendung der Szenarioanalyse setzt eine gewisse Auseinandersetzung mit der Methode voraus. Diese wird durch die übersichtliche Struktur und die klar dargelegten Ergebnisse pro Teilschritt gewährleistet. Die Entwicklung der Belastungsszenarien ist aufgrund der Umkehr zwischen induktiver und deduktiver Vorgehensweise etwas komplexer und stellt folglich erhöhte Anforderungen an Anwender\*innen. Die Modellierung der Risiken und die Anwendung der Monte-Carlo-Simulation setzen Kenntnisse im Bereich der Risikobewertung und Stochastik voraus. Diese Faktoren und die Komplexität der Methoden führen dazu, dass die Verständlichkeit zwar gegeben ist, aber das Vorgehensmodell diese nicht ideal unterstützt.

Der Stresstest für Produktionssysteme ist übertragbar auf verschiedenste Produktionssysteme von Unternehmen verschiedener Branchen und unterschiedlichen Unternehmensgrößen. Von einer erfolgreichen Anwendung kann aber nur in Unternehmen ausgegangen werden, die bereits ein Risikomanagement haben.

Die Ergebnisse der einzelnen Testschritte können transparent und nachvollziehbar zusammengefasst werden – hierzu tragen Übersichten zum Vorgehen, Vorlagen für die Ergebnisse und Auswertungsportfolios bei. Mit Hilfe der übersichtlichen Strukturierung kann eine verbesserte Akzeptanz der Ergebnisse erreicht werden.

Eine Skalierung des Stresstests ist an mehreren Stellen möglich – zum Beispiel über den Detailgrad in der Szenario- oder Auswirkungsanalyse. Mit Hilfe einer sinnvollen Auswahl der kritischen Prozesse kann für sehr große Produktionssysteme der Stresstest handhabbarer gestaltet werden. Der Skalierung nach oben, also für sehr große und vielfältige Produktionssysteme und eine große Anzahl an Szenarien, sind Grenzen durch die manuelle Handhabung gesetzt. Mit Hilfe einer Softwareunterstützung ist aber auch dort eine Anwendung möglich. Einer Anwendung im kleinen Rahmen mit einer begrenzten Anzahl an Ressourcen steht in erster Linie die quantitative Bewertung im Weg, da diese eine gewisse Datenbasis und Rechenmodelle erfordert. Aber auch mit primär qualitativer Durchführung können Ergebnisse erarbeitet werden, die Erkenntnisse für die Zukunftsfähigkeit enthalten. So kann ein leicht veränderter, aber trotzdem erkenntnisgenerierender Stresstest durchgeführt werden.

Die Bewertung wurde anhand von zehn Dimensionen durchgeführt. Dabei konnten die speziellen Anforderungen an den Stresstest für Produktionssysteme als erfüllt eingeschätzt

werden. Weiterhin wurden die speziellen Anforderungen an die Übertragung des Werkzeuges aus der Finanzindustrie in zwei Dimensionen positiv eingeordnet. Dies weist auf eine geeignete Übertragung der Kernelemente von Finanzstresstests auf eine Anwendung für Produktionssysteme hin. Weiterhin indiziert diese Evaluation, dass die Charakteristika von Produktionssystemen für die Anwendung der Methodik ausreichend berücksichtigt wurden. Die gute Erfüllung der allgemeinen Anforderungen an die praktische Anwendung signalisiert, dass eine Benutzerfreundlichkeit gewährleistet wurde.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

In einem risikoreichen Umfeld zu agieren, gehört für viele Industrieunternehmen zum ökonomischen Handeln. Eine Absicherung gegen alle Risiken ist nicht möglich, aber für den Erhalt des Unternehmens ist es zuweilen essentiell die eigene Risikosituation zu kennen und sich auf mögliche Entwicklungen vorzubereiten. Das Risikomanagement bietet einen Rahmen für diese Tätigkeiten. In dieser Arbeit soll die Evaluation der Risikosituation von Produktionssystemen weiter entwickelt werden, damit Maßnahmen zur Risikominimierung und -steuerung zielgerichtet eingesetzt werden können.

Die Motivation dieser Arbeit entspringt einer Beobachtung der Finanzindustrie, welche ihren Umgang mit Risiken nach der Finanzkrise 2009 ändern musste. Eine Lehre aus dieser Krise war, dass sich Finanzinstitutionen mit Hilfe von regelmäßigen und systematischen Stresstests besser für zukünftige, unerwartete Entwicklungen der Märkte aufstellen sollen. Dieses Werkzeug, welches eigentlich aus den Ingenieurwissenschaften stammt und dann in die Medizin wanderte, um von dort zu den Finanzökonomen zu gelangen, motiviert diese Arbeit.

Mit der Übertragung des Stresstests aus der Finanzindustrie auf Produktionssysteme wird im Rahmen dieser Arbeit ein Werkzeug geschaffen, welches Manager\*innen von Produktionssystemen dabei unterstützt, systematisch die eigene Risikosituation in Bezug auf unerwartete, durchaus auch extreme, Veränderungen zu evaluieren. So sollen für die Produktionssysteme die Auswirkungen von Umfeldveränderungen untersucht werden. Die Schwere mit der Szenarien und die daraus entstehenden Risiken das Produktionssystem treffen, ermöglicht die Priorisierung der richtigen Maßnahmen. Dadurch kann die Zukunftsrobustheit gesteigert werden.

Darüber hinaus können mit Hilfe des Stresstests mögliche Entwicklungen durchdacht werden und eine Sensibilisierung für den Zusammenhang zwischen Entwicklungen im Unternehmensumfeld und Risiken in der Produktion stattfinden. So kann zu der Entwicklung

von einem ad-hoc Maßnahmenportfolio zu einem priorisierten und vorausschauenden Risikomanagement beigetragen werden.

Der Stresstest gliedert sich in sieben Phasen: die Identifikation kritischer Prozesse, die Szenarioanalyse, die Entwicklung der Belastungsszenarien, die Auswirkungenanalyse, die Auswahl von Maßnahmen zur Risikominimierung, die quantitative Bewertung und die Ergebnisauswertung. Mit der Identifikation kritischer Prozesse beginnt das Vorgehensmodell. Nachdem eine Prozessaufnahme durchgeführt wurde, werden potentielle Ansammlungen von Risiken identifiziert und der Betrachtungsbereich spezifiziert. Mit Hilfe der Szenarioanalyse werden hypothetische Szenarien entwickelt, welche die Grundlage für den Stresstest bilden. Begonnen wird die Szenarioanalyse mit der Identifikation von Schlüsselfaktoren aus den wichtigsten Einflussbereichen für das Unternehmen. Anschließend werden mögliche Entwicklungen der Schlüsselfaktoren projiziert und die Projektionen zu widerspruchsfreien, relevanten Umfeldszenarien zusammengefasst. Anschließend werden Belastungsszenarien entwickelt. Diese beschreiben die Belastungen, welche das Produktionssystem erfüllen muss, wenn ein Umfeldszenario eintritt. Sie setzen sich aus einem Bündel von produktions-spezifischen Eingangs- und Planungsgrößen (Rezeptormodell) zusammen. Überdies werden die Auswirkungen der Belastungsszenarien auf das Produktionssystem untersucht. Hierfür werden die Risiken, welche durch die Belastung entstehen, identifiziert und bewertet. Mit einem Risikoportfolio werden die Risiken und Szenarien nach ihrer Kritikalität und möglichem Handlungsspielraum evaluiert. Basierend auf dieser Evaluation werden Maßnahmen zur Minimierung und Steuerung der Risikoauswirkungen zugeordnet. Gebündelte Maßnahmen werden in Form von Konfigurationen für das Produktionssystem im Stresstest berücksichtigt. Des Weiteren wird eine quantitative Bewertung der Belastungsszenarien simuliert. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation werden Ergebnisverteilungen berechnet und das Risikomaß Value at Risk (VaR) berechnet. So wird die Verlustbelastung des Szenarios abgeschätzt. Eine Sensitivitätsanalyse bietet Aufschluss zur finanziellen Schwere einzelner Risiken. Das Ergebnis wird in das Severity-Portfolio anhand eines relativen Value at Risk und Erwartungswerts eingeordnet. Weiterhin wird ein Risikoabgleich über die Szenarien hinweg ermöglicht, um jene Risiken zu identifizieren, welche aus unterschiedlichen Umfeldentwicklungen heraus entstehen können. Schlussendlich wird von den Risiken und Maßnahmen auf die Elemente des Produktionssystems zurückgeschlossen. So können die besonders belasteten Elemente oder Subsysteme benannt werden.

Die beispielhafte industrielle Anwendung des Stresstests steht in guter Übereinstimmung mit den gestellten Anforderungen. Insbesondere konnte eine Entwicklung von Belastungsszenarien speziell für Produktionssysteme erreicht werden. Die Identifikation und Analyse der entstehenden Risiken und ihrer Auswirkungen konnte in dem Kontext des Stresstests erfolgreich genutzt werden. Die Messung der Auswirkungen wurde auch außerhalb der Simulation mit einem Scoring-Modell ermöglicht, was die Skalierbarkeit und Verständlichkeit für industrielle Anwendungen sehr gut unterstützt.

## 7.2 Ausblick

Der Stresstest für Produktionssysteme wurde so gestaltet, dass Erweiterungen und Weiterentwicklungen möglich sind. Mögliche Aspekte hierzu werden im Folgenden aufgezählt.

- *Spezifizierung für bestimmte Industrien oder Arten von Produktionssystemen*  
Das Vorgehen kann für ausgewählte Arten von Produktionssystemen und ausgewählte Industrien detailliert werden. Dabei können je nach Industrie Schwerpunkte bei der Ausgestaltung der Auswirkungsanalysen gesetzt werden. Zum Beispiel kann für hoch automatisierte Produktionssysteme der Stresstest mit System-Dynamics-Simulationen kombiniert werden. Charakteristische Belastungen und daraus entstehende Risiken können als Grundlage genutzt werden, um die generische Auswirkungsanalyse zu spezifizieren.
- *Langfristige Evaluation der Ergebnisse*  
Für weitere Forschungen können langfristige Studien in der industriellen Anwendung ein zentraler Aspekt sein. So können die Ergebnisse im Verlauf der Zeit auch retrospektiv evaluiert werden.
- *Spezifizierung für Teilsysteme*  
Eine Spezifizierung ist auch für Subsysteme von Produktionssystemen, wie zum Beispiel für die Intralogistik, denkbar. Dafür könnten die Vorgehensphasen entsprechend der besonderen Eigenschaften und Risiken detailliert werden.

Auf dieser Arbeit aufbauende Forschungen können sich an den zuvor genannten Aspekten orientieren. Das hier entwickelte und beschriebene Werkzeug ermöglicht es, die Zukunftsrobustheit von Produktionssystemen durch einen Stresstest systematisch zu evaluieren.



## Literaturverzeichnis

### ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

### ANDERSON 2016

Anderson, R. W.: Stress testing and macroprudential regulation: A transatlantic assessment. In: Anderson, R. W. (Hrsg.): Stress testing and macroprudential regulation. A transatlantic assessment. London: Centre for Economic Policy Research 2016, S. 1-29. ISBN: 978-1-907142-98-7.

### ANDERSON ET AL. 2018

Anderson, R.; Danielsson, J.; Baba, C.; Das, U. S.; Kang, H.; Segoviano, S.: Macroprudential Stress Tests and Policies: Searching for Robust and Implementable Frameworks. IMF Working Paper. 18/197. Internationaler Währungsfonds (IWF). 2018.

### BACKHAUS ET AL. 2018

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 15., vollständig überarbeitete Auflage . Berlin: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-662-56655-8.

### BALKE 2014

Balke, H.: Einführung in die Technische Mechanik. Festigkeitslehre. 3., aktual. Aufl. . Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-642-40981-3. (Springer-Lehrbuch).

### BANSE & BECHMANN 1998

Banse, G.; Bechmann, G.: Interdisziplinäre Risikoforschung. Eine Bibliographie. Wiesbaden, s.l.: VS Verlag für Sozialwissenschaften 1998. ISBN: 978-3-531-12644-9.

### BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION 2018

Basel Committee on Banking Supervision: Basel Committee Charter. <<https://www.bis.org/bcbs/charter.htm>> - 29.01.2020.

BCBS 2009: Principles for sound stress testing practices and supervision. Final paper. Basel Committee on Banking Supervision. May 2009 . Basel: Bank for Internat. Settlements 2009. ISBN: 92-9197-784-5.

BLASCHKE ET AL. 2001

Blaschke, W.; Jones, M. t.; Majnoni; Giovanni; Martinez Peria, S.: Stress Testing of Financial Systems. An Overview of Issues, Methodologies and FSAP Experiences. IMF Working Paper. 01/88. 2001.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.M.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. London: Springer London 2009. ISBN: 9781848825864.

BORIO ET AL. 2011

Borio, C.; Drehmann, M.; Kostas, T.: Stress-testing macro stress testing: does it live up to expectations? Bank for International Settlements. 2011.

BRAUN 1984

Braun, H.: Risikomanagement. Eine spezifische Controllingaufgabe. Darmstadt: Toeche-Mittler 1984. ISBN: 3-87820-060-9. (Controlling-Praxis 7).

BREDOW 2012

Bredow, M. v.: Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012). München: Utz 2012. ISBN: 978-3831643370. (Forschungsberichte IWB 281).

BUBB ET AL. 2015

Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M.: Automobilergonomie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015. ISBN: 978-3-8348-1890-4.

CASSIDY 2001

Cassidy, T.: Stress, cognition and health. Reprinted . Hove: Psychology Press 2001. ISBN: 0-415-15812-5. (Psychology focus).

CEBS 2010

Committee of European Banking Supervisors: CEBS Guidelines on Stress Testing (GL32).



2010. <[https://eba.europa.eu/sites/default/documents/files/documents/10180/16094/ee1e7b7b-5b45-4758-bc64-22b159c3f66c/ST\\_Guidelines.pdf?retry=1](https://eba.europa.eu/sites/default/documents/files/documents/10180/16094/ee1e7b7b-5b45-4758-bc64-22b159c3f66c/ST_Guidelines.pdf?retry=1)> - 20.01.2018.

#### CIRP 2020

CIRP: Dictionary of Production Engineering III – Manufacturing Systems Wörterbuch der Fertigungstechnik III – Produktionssysteme Dizionario di Ingegneria della Produzione III – Sistemi di produzione. Trilingual Edition Dreisprachige Ausgabe Edizione completa trilingue. CIRP. 1st ed. 2020 : 2020. ISBN: 9783662533345.

#### CISEK ET AL. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 9 (2002). 9, S. 441-445.

#### COHEN ET AL. 1997

Cohen, S.; Kessler, R. C.; Underwood, L. G.: Strategies for Measuring Stress in Studies of Psychiatric and Physical Disorders. In: Underwood, L. G. et al. (Hrsg.): Measuring stress. A guide for health and social scientists. New York: Oxford University Press 1997, S. 3-26. ISBN: 978-0195121209.

#### CONTRADA & BAUM 2011

Contrada, Richard J.; Baum, Andrew (Hrsg.): The handbook of stress science. Biology, psychology, and health. New York, NY: Springer 2011. ISBN: 978-0-8261-1771-7.

#### CONTRADA 2011

Contrada, R. J.: Stress, Adaptation, and Health. In: Contrada, R. J. et al. (Hrsg.): The handbook of stress science. Biology, psychology, and health. New York, NY: Springer 2011, S. 1-9. ISBN: 978-0-8261-1771-7.

#### COPELAND & ANTIKAROV 2001

Copeland, T. E.; Antikarov, V.: Real options. A practitioner's guide. New York, London: Texere 2001. ISBN: 1587990288.

#### DENT ET AL. 2016

Dent, K.; Westwood, B.; Segoviano, M.: Stress testing of banks: an introduction. Quarterly Bulletin (2016). Q3, S. 130-143.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 31000

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN ISO 31000:2018-10, Risikomanagement - Leitlinien (ISO\_31000:2018). Berlin: 2018-10.

DOMBROWSKI & ERNST 2013

Dombrowski, U.; Ernst, S.: Scenario-based Simulation Approach for Layout Planning. *Procedia CIRP* 12 (2013), S. 354-359.

DOMBROWSKI & MIELKE 2015

Dombrowski, U.; Mielke, T.: *Ganzheitliche Produktionssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015. ISBN: 978-3-662-46163-1.

DOWLING ET AL. 2013

Dowling, Norman E.; Siva Prasad, Katakam; Narayanasamy, R. (Hrsg.): *Mechanical behavior of materials. Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4. ed., internat. ed. . Boston, Mass.: Pearson 2013. ISBN: 978-0-273-76455-7.

DUDENREDAKTION O.J.A

Dudenredaktion: "Fliege". <<https://www.duden.de/node/48644/revision/48680>> - 18.12.2020.

DUDENREDAKTION O.J.B

Dudenredaktion: "Risiko". <<https://www.duden.de/node/122309/revision/122345>> - 22.04.2020.

DUDENREDAKTION O.J.C

Dudenredaktion: "Stress". <<https://www.duden.de/node/175320/revision/175356>> - 16.05.2016.

DÜRRSCHMIDT 2001

Dürschmidt, S.: *Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion*. Diss. Technische Universität München (2001). München: Utz 2001. ISBN: 3-8316-0023-6. (Forschungsberichte IWB 152).

DYCKHOFF 2003

Dyckhoff, H.: *Grundzüge der Produktionswirtschaft. Einführung in die Theorie betrieblicher Wertschöpfung*. Vierte, verbesserte Auflage . Berlin, Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3-540-44048-2. (Springer-Lehrbuch).

**ECKERT 2017**

Eckert, C.: Cyber-Sicherheit in Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017, S. 111-136. ISBN: 978-3-446-44989-3.

**ECKEY ET AL. 2002**

Eckey, H.-F.; Kosfeld, R.; Rengers, M.: Multivariate Statistik. Grundlagen - Methoden - Beispiele. Wiesbaden: Gabler Verlag 2002. ISBN: 9783409119696.

**ERLACH 2010**

Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. ebrary, Inc. 2., bearb. und erweiterte Aufl. . Berlin, New York: Springer 2010. ISBN: 9783540898672. (VDI-Buch).

**FREMDT & VÖLZ 2010**

Fremdt, C.; Völz, M.: Aufsichtliche Anforderungen an Stresstests für Kreditinstitute. In: Gruber, W. et al. (Hrsg.): Szenarioanalysen und Stresstests in der Bank- und Versicherungspraxis. Regulatorische Anforderungen, Umsetzung, Steuerung. s.l.: Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft Steuern Recht GmbH 2010. ISBN: 978-3-7910-2953-5.

**GAUSEMEIER ET AL. 1996**

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien. 2., bearb. Auflage . München: Hanser 1996. ISBN: 3446187219.

**GAUSEMEIER ET AL. 1998**

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Scenario Management. Technological Forecasting and Social Change 59 (1998). 2, S. 111-130.

**GAUSEMEIER ET AL. 2018**

Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Echterfeld, J.; Pfänder, T.; Steffen, D.; Thielemann, F.: Innovationen für die Märkte von morgen. Strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen. München: Hanser 2018. ISBN: 978-3-446-42972-7.

**GÖTZE & MIKUS 2001**

Götze, U.; Mikus, B.: Risikomanagement mit Instrumenten der strategischen Unternehmensführung. In: Götze, U. et al. (Hrsg.): Risikomanagement. Heidelberg: Physica-Verlag HD 2001, S. 385-412. ISBN: 978-3-642-57587-7. (Beiträge zur Unternehmensplanung).

GREBNER 2015

Grebner, B.: Stresstest für produzierende Unternehmen. München: TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG 2015. ISBN: 978-3-9441967-84-7.

HAMBACH & ALBRECHT 2014

Hambach, J.; Albrecht, F.: Methode der Szenariotechnik in der Fabrikplanung. Vorschlag für einen Gliederungsansatz zur Auswahl der passende Technik. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 3 (2014), S. 117-120.

HAWARD 1960

Haward, L. R.: The subjective meaning of stress. British Journal of Medical Psychology 33 (1960). 3, S. 185-194.

HEINEN ET AL. 2008

Heinen, T.; Rimpau, C.; Wörn, A.: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Hannover, Garbsen: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008, S. 19-33. ISBN: 978-3-939026-96-9.

HENRY ET AL. 2013

Henry, J.; Kok, C.; Amzallag, A.; Baudino, P.; Cabral, I.; Grodzicki, M.; Gross, M.; Hałaj, G.; Kolb, Markus; Leber, Miha; Pancaro, Cosimo; Sydow, Matthias; Vouldis, Angelos; Zimmermann, Maik; Żochowski, Dawid: A macro stress testing framework for assessing systemic risks in the banking sector. 152. European Central Bank. 2013.

HERNÁNDEZ MORALES 2003

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. (Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2002). Als Ms. gedr . Düsseldorf: VDI-Verl. 2003. ISBN: 3183149168. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft 149).

HÖLSCHER & ELFGEN 2002

Hölscher, R.; Elfgen, R.: Herausforderung Risikomanagement. Wiesbaden: Gabler Verlag 2002. ISBN: 978-3-322-82373-1.

HORVÁTH ET AL. 2011

Horváth, P.; Meyer-Schwickerath, B.; Seiter, M.: Risikomanagement in Produktionsnetz-

werken – Die Rolle von Frühwarnindikatoren. In: Kemper, H.-G. et al. (Hrsg.): Management vernetzter Produktionssysteme: Innovation, Nachhaltigkeit und Risikomanagement. 1. Aufl. München: Verlag Franz Vahlen 2011, S. 198-216. ISBN: 978-3-8006-4225-0.

HOSFORD 2005

Hosford, W. F.: Mechanical Behavior of Materials. Cambridge: Cambridge University Press 2005. ISBN: 9780521846707.

HUBER 2011A

Huber, J.: Staatliches Umwelthandeln. Instrumente und Muster der Umweltpolitik. In: Huber, J. (Hrsg.): Allgemeine Umweltsoziologie. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2011, S. 190-241. ISBN: 978-3-531-17872-1.

HUBER 2011B

Huber, J.: Umweltbewusstes Verbraucherverhalten, ökologische Haushaltsführung. In: Huber, J. (Hrsg.): Allgemeine Umweltsoziologie. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2011, S. 295-315. ISBN: 978-3-531-17872-1.

HUTH & ROMEIKE 2016

Huth, Michael; Romeike, Frank (Hrsg.): Risikomanagement in der Logistik. Konzepte - Instrumente - Anwendungsbeispiele. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2016. ISBN: 9783658058951.

JONEN 2007

Jonen, A.: Semantische Analyse des Risikobegriffs. Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung. Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Unternehmensrechnung und Controlling. Kaiserslautern: 2007. (Beiträge zur Controlling-Forschung 11).

KELLNER ET AL. 2018

Kellner, F.; Lienland, B.; Lukesch, M.: Produktionswirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018. ISBN: 978-3-662-54340-5.

KERN & HARTUNG 2008

Kern, E.-M.; Hartung, T.: Geschäftsprozessorientiertes Risikomanagement am Beispiel der industriellen Produktion. In: Himpel, F. (Hrsg.): Spektrum des Produktions- und Innova-

tionsmanagements. Komplexität und Dynamik im Kontext von Interdependenz und Kooperation. 1. Aufl. Aufl. s.l.: DUV Deutscher Universitäts-Verlag 2008, S. 55-66.

ISBN: 978-3-8350-5583-4.

KESSEL & FRÖHLING 2012

Kessel, S.; Fröhling, D.: Technische Mechanik. Zweisprachiges Lehrbuch zu Grundlagen der Mechanik fester Körper = Engineering Mechanics ; bilingual textbook on the fundamentals of solid mechanics. 2., überarb. Aufl. 2012 . Wiesbaden: Springer Vieweg 2012.

ISBN: 978-3-8348-2182-9.

KÖNIG 2008

König, R.: Management betrieblicher Risiken bei produzierenden Unternehmen. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Aachen: 2008.

KREBS 2011

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2011). München: Utz 2011. ISBN: 9783831641567. (Forschungsberichte IWB 255).

KUBICEK 1977

Kubicek, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer konstruktionsstrategie empirischer Forschung. In: Köhler, R. (Hrsg.): Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre. Bericht über d. Tagung in Aachen, März 1976. Stuttgart: Poeschel 1977, S. 3-36.

ISBN: 3791002147.

LAZARUS & FOLKMAN 2015

Lazarus, R. S.; Folkman, S.: Stress, appraisal, and coping. 11. [print.] . New York: Springer 2015. ISBN: 978-0826141910.

LAZARUS 1966

Lazarus, R. S.: Psychological Stress and the Coping Process. University of Michigan: McGraw-Hill 1966.

LIPPOLD & WELTERS 1976

Lippold, H.; Welters, K.: Szenario-Technik. Inst. für Zukunftsforschung. Berlin: 1976. (Werkstattheft für Zukunftsforschung).

## MÄRZ ET AL. 2011

März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011. ISBN: 978-3-642-14535-3.

## MENCK ET AL. 2013

Menck, N.; Weidig, C.; Aurich, J. C.: Virtual Reality as a Collaboration Tool for Factory Planning based on Scenario Technique. *Procedia CIRP* 7 (2013), S. 133-138.

## MENCK ET AL. 2014

Menck, N.; Weidig, C.; Aurich, J. C.: Approach for Predicting Production Scenarios Focused on Cross Impact Analysis. *Procedia CIRP* 17 (2014), S. 493-498.

## MERZ 2011

Merz, M.: Entwicklung einer indikatorenbasierten Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse für die Bewertung von Risiken in der industriellen Produktion. s.l.: KIT Scientific Publishing 2011. ISBN: 9783866447134.

## MIETZNER 2009

Mietzner, D.: Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen. Methodenevaluation und neue Ansätze. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2009. ISBN: 978-3-8349-1687-7. (Gabler Research).

## MIKUS 2001

Mikus, B.: Grundlagen und Konzepte des Risikomanagements. In: Götze, U. et al. (Hrsg.): Risikomanagement. Heidelberg: Physica-Verlag HD 2001, S. 3-28. ISBN: 978-3-642-57587-7. (Beiträge zur Unternehmensplanung).

## MIßLER-BEHR 1993

Mißler-Behr, M.: Methoden der Szenarioanalyse. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag 1993. ISBN: 978-3-663-14585-1. (DUV Wirtschaftswissenschaft).

## MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2008). München: Utz 2008. ISBN: 9783831607785. (Forschungsberichte IWB 212).

MUELLER ET AL. 2019

Mueller, T.; Kiesel, R.; Schmitt, R. H.: Automated and Predictive Risk Assessment in Modern Manufacturing Based on Machine Learning. In: Schmitt, R. et al. (Hrsg.): Advances in Production Research. Cham: Springer International Publishing 2019. ISBN: 978-3-030-03450-4.

MUN 2002

Mun, J.: Real Options Analysis. Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions. New York: John Wiley & Sons Inc 2002. ISBN: 0-471-25696-X. (Wiley Finance).

MUN 2012

Mun, J.: Modeling Risk. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc 2012. ISBN: 9781118366332.

NYHUIS ET AL. 2005

Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heger, C. L.: Evaluation of Factory Transformability. (Hrsg.): 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, USA, 10.-12.05.2005 2005. (Conference proceedings).

PLEHN 2017

Plehn, C.: A method for analyzing the impact of changes and their propagation in manufacturing systems. (Dissertation). München: Herbert Utz Verlag GmbH 2017. ISBN: 9783831646951. (Forschungsberichte IWB 333).

POHL 2013

Pohl, J.: Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2013). München: Utz 2013. ISBN: 978-3-8316-4358-5. (Forschungsberichte IWB 284).

REIBNITZ 1992

Reibnitz, U. von: Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung. 2. Auflage . Wiesbaden, s.l.: Gabler Verlag 1992. ISBN: 3-409-23431-4.

REIBNITZ ET AL. 1982

Reibnitz, U. von; Geschka, H.; Seibert, S.: Die Szenario-Technik als Grundlage von Planungen. Battelle-Institut e.V. Frankfurt. Frankfurt: 1982.



## REINHART &amp; 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: 978-3-446-44989-3.

## REINHART 2017

Reinhart, Gunther (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017. ISBN: 978-3-446-44989-3.

## REINHART ET AL. 2009

Reinhart, G.; Pohl, J.; Schindler, S.; Karl, F.; Rimpau, C.: Zyklusorientiertes Produktionsstruktur-Monitoring. Kontinuierliche Fabrikplanung mittels Monitoring der Produktionsstruktur. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 9 (2009), S. 750-754.

## RICHTER &amp; HACKER 1998

Richter, P.; Hacker, W.: Belastung und Beanspruchung. Streß, Ermüdung und Burnout im Arbeitsleben. Heidelberg: Asanger 1998. ISBN: 978-3893343249.

## ROHMERT 1984

Rohmert, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 4 (1984), S. 193-200.

## ROMEIKE &amp; HAGER 2009

Romeike, F.; Hager, P.: Erfolgsfaktor Risiko-Management 2.0. Methoden, Beispiele, Checklisten ; Praxishandbuch für Industrie und Handel. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. . Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 9783834908957.

## ROMEIKE &amp; HAGER 2013

Romeike, F.; Hager, P.: Erfolgsfaktor Risiko-Management 3.0. Methoden, Beispiele, Checklisten : Praxishandbuch für Industrie und Handel. 3. Auflage . Wiesbaden: Springer Gabler 2013. ISBN: 9783834938121.

## ROMEIKE &amp; HAGER 2020

Romeike, F.; Hager, P.: Erfolgsfaktor Risiko-Management 4.0. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2020. ISBN: 978-3-658-29445-8.

ROMEIKE 2018

Romeike, F.: Risikomanagement. Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-658-13951-3. (Studienwissen kompakt).

ROSENKRANZ & MIßLER-BEHR 2005

Rosenkranz, F.; Mißler-Behr, M.: Unternehmensrisiken erkennen und managen. Einführung in die quantitative Planung. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3540245073.

RUDOLF & MÜLLER 2012

Rudolf, M.; Müller, J.: Multivariate Verfahren. Eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungsbeispielen in SPSS. 2. Aufl. . s.l.: Hogrefe Verlag 2012. ISBN: 3801724034.

RYSER & MARTIN 2009

Ryser, M.; Martin, D.: Stress Testing. Challenge yourself before being challenged. Ernst & Young. 2009.

SCHENK & WIRTH 2004

Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004. ISBN: 978-3-540-35046-0.

SCHIMMELPFENG 2001

Schimmelpfeng, K.: Risikomanagement in Industrieunternehmen. In: Götze, U. et al. (Hrsg.): Risikomanagement. Heidelberg: Physica-Verlag HD 2001, S. 277-297. ISBN: 978-3-642-57587-7. (Beiträge zur Unternehmensplanung).

SCHLICK ET AL. 2018

Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018. ISBN: 978-3-662-56036-5.

SCHNEEWEIß 2002

Schneeweiß, C.: Einführung in die Produktionswirtschaft. 8., verb. und erw. Aufl. . Berlin: Springer 2002. ISBN: 3-540-43192-6. (Springer-Lehrbuch).

SCHOLL 2001

Scholl, A.: Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen - Konzepte und Methoden - experimentelle Untersuchungen. (Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Habil.-Schr). Heidelberg: Physica-Verl. 2001. ISBN: 3-7908-1408-3.

## SCHUH &amp; HEIN 2006

Schuh, G.; Hein, D.: Strategische Risiken im Griff. Risk Mode and Effects Analysis (RMEA) zur Risikofrüherkennung. Risk, Fraud & Compliance (ZRFC) 2/06 (2006), S. 79-82.

## SCHUH &amp; SCHMIDT 2014

Schuh, G.; Schmidt, C.: Produktionsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014. ISBN: 978-3-642-54287-9.

## SCHUH ET AL. 2006

Schuh, G.; Klotzbach, C.; Hein, D.: Mit Risikomanagement in eine erfolgreiche Zukunft. Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb : ZWF 101 (2006) 9 (2006), S. 514-516.

## SCHUH ET AL. 2017

Schuh, G.; Salmen, M.; Jussen, P.; Riesener, M.; Zeller, V.; Hensen, T.; Begovic, A.; Birkmeier, M.; Hocken, Christian; Jordan, Felix; Kantelberg, Jan; Kelzenberg, Christoph; Kolz, Dominik; Maasem, Christian; Siegers, Jan; Stark, Maximilian; Tönnies, Christian: Geschäftsmodell-Innovation. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017, S. 3-30. ISBN: 978-3-446-44989-3.

## SCHURIG 2016

Schurig, M.: Methodology to evaluate the agility of a production network using a stress test approach. Graz University of Technology. Graz: 2016.

## SCHWAB 2008

Schwab, A. J.: Managementwissen für Ingenieure. Führung, Organisation, Existenzgründung. Vierte, neu bearbeitete Auflage . Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008. ISBN: 978-3-540-78409-8. (VDI-Buch).

## SEEL 2012

Seel, Norbert M. (Hrsg.): Encyclopedia of the sciences of learning. New York: Springer 2012. ISBN: 978-1-4419-5503-6. (Springer reference).

## SELYE 1936

Selye, H.: A Syndrome produced by Diverse Nocuous Agents. Nature 138 (1936). 3479, S. 32.

## SELYE 1950

Selye, H.: The physiology and pathology of exposure to stress. Montreal: Acta, Inc. 1950.

SELYE 1955

Selye, H.: Stress and Disease. Science 122 (1955). 3171, S. 625-631.

SIBBERTSEN & LEHNE 2012

Sibbertsen, P.; Lehne, H.: Statistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-540-36475-7.

SUDHOFF 2007

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2007). München: Utz 2007. ISBN: 978-3-8316-0749-5. (IWB Forschungsberichte 208).

THE EUROPEAN BANKING AUTHORITY 2016

The European Banking Authority: The European Banking Authority at a glance. Luxembourg: Publications Office 2016. ISBN: 978-92-95086-79-1.

THIEMT 2003

Thiemt, F.: Risikomanagement im Beschaffungsbereich. 1st ed. . Göttingen: Cuvillier Verlag 2003. ISBN: 3898739074.

THOMMEN ET AL. 2017

Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K.; Gilbert, D. U.; Hachmeister, D.; Kaiser, G.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 8., vollständig überarbeitete Auflage . Wiesbaden: Springer Gabler 2017. ISBN: 9783658077679. (Lehrbuch).

TOMCZAK 1992

Tomczak, T.: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft. Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz. Marketing ZFP 14 (1992). 2, S. 77-87.

ULICH 2005

Ulich, E.: Arbeitspsychologie. 6., überarb. und erw. Auflage . Zürich: vdf Hochschulverl. an der ETH 2005. ISBN: 978-3791024424.

ULRICH & HILL 1979

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Aspekte ausgewählter betriebswirtschaftlicher Konzeptionen. In: Raffée, H. et al. (Hrsg.): Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaften. München: Vahlen 1979, S. 161-190. ISBN: 3800607727. (WiSt-Taschenbücher).

**ULRICH 1984**

Ulrich, H.: Management. Hrsg. von Thomas Dyllick u. Gilbert J. B. Probst. Bern & Stuttgart: Haupt 1984. ISBN: 325803446X. (Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmensführung 13).

**WEBER ET AL. 2018**

Weber, W.; Kabst, R.; Baum, M.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. 10., aktualisierte und überarbeitete Auflage . Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-658-18252-6.

**WESTKÄMPER 2008**

Westkämper, E.: Fabriken sind komplexe langlebige Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2008, S. 85-107. ISBN: 978-3-540-75641-5.

**WIENDAHL 2005**

Wiendahl, H.-P.: Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Hanser 2005. ISBN: 978-3-446-43602-2.

**WITTENBURG ET AL. 2014**

Wittenburg, J.; Richard, H. A.; Zierep, J.; Bühler, K.: Das Ingenieurwissen: Technische Mechanik. Berlin: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-642-41122-9. (Ingenieurwissen).

**WÖHE ET AL. 2016**

Wöhe, G.; Döring, U.; Brösel, G.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 26., überarbeitete und aktualisierte Auflage . München: Verlag Franz Vahlen 2016. ISBN: 9783800650002. (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

**WÖHE ET AL. 2020**

Wöhe, G.; Döring, U.; Brösel, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 27., überarbeitete und aktualisierte Auflage : 2020. ISBN: 9783800663002. (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

**WOLKE 2016**

Wolke, T.: Risikomanagement. 3., vollständig überarbeitete, erweiterte und aktualisierte Auflage . Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg 2016. ISBN: 9783110353860.

**WONSAK ET AL. 2021**

Wonsak, I.; Bauer, H.; Sippl, F.; Reinhart, G.: A scenario-based approach for translating

strategic perspectives into input variables for production planning and control (accepted).  
Procedia CIRP (2021).

ZÄH ET AL. 2004

Zäh, M. F.; Prasch, M.; Sudhoff, W.: Methodik zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004) 4 (2004). 4, S. 173-177.

ZÄH ET AL. 2005A

Zäh, M. F.; Müller, N.; Rimpau, C.: A Holistic Framework for Enhancing the Changeability of Production Systems. In: Zäh, M. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München: Utz 2005. ISBN: 3831605408.

ZÄH ET AL. 2005BA

Zäh, M. F.; Möller, N.; Sudhoff, W.: A framework for the valuation of changeable manufacturing systems. (Hrsg.): 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, USA, 10.-12.05.2005 2005. (Conference proceedings).

## Anhang

### A. Übersicht zum Vorgehen für Stresstests in der Finanzindustrie

Tabelle 12: Phasen des Stresstests wie vorgestellt bei GREBNER (2015, S. 36)

Autor	Phasen des Tests							
ALFARO, DREHMANN	Entwicklung des Stresstests-szenarios		Analyse der Makroökonomischen Auswirkungen		Analyse der Auswirkungen auf Kredit- und Marktrisiko		Analyse der Auswirkung auf die einzelne Bank	
BEARDSHA W, SIRONIS	Informationssammlung	Szenarioentwicklung		Szenario-durchführung	Szenarioauswertung		Maßnahmenableitung	
BLASCHKE ET AL.	Wahl des Risikomodells	Wahl des Stresstests	Wahl der Belastung		Wahl des Szenarios		Festlegung der Untersuchungsgrößen	Aggregation der Ergebnisse
DIETZ ET AL.	Szenarioentwicklung		Szenarioquantifizierung		Entwicklung eines Analysemodells	Auswirkungsanalyse	Maßnahmenableitung	
FOGLIA	Stresstestszenario		Verknüpfung des Szenarios zu makroökonomischen Variablen		Analyse der Auswirkung der makroökonomischen Entwicklung auf das Eigenkapital		Analyse der Auswirkung auf die Bilanz (Erträge und Eigenkapital)	
LAM	Festlegung der zu untersuchenden Variablen	Entwicklung eines Wirkungsfüges		Messung und Bewertung der Auswirkungen	Ableitung alternativer Strategien		Festlegung der zu untersuchenden Variablen	
MULLER, SCHÖNING	Identifikation der Risikotreiber	Bildung von Szenarien		Bewertung von Szenarien	Festlegung von Maßnahmen		Ergebnisdarstellung	
RYSER, MARTIN	Szenariodefinition	Inputparameter	Stresstestmodell	Outputparameter	Aggregation		Reporting	
VAN DEN END, HOEBERIC HTS	Stresszenario		Interaktion der Risikotreiber im Szenario		Analyse der Verluste, Kreditausfälle und Erträge	Analyse von Gewinn- und Verlustwirkung und Kapitalausstattung		Untersuchung der Rückkopplungseffekte auf Märkte

Die Tabelle zeigt eine Darstellung aus GREBNER (2015). Für Details zu den Forschungsergebnissen und den genannten Quellen wird auf die Veröffentlichung des Autors verwiesen.

## B. Diskrete und stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Für die Abbildung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Risiken in einer statischen Betrachtung können Verteilung und ihre Wahrscheinlichkeits- und Dichtefunktionen genutzt werden. In Abbildung 54 werden für stetige und diskrete Zufallsvariablen beispielhaft Verteilungen dargestellt.

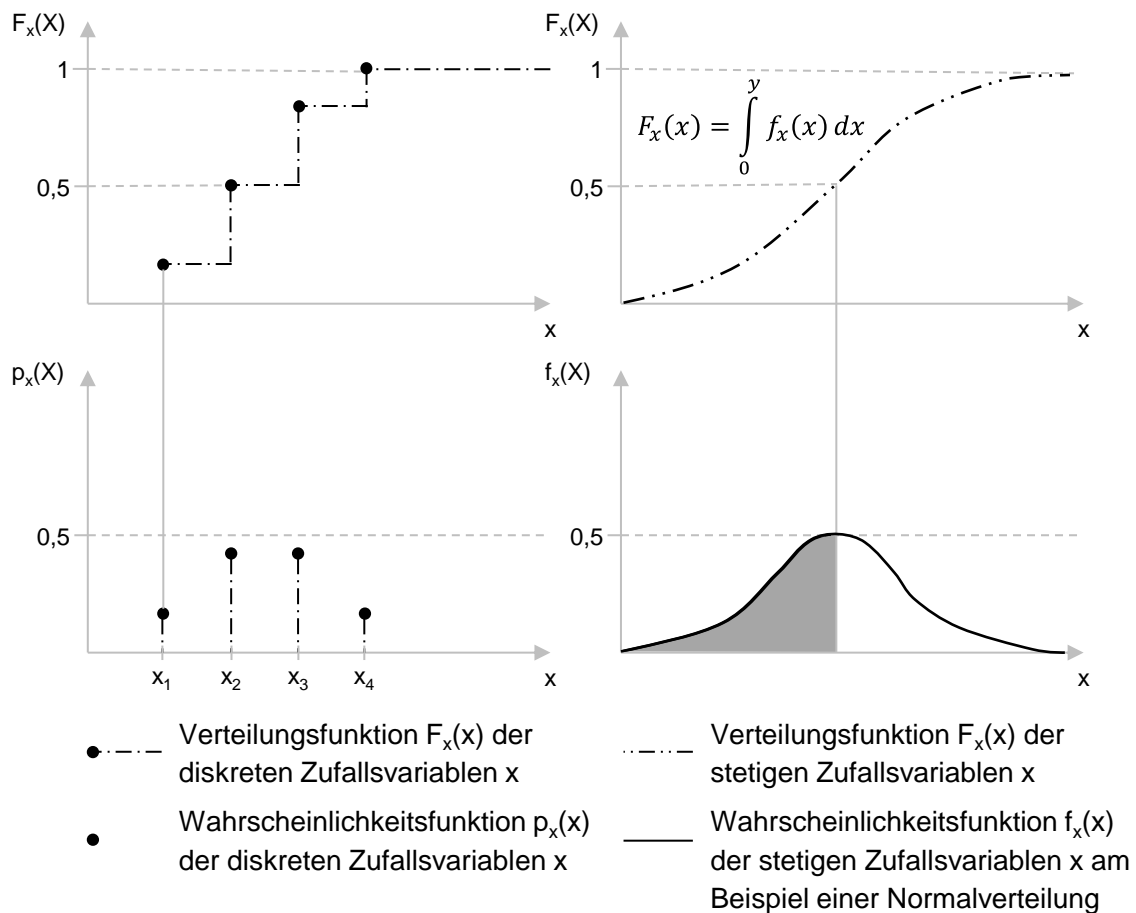


Abbildung 54: Diskrete und stetige Verteilungs- und Dichtefunktionen (in Anlehnung an: POHL 2013, S. 71)

Zur Abbildung der Wahrscheinlichkeit, dass eine diskrete Zufallsvariable  $X$  den Wert  $x$  annimmt wird die Verteilungsfunktion  $F(x)$  definiert. Mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsfunktionen lassen sich die Wahrscheinlichkeiten für ein Ereignis  $X$  abbilden. (SIBBERTSEN & LEHNE 2012, S. 218) Der Wertebereich der Verteilungsfunktion  $F(x)$  beschränkt sich auf das Intervall  $[0;1]$  (POHL 2013, S. 71, SIBBERTSEN & LEHNE 2012, S. 223). Eine diskrete Zufallsvariablen  $X$  kann nur abzählbar unendlich oder endlich viele Werten  $\{x_1, x_2, \dots\}$  annehmen. Die Verteilung von  $X$  wird durch ihre Wahrscheinlichkeitsfunktion  $f(x_i)$  und ihre Verteilungsfunktion  $F(x)$  definiert. (SIBBERTSEN & LEHNE 2012, S. 215-221) Beispiele für



wichtige diskrete Verteilungen sind die Binomial- und die Poissonverteilung (BREDOW 2012, S. 102).

$$f(x_i) = \begin{cases} P(X = x_i) = p_i, & x_i \in \{x_1, x_2, \dots\} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{B-1})$$

$$F(x_i) = \sum_{i: x_i \leq x} f(x_i) \quad (\text{B-2})$$

Ein Merkmal (oder eine Variable)  $X$ , dessen Ausprägung  $x \in R$  von einem Zufallsvorgang abhängen heißt Zufallsvariable.

$P(X = x)$  Wahrscheinlichkeit, dass eine diskrete Zufallsvariable  $X$  den Wert  $x$  annimmt.

Für eine stetige Zufallsvariable  $X$  wird die Verteilung durch die Verteilungsfunktion  $F(x)$  und die dazugehörige Dichtefunktion gegeben (SIBBERTSEN & LEHNE 2012, S. 224-229). Eine Zufallsvariable  $X$  heißt stetig, wenn sie im Intervall  $[a,b]$  mit  $a < b$  jeden Wert annehmen kann. Häufig vorkommende Vertreter der stetigen sind zum Beispiel Normalverteilung, die Lognormalverteilung und die Beta-PERT Verteilung.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (\text{B-3})$$

$$f(x) = F'(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (\text{B-4})$$

### C. Übersicht zu Verteilungsfunktionen

Tabelle 13: Diskrete Verteilungen (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 104)

Verteilung	Verteilung von $X$	Verteilungsfunktion $F(x) = P(\{X < x\})$	Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x) = P(\{X = x\})$
Binomial-Verteilung	$B_{n,p}$	$\sum_{i=0}^{x-1} \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}$	$\binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}$
Negative Binomial-Verteilung	$NB_{n,p}$	$\sum_{i=n}^{x-1} \binom{i-1}{n-1} p^n (1-p)^{i-n}$	$\binom{i-1}{n-1} p^n (1-p)^{i-n}$
Geometrische Verteilung (Var. B)	$G_p$	$\sum_{i=0}^{x-1} p(1-p)^i = 1 - (1-p)^{[x]}$	$p(1-p)^i$
Hypergeometrische Verteilung	$H_{M,N,n}$	$\sum_{i=\max(0,n-N)}^{x-1} \frac{\binom{M}{i} \binom{N}{n-i}}{\binom{M+N}{n}}$	$\frac{\binom{M}{i} \binom{N}{n-i}}{\binom{M+N}{n}}$
Poisson-Verteilung	$P_\alpha$	$\sum_{i=0}^{x-1} e^{-\alpha} \frac{\alpha^i}{i!}$	$e^{-\alpha} \frac{\alpha^i}{i!}$
Diskrete Gleichverteilung	$DL_n$	$\frac{ \{i : x_i < x\} }{n}$	$\begin{cases} \frac{1}{n} & \text{für } x = x_i (i = 1, \dots, n) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

Tabelle 14: Stetige Verteilungen (ROMEIKE & HAGER 2020, S. 105-106)

Verteilung	Verteilung von X	Verteilungsfunktion $F(x) = P(X < x)$	Dichtefunktion
Gleich-Verteilung	$L_{a,b}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{wenn } a < x \leq b \\ 1 & \text{wenn } x > b \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{wenn } a < x \leq b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
Exponential-Verteilung	$E_\alpha$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq 0 \\ 1 - e^{-\alpha x} & \text{wenn } x > 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq 0 \\ \alpha e^{-\alpha x} & \text{wenn } x > 0 \end{cases}$
Erlang-Verteilung	$E_{\alpha,n}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq 0 \\ 1 - e^{-\alpha x} \left[ 1 + \frac{(\alpha x)}{1!} + \frac{(\alpha x)^2}{2!} + \dots + \frac{(\alpha x)^{n-1}}{(n-1)!} \right] & \text{wenn } x > 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq 0 \\ \frac{\alpha^n}{(n-1)!} x^{n-1} e^{-\alpha x} & \text{wenn } x > 0 \end{cases}$
Normal-Verteilung	$N_{\mu,\sigma^2}$	$\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2} dt$	$\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$
Logarithmische Normal-Verteilung	$LN_{\mu,\sigma^2}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq 0 \\ \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x \frac{1}{t} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2} dt & \text{wenn } x > 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq 0 \\ \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \mu}{\sigma} \right)^2} & \text{wenn } x > 0 \end{cases}$
Weibull-Verteilung	$W_{\mu,\sigma,\lambda}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq \mu \\ 1 - e^{-\left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^\lambda} & \text{wenn } x > \mu \end{cases}$	

Verteilung	Verteilung von X	Verteilungsfunktion $F(x) = P(X < x)$	Dichtefunktion
Chi-Quadrat Verteilung	$C_k$	$\frac{1}{2\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \cdot \int_0^x e^{-\frac{t}{2}} \cdot \left(\frac{t}{2}\right)^{\frac{k}{2}-1} dt = 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{k}{2}, \frac{x}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)}$	$\frac{e^{-\frac{x}{2}} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^{\frac{k}{2}-1}}{2\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \quad \text{wenn } 0 < x < \infty$
Student t-Verteilung	$T_k$	$\frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right) \sqrt{k\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \left(1 + \frac{t^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}} dt$	$\frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right) \sqrt{k\pi}} \cdot \left(1 + \frac{x^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}}$
Fisher-Verteilung	$F_{m,n}$	$\frac{\Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right) \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}}}{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \int_0^x t^{\frac{m}{2}-1} \cdot \left(1 + \frac{m}{n} \cdot t\right)^{-\frac{m+n}{2}} dt$ <p>wenn <math>x \leq 0</math> wenn <math>x &gt; 0</math></p>	$\frac{\Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right) \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}}}{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot x^{\frac{m}{2}-1} \cdot \left(1 + \frac{m}{n} \cdot x\right)^{-\frac{m+n}{2}}$ <p>wenn <math>x \leq 0</math> wenn <math>x &gt; 0</math></p>
Gamma-Verteilung	$G_{b,p}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq 0 \\ \frac{b^p}{\Gamma(p)} \cdot \int_0^x t^{p-1} e^{-bt} dt & \text{wenn } x > 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq 0 \\ \frac{b^p}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-bx} & \text{wenn } x > 0 \end{cases}$

## D. Übersicht zur priorisierten Auflistung der Risiken aus dem Anwendungsbeispiel

Tabelle 15: Übersicht zu den Ergebnissen der Risikobewertung und Zuordnung der Maßnahmen

Risiken	Risiko	Kritikalit	Handlung	Maßnahmen	SZ	SZ	SZ	Zusammengefasst zu	Rückwirkung auf
	Nr.	ät	s-fähigkeit		1	2	3		
Verbau eines fehlerhaften Bauteils	1.2	5	4	First Article inspection (fa) zu Standardprozess machen Analyse und Rückruf (soforttausch vs. Bei der nächsten inspektion) Versicherung für Rückrufaktivitäten	x				Qualitätsprozesse für Zulieferteile
TCCA Audits führen zu Restriktionen für die Anpassung der Montage (z.B. räumliche Trennung)	2.5	4	4	Bau eines neuen Gebäudes für Modell G2 Vormontage Modell G2 mit / bei Partnerunternehmen		x	X.2		Beschränkungen im Montagewerk in Canada
Restriktionen Gebäude und Layout für neue Prozesse oder parallelesieren von Prozessen in der Montagein Canada	X.2	4,4,2,2	4,3,3,3	Bau eines neuen Gebäudes für Modell G2 Vormontage Modell G2 mit / bei Partnerunternehmen Aufbau Vormontage im Werk in China	xx	xx			Räumliche Beschränkungen im Montagewerk in Canada
Nachbesserung und Wiederholung von Audits, zusätzliche Nachweispflichten, führen zu Produktionsstillstand oder hohen Kosten für Tests (z.B. Crash-Test)	2.9	4	4	Spezialisten / Consulting engagieren Compliance- Prozesse etablieren		x			Qualitätsprozesse Fertigung und Montage
Verlust von zentralen Arbeitskräften	X.1	4	4	Mitarbeiterbindung über Unternehmensanteile Marktstandard entsprechende Gehaltserhöhungen Transparente Information und Kommunikation zu Gehaltspolitik	x	x			Zentrale Arbeitskräfte
Verlust von zentralen Arbeitskräften (Ingenieure, Manager)	3.1	4	4	Mitarbeiterbindung über Unernehmensanteile			x	X.1	Zentrale Arbeitskräfte
Wareneingang wird zum Bottleneck, Kann zu Verlangsamung der Montageversorgung führen	1.4	4	3	Lieferungsplanung, Verteilung auf Schichten (mehr Personal) Erweiterung	x			X.2 (Teilweise)	Räumliche Beschränkungen im Montagewerk in Canada
Umstellung führt zu Produktionsstillstand	1.7	4	3	Risikomanagement Softwareprojekt Vorproduktion durch Schichtsystem, Betriebsferien	x				IT / Software-Erweiterung Möglichkeit im Schichtsystem zu arbeiten
Ressourcenbindung in Form von MA und Zeit	2.1	3	3	Produktionsumstellung Szenariobasiert planen Flexibilisierung der Umstellung		x			Starrer Aufbau Montage Abstimmung und Kommunikation Forecasting
Altes Modell wird schneller substituiert als erwartet, das neben schlechter Auslastung der Montage zu übermäßigen oder zu zu großen Beständen (auch für Serviceteile)	2.1	3	3	Monitoring des Markets, Frühzeitige und enge Anpassung der Porduktionsforecasts and den Markte, enge Abstimmung und KommunikationForecasting und Porduktionsplanung					
Montageunterbrechungen nach Lieferantenwechsel	1.1	3	2	Installationsequenz ändern (kurzfristig), geht nur bei geringeren Stückzahlen Teile aus dem Service Testteile Management etablieren Supplier Quality onsite audits	x				Bestands , Teilemanagement, Lagerhaltung und Disposition Qualitätprozesse für Zulieferteile
Auftreten von Fertigungs- und Montagefehlern führt zu mehr Nacharbeit und weniger Produktionskapazitäten, Erhöhung der Herstellkosten	1.3	3	2	Qualitygates Befähigung und Sensibilisierung Manufacturing Engineering	x				Qualitätsprozesse Fertigung und Montage Mitarbeiterschulungen und -sensibilisierung
Risiko des Produktionsstillstands, sobald an einer Station Probleme sind; Risiko MRBs sind schwer zu finden; Herstellungskosten steigen, wenn es zu Überstunden, wegen fehlender MA kommt	1.5	3	2	Klare Prozessvorgaben und Verantwortung,	x				Qualitätsprozesse Fertigung und Montage Mitarbeiterschulungen und -sensibilisierung
Es kommt zu Verzögerungen bei der Reorganisation und Umbau der Montage, das neue Modell kann nicht nach Bedarf produziert werden	2.3	3	2	Planung des Umbaus und Ramp-ups frühzeitig (parallel zur Entwicklung) Szenarienbasierte Planung		x			Räumliche Beschränkungen im Montagewerk in Canada Zentrale Arbeitskräfte
Layoutrestriktionen führen zu verminderter Stückzahl	2.4	3	2	Investition in Anbau für die Montage Fremdmontage für Modell G2		x	X.2		Räumliche Beschränkungen im Montagewerk in Canada
Softwareeinführung unter hohem Kostendruck	3.5	3	2	Manuelle Übernahme der Tätigkeit mit Hilfe von Personaldiener Softwareprojekt für CM-Teile Management frühzeitig starten			x		IT / Software-Erweiterung
Zusätzliche Arbeitslast im Engineering, Nicht genug Ressourcen für die Durchführung des Design for manufacturing-Prozesses	2.7	3	1	Design for manufacturing unit, fokus im Design oder frühzeitig lessons learned aus vorigem produktionsanlauf		x			Arbeitsvorbereitung
Niedrige Auslastung für bestimmte Anlagen (Kostenrisiko)	3.2	2	4	Anbieten bestimmter Technologien über Partnerschaften			x		Partnerschaften mit Zulieferern
Produktionsstillstand, vergrößerte Lagerfläche	2.10	2	3	Ramp-up Planung entsprechend machen und Supply-Cahin entsprechend managen Flexible Lagerflächen vorsehen		x	X.2		Bestands , Teilemanagement, Lagerhaltung und Disposition Räumliche Beschränkungen im Montagewerk in Canada
Altes Modell wird langsamer substituiert als erwartet, das führt zu einer Fehlbelastung der Montage zu Nachbestellungen von Zulieferteilen	2.2	2	2	Produktionsumstellung Szenariobasiert planen Flexibilisierung der Umstellung Monitoring des Markets, Frühzeitige und enge Anpassung der Porduktionsforecasts and den Markte, enge Abstimmung und KommunikationForecasting und Porduktionsplanung		x			Bestands , Teilemanagement, Lagerhaltung und Disposition Abstimmung und Kommunikation Forecasting
Großer Anetill an Nacharbeit	2.6	2	2	Ersatzteilplanung Schulungen		x			Bestands , Teilemanagement, Lagerhaltung und Disposition Mitarbeiterschulungen und -sensibilisierung
Großer Anetill an Nacharbeit	2.8	2	2	Ersatzteilplanung Schulungen		x			Bestands , Teilemanagement, Lagerhaltung und Disposition Mitarbeiterschulungen und -sensibilisierung
Technologien können nicht entsprechend bedient werden (Kapazität und Qualität)	3.4	2	2	Anbieten bestimmter Technologien über Partnerschaften Technologien nicht anbieten			x		Partnerschaften mit Zulieferern
Mitarbeiterverlust und Kündigungswelle Risiko: „Sozialunfrieden“ aufgrund von unregelmäßigen und ungleichmäßigen Gehaltserhöhung	1.6	2	1	Gehaltserhöhungen Information und Kommunikation	x		X.1 (Teilweise)		Zentrale Arbeitskräfte
Fehlmanagement für den Bestand an Serviceteilen und Betriebsmitteln	3.3	1	2	Bestandsmanagement einführen		x			Bestands , Teilemanagement, Lagerhaltung und Disposition Mitarbeiterschulungen und -sensibilisierung

## E. Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Für die Forschungsarbeit zu dieser Dissertation wurde zusammen mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München (TUM) im Jahr 2016 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin die nachfolgend aufgeführte Studienarbeit angefertigt. Sie beschäftigte sich mit der Entwicklung einer Methode zur Überprüfung von Belastungen und Störungen auf unternehmensinterne Logistiksysteme. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden teilweise in diese Arbeit aufgenommen.

Tabelle 16: Im Rahmen der Forschung betreute Studienarbeit

Name	Titel
Sirotti, S.	Entwicklung eines ganzheitlichen Stresstests für die Produktionsversorgung

Die Autorin dankt dem Studierenden herzlich für sein Engagement sowie seine Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.