

# **Beitrag zur quantitativen Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Dr. rer. pol.**

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

**M.Eng. Martin Geßner**

aus

Eisenach

Tag der mündlichen Prüfung: 09.10.2024

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Michael Henke
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

**Dortmund, 2024**

## Zusammenfassung

Die anstehende Transformation der klassischen Industrie durch die Einführung von Industrie 4.0 bedeutet einen der größten wirtschaftlichen Paradigmenwechsel in der deutschen Nachkriegsgeschichte. Hierbei läuten die Echtzeitvernetzung von Produkten, Prozessen und Infrastrukturen die vierte industrielle Revolution ein. Die Industrie 4.0 Migration befindet sich jedoch noch am Anfang, was Studienergebnisse deutlich zeigen. Häufig starten Industrie 4.0 Pilotprojekte ohne klare Zielstellung und Wirtschaftlichkeitsbewertung, was der Vorgehensweise bei Forschungs- und Entwicklungsprojekten gleicht.

Um jedoch zu vermeiden, dass Industrie 4.0 zum reinen Selbstzweck verkommt, wo Effizienz eine untergeordnete Rolle spielt, gilt es eine ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen zu entwickeln. Die grundlegende Schwierigkeit bei der Bewertung von Industrie 4.0 Projekten liegt aktuell in der Abschätzung belastbarer Kosten- und Nutzenpotenziale. Zwar ist in der Literatur eine Vielzahl an Kosten- und Nutzenaspekten zu finden, jedoch fehlt oftmals die konkrete Messbarkeit. Gründe hierfür liegen in der komplexen Wirklogik von Industrie 4.0 Technologien und der damit verbundenen kausalen Abbildung von finanziellen Größen. Zudem existieren aufgrund der Neuartigkeit von Industrie 4.0 Projekten hierfür noch keine Erfahrungswerte.

Das Framework der entwickelten ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik stellt eine systematische Vorgehensweise in sieben Schritten dar. Die Detailschritte sind: Vorklärung, Prozessanalyse 4.0, Capability Analyse, Technologiebewertung/-auswahl, Kosten-/Nutzenanalyse, Risiko- und Unsicherheitsanalyse und Investitionsbewertung. Der Fokus liegt dabei auf der Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Investition. Das Vorgehensmodell beschreibt die systematische Vorgehensweise bei der Bewertung einer Industrie 4.0 Investition von der ersten Projektidee bis hin zur Investitionsentscheidung. Kern der Bewertungssystematik sind Bibliotheken in Form von Steckbriefen zu relevanten Kosten- und Nutzenaspekten mit Praxisbeispielen und konkreten Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten, die operativen Anwendern als Unterstützungsinstrument bei der finanziellen Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen dienen sollen.

Die Validierung der Bewertungssystematik erfolgt am Beispiel von zwei Industrie 4.0 Projekten im Umfeld der Montageplanung und operativen Logistik, welche in einem global agierenden Produktionsunternehmen durchgeführt wurden. Dadurch ist es möglich, konkrete Handlungsempfehlungen für die praktische Umsetzung des Ansatzes zu formulieren.

## Abstract

The upcoming transformation of classic industry through the introduction of Industry 4.0 means one of the biggest economic paradigm shifts in German post-war history. The real-time networking of products, processes and infrastructures herald the fourth industrial revolution. However, the Industry 4.0 migration is still in its infancy, which study results clearly show. Industry 4.0 pilot projects often start without a clear objective or economic assessment, which is the same as the procedure for research and development projects.

However, in order to avoid Industry 4.0 becoming an end in itself, where efficiency plays a subordinate role, it is necessary to develop a holistic evaluation system for Industry 4.0 investments. The fundamental difficulty in evaluating Industry 4.0 projects currently lies in the assessment of resilient potential costs and benefits. Although a large number of costs and benefit aspects can be found in the literature, the specific measurability is often lacking. The reasons for this lie in the complex operational logic of Industry 4.0 technologies and the associated causal mapping of financial variables. In addition, due to the novelty of Industry 4.0 projects, there are no empirical values or reliable ex-post analyzes available at the moment.

The framework of the developed ex-ante evaluation system for Industry 4.0 solutions in production and logistics represents a systematic procedure in seven steps. The detailed steps are: preliminary clarification, process analysis, capability analysis, technology assessment or selection, cost/benefit analysis, risk and uncertainty analysis and investment evaluation. The focus is on determining the absolute profitability of an investment. The process model describes the systematic procedure for evaluating an Industry 4.0 investment from the first project idea to the investment decision. The core of the evaluation system is a library in the form of profiles on relevant cost and benefit aspects with practical examples and precise quantification respectively monetization options, which project managers should use as a support tool in the financial evaluation of Industry 4.0 solutions.

The evaluation system is validated using the example of two Industry 4.0 projects in the area of assembly planning and operational logistics, which were evaluated by a global company in the manufacturing industry. This makes it possible to formulate specific recommendations for action in the practical usage of the approach.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Zielstellung und Forschungsfragen.....	7
1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung.....	10
1.4 Aufbau der Arbeit.....	12
<b>2 Wissenschaftliche Grundlagen zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0</b>	
<b>Lösungen</b> .....	<b>14</b>
2.1 Grundlagen der Industrie 4.0.....	14
2.1.1 Entwicklungsstand und Potenziale der Industrie 4.0 in Deutschland.....	14
2.1.2 Definition Industrie 4.0.....	17
2.1.3 Kriterien für Industrie 4.0 Lösungen.....	21
2.1.4 Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen.....	25
2.2 Grundlagen zu direkten und indirekten Unternehmensbereichen.....	37
2.2.1 Direkte Bereiche.....	37
2.2.2 Indirekte Bereiche.....	38
2.2.3 Unterschiede zwischen direkten und indirekten Bereichen.....	39
2.3 Grundlagen der Entscheidungstheorie.....	40
2.3.1 Erwartungsstrukturen präskriptiver Entscheidungslehre.....	40
2.3.2 Entscheidungen bei Unsicherheit.....	42
2.4 Grundlagen der Investitionsrechnung.....	45

2.4.1 Statische Verfahren .....	45
2.4.2 Dynamische Verfahren .....	47
2.4.3 Verfahren zur Nutzenerfassung .....	49
2.5 Grundlagen zu Forschungsmethoden .....	52
2.5.1 Experteninterviews .....	53
2.5.2 Focus Group Methodik .....	54
2.5.3 Literaturanalyse.....	55
2.6 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs .....	55
2.7 Zwischenergebnis: Grundlagen und theoretische Einordnung.....	57
<b>3 Stand der Forschung und Wissenschaft zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Lösungen .....</b>	<b>58</b>
3.1 Entwicklung eines Anforderungskatalogs für das Vorgehensmodell.....	58
3.2 Nationale Bewertungsansätze für Industrie 4.0 Investitionen .....	61
3.3 Nationale Bewertungsansätze für Digitalisierungs- und IT-Investitionen .....	76
3.4 Internationale Bewertungsansätze für IT-Investitionen .....	84
3.5 Zwischenergebnis: Literaturbewertung und Ableitung des Forschungsbedarfs.....	87
<b>4 Forschungskonzeptionierung und Entwicklung des Vorgehensmodells zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen .....</b>	<b>93</b>
4.1 Forschungssystematik und Methodenauswahl .....	93
4.1.1 Durchführung der Experteninterviews.....	95
4.1.2 Durchführung der Focus Group .....	98
4.1.3 Durchführung der Literaturanalyse.....	100
4.2 Ermittlung relevanter Kosten- und Nutzenaspekte sowie deren Quantifizierung .....	100
4.2.1 Bedeutung und Quantifizierbarkeit von Nutzenaspekten .....	101
4.2.2 Bedeutung und Systematisierung von Kostenaspekten .....	133
4.3 Entwicklung einer Systematisierungslogik für Nutzenaspekte .....	136
4.3.1 Auswahl eines Systematisierungsrahmens für Nutzenaspekte .....	136
4.3.2 Ausgestaltung des Systematisierungsrahmens für Nutzenaspekte .....	138

4.4 Integration der Forschungsergebnisse in ein Vorgehensmodell.....	140
4.4.1 Konzeptionierung des Modellrahmens .....	140
4.4.2 Herleitung der Bewertungsschritte und Verfahren .....	144
4.5 Detailvorstellung der entwickelten ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0	
Investitionen in Produktion und Logistik .....	158
4.5.1 Schritt 1: Vorprüfung .....	159
4.5.2 Schritt 2: Prozessanalyse 4.0.....	162
4.5.3 Schritt 3: Capability Analyse .....	166
4.5.4 Schritt 4: Technologiebewertung/-auswahl .....	169
4.5.5 Schritt 5: Kosten-/Nutzenanalyse .....	172
4.5.6 Schritt 6: Risiko- und Unsicherheitsanalyse .....	176
4.5.7 Schritt 7: Investitionsbewertung .....	177
4.6 Zwischenergebnis: Vorgehensmodell zur ex-ante Bewertung von Industrie 4.0	
Investitionen in Produktion und Logistik .....	180
<b>5 Validierung der ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen an zwei</b>	
<b>Beispielen aus der Industrie .....</b>	<b>184</b>
5.1 Praxisprojekt 1: Digitales Planungswerkzeug .....	184
5.1.1 Schritt 1: Vorprüfung .....	184
5.1.2 Schritt 2: Prozessanalyse 4.0.....	187
5.1.3 Schritt 3: Capability Analyse .....	192
5.1.4 Schritt 4 Technologiebewertung/-auswahl.....	193
5.1.5 Schritt 5 Kosten-/Nutzenanalyse.....	194
5.1.6 Schritt 6: Risiko- und Unsicherheitsanalyse .....	196
5.1.7 Schritt 7: Investitionsbewertung .....	198
5.2 Praxisprojekt 2: Autonomes Flurförderzeug .....	199
5.2.1 Schritt 1: Vorprüfung .....	199
5.2.2 Schritt 2: Prozessanalyse 4.0.....	202
5.2.3 Schritt 3: Capability Analyse .....	206

5.2.4 Schritt 4: Technologiebewertung/-auswahl .....	206
5.2.5 Schritt 5: Kosten-/Nutzenanalyse .....	208
5.2.6 Schritt 6: Risiko und Unsicherheitsanalyse .....	210
5.2.7 Schritt 7: Investitionsbewertung .....	211
5.3 Zwischenergebnis: Anwendbarkeit und Erkenntnisgewinn .....	212
<b>6 Zusammenfassung und kritische Würdigung.....</b>	<b>216</b>
6.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse.....	216
6.2 Handlungsempfehlungen für die praktische Umsetzung.....	225
6.3 Kritische Würdigung und weiterer Forschungsbedarf.....	227
<b>7 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>230</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>273</b>
Anhang 1 Interviewleitfaden der Experteninterviews .....	273
Anhang 2 Detailergebnisse zu den projektspezifischen Nutzenaspekten.....	281
Anhang 3 Detailergebnisse zu den projektspezifischen Kostenaspekten.....	282
Anhang 4 Steckbriefe der Kosten- und Nutzenaspekte .....	283
Anhang 5 Detailauswertung zu den Quantifizierungsmöglichkeiten der Nutzenaspekte ..	297
Anhang 6 Detailauswertung zur Systematisierung der Nutzenaspekte .....	302

# Abkürzungsverzeichnis

acatech.....	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
API .....	Application Programming Interface
ADU .....	Autonomous Delivery Unit
BJ.....	Beschäftigungsjahr
BMBF.....	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi.....	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BSC .....	Balanced Score Card
CAD .....	Computer Added Design
CPS.....	Cyber-Physisches System
DAP.....	Digital Assembly Planner
DBR.....	Dynamic Benefit Realization
DES .....	Digital Engineering Systemen
EAM.....	Enterprise Architecture Management
ema .....	Editor menschlicher Arbeit
FMEA.....	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
IML.....	Institut für Materialfluss und Logistik
IoT .....	Internet of Things
IPA .....	Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
IPRI .....	International Performance Research Institute
IT .....	Informationstechnik
KI.....	Künstliche Intelligenz
KPIs.....	Key Performance Indicators
MA .....	Mitarbeiter
MRK.....	Mensch-Roboter-Kollaboration
NWA .....	Nutzwertanalyse
OEE.....	Overall Equipment Effectiveness
PCE.....	Process Cycle Efficiency
PLM-Systeme.....	Product Lifecycle Management System
PWC .....	Pricewaterhouse Coopers
RAMI 4.0 .....	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
REJ .....	Rapid Economic Justification
ROI.....	Return on Investment

SCM ..... Supply Chain Management  
SE ..... Systems Engineering  
SSOT .....Single Source of Truth  
TCO..... Total Cost of Ownership  
TEI..... Total Economic Impact  
TVO..... Total Value of Opportunity  
VR ..... Virtual Reality

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Problemstellungen bei der ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen ..	4
Abbildung 2: Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit .....	11
Abbildung 3: Aufbau der Arbeit .....	13
Abbildung 4: Potenziale der Industrie 4.0 für Deutschland bis 2025 nach BITKOM .....	15
Abbildung 5: Abgrenzung Internet der Dinge, Industrie 4.0, Digitalisierung, Cyber-Physische Systeme und Digital Engineering Systeme .....	20
Abbildung 6: Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen .....	26
Abbildung 7: Abgrenzung direkte und indirekte Unternehmensbereiche nach Hillmer.....	39
Abbildung 8: Umweltzustände der präskriptiven Entscheidungslehre nach Laux et al.....	41
Abbildung 9: Systematisierung der Verfahren der Nutzenerfassung nach Becker .....	50
Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Wirkungskette nach Kesten .....	51
Abbildung 11: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs.....	56
Abbildung 12: Bewertungsleitfaden zur ökonomischen Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen nach Günter et al.....	63
Abbildung 13: Ziel- und Ergebnisgrößen für Industrie 4.0 Anwendungen nach Günter et al.	65
Abbildung 14: Vorgehensmodell zur Nutzenbewertung von IT-Projekten nach Kesten et al.	80
Abbildung 15: Forschungssystematik der vorliegenden Arbeit.....	94
Abbildung 16: Steckbrief der Ergebnisgröße Komplexitätsreduzierung .....	97
Abbildung 17: Vorgehensweise der Focus Group zur Systematisierung der Nutzenaspekte ..	99
Abbildung 18: Nutzbarkeit der Verfahren zur Nutzenerfassung zur Beantwortung von FF 3 .....	106
Abbildung 19: Quantifizierungsmöglichkeiten von Nutzenaspekten am Beispiel der Steuergröße Datenkonsistenz .....	107
Abbildung 20: Ergebnisse der Experteninterviews zu den Kostenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen .....	135
Abbildung 21: Auswahl einer geeigneten Systematisierungslogik für Nutzenaspekte.....	137
Abbildung 22: Zuordnung der Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen zu Steuer- und Ergebnisgrößen.....	138
Abbildung 23: Abhängigkeit zwischen Steuer- und Ergebnisgrößen am Beispiel der Steuergröße Standardisierung .....	139
Abbildung 24: Übersicht der quantitativen Zuordnung von Steuer- zu den Ergebnisgrößen	140

Abbildung 25: Gegenüberstellung der Bewertungsschritte und Anforderungskriterien Teil 1 .....	142
Abbildung 26: Gegenüberstellung der Bewertungsschritte und Anforderungskriterien Teil 2 .....	143
Abbildung 27: Modellrahmen des Vorgehensmodells zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen .....	144
Abbildung 28: Praxistauglichkeit der Verfahren zur Berücksichtigung von Unsicherheit nach Kesten et al. ....	154
Abbildung 29: Praxistauglichkeit der Verfahren zur statischen und dynamischen Investitionsrechnung .....	156
Abbildung 30: Abgleich des Modellrahmens mit den definierten Anforderungskriterien ....	158
Abbildung 31: Vorgehensweise zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik.....	159
Abbildung 32: Schematische Darstellung einer Prozessanalyse 4.0.....	163
Abbildung 33: Exemplarisches Ergebnis einer Capability Analyse am Beispiel Lagerlogistik .....	168
Abbildung 34: Schematische Darstellung des Vorgehensmodells zur Technologieauswahl	171
Abbildung 35: Prozessablaufdiagramm zur Kosten-/Nutzenanalyse mittels Steckbriefen....	173
Abbildung 36: Steckbrief des Nutzenaspekts Wissens- und Erfahrungsmanagement.....	174
Abbildung 37: Übersicht zu den Kostenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen .....	175
Abbildung 38: Ist-Prozessaufnahme des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner ..	188
Abbildung 39: Schwachstellenanalyse des Ist-Prozesses des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner.....	189
Abbildung 40: Entwickelter Soll-Prozess des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner .....	190
Abbildung 41: Ist-Prozessaufnahme des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit	203
Abbildung 42: Schwachstellenanalyse des Ist-Prozesses des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit .....	204
Abbildung 43: Entwickelter Soll-Prozess des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit.....	205
Abbildung 44: Ergebnis der Technologieauswahl des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit.....	207
Abbildung 45: Detailergebnisse der projektspezifischen Nutzenaspekte aus indirekten Bereichen.....	281

Abbildung 46: Detailergebnisse der projektspezifischen Nutzenaspekte aus direkten Bereichen.....	281
Abbildung 47: Detailergebnisse der projektspezifischen Kostenaspekte aus indirekten Bereichen.....	282
Abbildung 48: Detailergebnisse der projektspezifischen Kostenaspekte aus direkten Bereichen .....	282
Abbildung 49: Steckbrief zum Nutzenaspekt Variantenflexibilität .....	283
Abbildung 50: Steckbrief zum Nutzenaspekt Verbesserung der Reaktionsfähigkeit .....	283
Abbildung 51: Steckbrief zum Nutzenaspekt Durchlaufzeitreduzierung.....	284
Abbildung 52: Steckbrief zum Nutzenaspekt Volumenflexibilität .....	284
Abbildung 53: Steckbrief zum Nutzenaspekt Mitarbeiterereinsatzflexibilität.....	285
Abbildung 54: Steckbrief zum Nutzenaspekt Komplexitätsreduzierung .....	285
Abbildung 55: Steckbrief zum Nutzenaspekt Verbesserung der Prozessqualität .....	286
Abbildung 56: Steckbrief zum Nutzenaspekt Verbesserung der Produktqualität.....	286
Abbildung 57: Steckbrief zum Nutzenaspekt Ressourceneffizienz .....	287
Abbildung 58: Steckbrief zum Nutzenaspekt Prozesseffektivität.....	287
Abbildung 59: Steckbrief zum Nutzenaspekt Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit .....	288
Abbildung 60: Steckbrief zum Nutzenaspekt Skalierbarkeit .....	288
Abbildung 61: Steckbrief zum Nutzenaspekt Termintreue.....	289
Abbildung 62: Steckbrief zum Nutzenaspekt Engpasserkennung .....	289
Abbildung 63: Steckbrief zum Nutzenaspekt Prozesstransparenz.....	290
Abbildung 64: Steckbrief zum Nutzenaspekt Echtzeitsteuerung .....	290
Abbildung 65: Steckbrief zum Nutzenaspekt Value Chain Integration.....	291
Abbildung 66: Steckbrief zum Nutzenaspekt Autonome Systeme .....	291
Abbildung 67: Steckbrief zum Nutzenaspekt Assistenzsysteme .....	292
Abbildung 68: Steckbrief zum Nutzenaspekt Datenkonsistenz .....	292
Abbildung 69: Steckbrief zum Nutzenaspekt Usability/Nutzerfreundlichkeit .....	293
Abbildung 70: Steckbrief zum Nutzenaspekt Arbeitsergonomie.....	293
Abbildung 71: Steckbrief zum Nutzenaspekt Bedarfsglättung .....	294
Abbildung 72: Steckbrief zum Nutzenaspekt Modularisierung .....	294
Abbildung 73: Steckbrief zum Nutzenaspekt Standardisierung .....	295
Abbildung 74: Steckbrief zum Nutzenaspekt Wissens- und Erfahrungsmanagement.....	295
Abbildung 75: Steckbrief zu den Kostenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen .....	296

Abbildung 76: Detailauswertung zu den Quantifizierungsmöglichkeiten der Nutzenaspekte .....	301
Abbildung 77: Detailauswertung zur Systematisierung der Nutzenaspekte .....	305

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kriterienübersicht für Industrie 4.0 Lösungen .....	25
Tabelle 2: Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen in Abhängigkeit der Literaturquellen.	27
Tabelle 3: Anforderungskriterien für das zu entwickelnde Vorgehensmodell.....	61
Tabelle 4: Konzeptvergleich der relevanten wissenschaftlichen Bewertungsansätze für Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Investitionen auf Basis der Anforderungskriterien ....	87
Tabelle 5: Überblick zu den Industrie 4.0 Anwendungsfällen der durchgeführten Experteninterviews.....	96
Tabelle 6: Ergebnisse der Experteninterviews zu den Häufigkeiten der ausgewählten Nutzenaspekte .....	102
Tabelle 7: Kategorisierung der Quantifizierungsmöglichkeiten der Nutzenaspekte.....	109
Tabelle 8: Schematische Darstellung des Ergebnisses einer Risiko- und Unsicherheitsanalyse .....	177
Tabelle 9: Kosten-/Nutzenanalyse des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner .....	196
Tabelle 10: Risiko- und Unsicherheitsanalyse des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner.....	197
Tabelle 11: Kosten-/Nutzenverlauf der vier Trendszenarien des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner.....	198
Tabelle 12: Investitionskennzahlen der vier Trendszenarien des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner.....	198
Tabelle 13: Kosten-/Nutzenanalyse des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit.	209
Tabelle 14: Risiko- und Unsicherheitsanalyse des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit.....	210
Tabelle 15: Kosten-/Nutzenverlauf der vier Trendszenarien des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit .....	211
Tabelle 16: Investitionskennzahlen der vier Trendszenarien des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit .....	212

# 1 Einleitung

Industrie 4.0 ist einer der Megatrends unserer Zeit, was sich in der Omnipräsenz des Themas auf Tagungen, Messen oder in Veröffentlichungen widerspiegelt (Andelfinger 2017, S. 1). Im Rahmen der „Hightech Strategie 2020“ der Bundesregierung als Handlungsfeld benannt (Regelmann 2019, S. 19), stammt der Begriff Industrie 4.0 aus dem deutschen Sprachraum. Da verwundert es nicht, dass Deutschland zum Vorreiter der Industrie 4.0 Integration geworden ist (BMBF 2018). In der übrigen Welt spricht man bei ähnlichen technischen und organisatorischen Veränderungen im industriellen Umfeld häufig über „Digitalisierung“ und „Internet der Dinge“ (Reinhmeier 2017, S. V), wobei sich der Begriff Industry 4.0 mittlerweile auch international etabliert hat. Eine allgemeine, wissenschaftlich präzise Definition des Begriffs Industrie 4.0 sowie eine eindeutige Abgrenzung zur „Digitalisierung“ und dem „Internet der Dinge“ existiert bisweilen nicht (Zitzmann et al. 2019, S. 477 f.).

Die anstehende Transformation der klassischen Industrie durch die Einführung von Industrie 4.0 bedeutet einen der größten wirtschaftlichen Paradigmenwechsel (Bauernhansel, 2017, S. 29) in der deutschen Nachkriegsgeschichte. Hierbei läuten die Echtzeitvernetzung von Produkten, Prozessen und Infrastrukturen die vierte industrielle Revolution ein (Deuse et al. 2022, S. 2). Zudem beschreibt die Industrie 4.0 „eine neue Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten“ (Kagermann et al. 2016, S. 5). So können durch flexible Gesamtsysteme bspw. Produkt-einführungszeiten signifikant reduziert werden (Schließmann 2017, S. 173). Das Zusammenspiel von „Cyber-Physischen Systemen“<sup>1</sup> (CPS) und „Digital Engineering Systemen“ (DES) ist dabei der ausschlaggebende Faktor (Schmucker et al. 2015, S. 536). CPS sind bspw. intelligente Maschinen, Lagersysteme oder Betriebsmittel, die Informationen autonom austauschen, sich gegenseitig steuern und dezentral Aktionen mit dem Ziel ausführen (Becker und Pflaum 2019, S. 5), die Wertschöpfungseffektivität und -effizienz um bis zu 91 Prozent (Wee et al. 2016, S. 10) zu erhöhen (Hoffmann 2017, S. 47). Jährlich sind Schätzungen zu Folge Effizienzsteigerungen von 6 bis 8 Prozent durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen erreichbar (Siemens AG 2015, S. 18). DES ermöglichen dabei den durchgängigen Einsatz von digitalen Planungslösungen und Modellen im gesamten Produktlebenszyklus und tragen somit bspw. zur Ressourceneffizienz bei (Berndt et al. 2015, S. 239). Unternehmen können sich dem Thema Industrie 4.0 nicht entziehen (Schlicke und Negele 2019, S. 11) und

---

<sup>1</sup> Cyber-Physische Systeme sind technische Einrichtungen, bei denen informations- und softwaretechnische mit mechanischen Komponenten verbunden sind (Müller und Härtig 2017, S. 52), wobei Datentransfer und -austausch sowie Kontrolle bzw. Steuerung über eine Infrastruktur wie das Internet in Echtzeit erfolgen (Bendel 2019).

werden ohne die Umsetzung einer Industrie 4.0 Strategie langfristig nicht wettbewerbsfähig sein (Schlicke und Negele 2019, S. 38).

Neben den tiefgreifenden technischen und prozessualen Veränderungen beeinflusst die Einführung der Industrie 4.0 auch den Menschen als Arbeitskraft sowie die unternehmensweiten Managementstrukturen (Henke 2019, S. 3) und initiiert somit einen Wandlungsprozess der gesamten Organisationsstruktur (Ullrich et al. 2017, S. 113). Von notwendigen Qualifizierungen, um in der digitalen Welt bestehen zu können, über die Gestaltung von Arbeitsplätzen (Andelfinger 2017, S. 2) und Entstehung neuer Tätigkeitsbereiche (Herrmann et al. 2017, S. 233) bis hin zu ethischen Fragen nach der Bedeutung und Rolle des Menschen in Zusammenhang mit Ersetzbarkeitsängsten (Ullrich et al. 2017, S. 113). Das vollvernetzte Produktionssystem ist also Gegenstand sowohl wissenschaftlicher als auch gesellschaftlicher Diskussionen (Hämmerle et al. 2018, S. 5). Dabei ist zu vermeiden, dass Mitarbeiter zu austauschbaren Ressourcen degradiert werden, da dies nachhaltig dem Geschäftserfolg schadet (Capelli 2020, S. 35). Daher gilt es die aktive Gestaltung der Industrie 4.0 in den Bereichen Mensch und Organisation voranzutreiben (Deuse et al. 2019 b, S. 1).

Die vertikale und horizontale Integration von Industrie 4.0 Lösungen in bestehende Wertschöpfungsnetzwerke sowie die Sicherstellung der digitalen Durchgängigkeit sind als große Herausforderungen für die Unternehmen zu betrachten (Kagermann et al. 2016, S. 5). Insbesondere das Management der relevanten, sinnvoll interpretierbaren Daten ist als notwendige Grundlage der Prozessdigitalisierung anzusehen (Hierzer 2017, S. 43). Datenmanagement existiert jedoch nicht erst seit der Industrie 4.0, sondern ist eine weitaus ältere Herausforderung, die bereits im Rahmen der „Digitalen Fabrik“ adressiert wurde (Bracht et al. 2018, S. 11). Neben dem Datenmanagement stellt auch der Datenschutz und die Datensicherheit im Zeitalter der Industrie 4.0 eine zentrale Herausforderung dar (Frenz 2020, S. 44). Die Flexibilisierung bestehender Wertschöpfungsnetzwerke mit dem Ziel der kundenindividuellen Massenfertigung erhöht jedoch die Gesamtkomplexität erheblich (Dorst 2017, S. 337). Hinzu kommt eine Fülle an Rechtsfragen, die sowohl an bestehende sozialtechnische Problemstellungen anknüpfen als auch grundlegender Natur sind, da die Industrie 4.0 einen Paradigmenwechsel im Wirtschaftssystem mit sich bringt (Hornung und Hofmann 2018, S. 11).

Da nur 48 Prozent der Unternehmen konkrete Industrie 4.0 Projekte umsetzen und lediglich 8 Prozent eine umfassende operative Umsetzung aufweisen (Schlicke und Negele 2019, S. 8), stellt sich die Frage nach der Implementierung von Industrie 4.0 Strategien im jeweiligen Branchenkontext, um in den kommenden Jahren nachhaltige Benefits zu erzielen. Da die

Implementierung keinen reinen Selbstzweck darstellt und häufig Probleme bei der Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen in der industriellen Praxis vorherrschen, muss dringend die Frage nach der Wirtschaftlichkeit beantwortet werden (Obermaier und Grottke 2017, S. 122; Hetterscheid 2020, S. 3 f.).

## 1.1 Problemstellung

Laut einer Umfrage von Siemens zu den internen und externen Herausforderungen der Umsetzung von Industrie 4.0 Lösungen aus dem Jahr 2015, gaben 41 Prozent der Befragten an, dass der Nutzen von Industrie 4.0 Lösungen nicht klar sei und das konkrete Wirtschaftlichkeitsrechnungen fehlen. 55 Prozent der befragten Entscheidungsträger haben sich noch nie mit dem Thema Wirtschaftlichkeitsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen beschäftigt. Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbewertung vermissen 36 Prozent der Befragten die Transparenz bzgl. der gestiegenen Betriebskosten sowie der gestiegenen Komplexität solcher Anwendungen, insbesondere auf der IT-Seite. Weiterhin fehlen auf Basis der oftmals fehlenden oder unvollständigen Wirtschaftlichkeitsrechnung geeignete Finanzierungsmodelle, um den Kapitaleinsatz zu minimieren (Siemens AG 2015, S. 9; Hetterscheid 2020, S. 3). Hierzu passen die Zahlen aus einer Studie der Unternehmensberatung Deloitte aus dem Jahr 2016 unter mittelständigen Unternehmen. Dort heißt es, dass lediglich 29 Prozent der Unternehmen im Kontext von Industrie 4.0 überhaupt Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchführen. Parallel dazu initiieren 56 Prozent der Entscheidungsträger Industrie 4.0 Projekte nur dann, wenn deren Erfolg bereits sicher abgeschätzt werden kann (Schuh et al. 2018, S. 44).

Die Betrachtung der betriebswirtschaftlichen Ebene von Industrie 4.0 Anwendungen stellt oftmals eine zentrale Schwierigkeit für Unternehmen dar, da der Fokus in erster Linie auf den technischen Aspekten liegt (Schmelting 2019, S. 2). Jedoch müssen Entscheider insbesondere die ökonomischen Perspektiven hinterfragen, um nach den ökonomischen Prinzipien agieren zu können (Kirsch 2017, S. 1). 71 Prozent der 129 befragten Personen gaben 2017 im Rahmen einer empirischen Studie an, für Industrie 4.0 Lösungen separate Investitionsrechnungsverfahren zu verwenden (Jahn 2017, S. 135). Schwächen bestehender Bewertungsansätze sind jedoch oftmals ein zu hoher Zeitaufwand, mangelnder Nutzen aus Endanwendersicht und eine zu geringe Praxistauglichkeit (Schneider und Lindemann 2015, S. 11).

Ein Beitrag der Plattform Mittelstand 4.0 aus dem Jahr 2020 zu den Herausforderungen bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung von Industrie 4.0 verdeutlicht, dass hier nach wie vor Handlungsbedarf besteht (Unger 2020). Daher ist die strukturierte und objektive Bewertung

von Investitionen für Industrie 4.0 Lösungen eine Herausforderung künftiger wissenschaftlicher Untersuchungen (Schuh et al. 2018, S. 41).

Die Detailproblemstellungen einer ex-ante<sup>2</sup> Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen lassen sich auf Basis der Literatur in vier Aspekte einteilen, die in Abbildung 1 dargestellt sind und als Erfassungsproblem, Bewertungsproblem, Unsicherheitsproblem und IT-Integrationsproblem bezeichnet werden können.

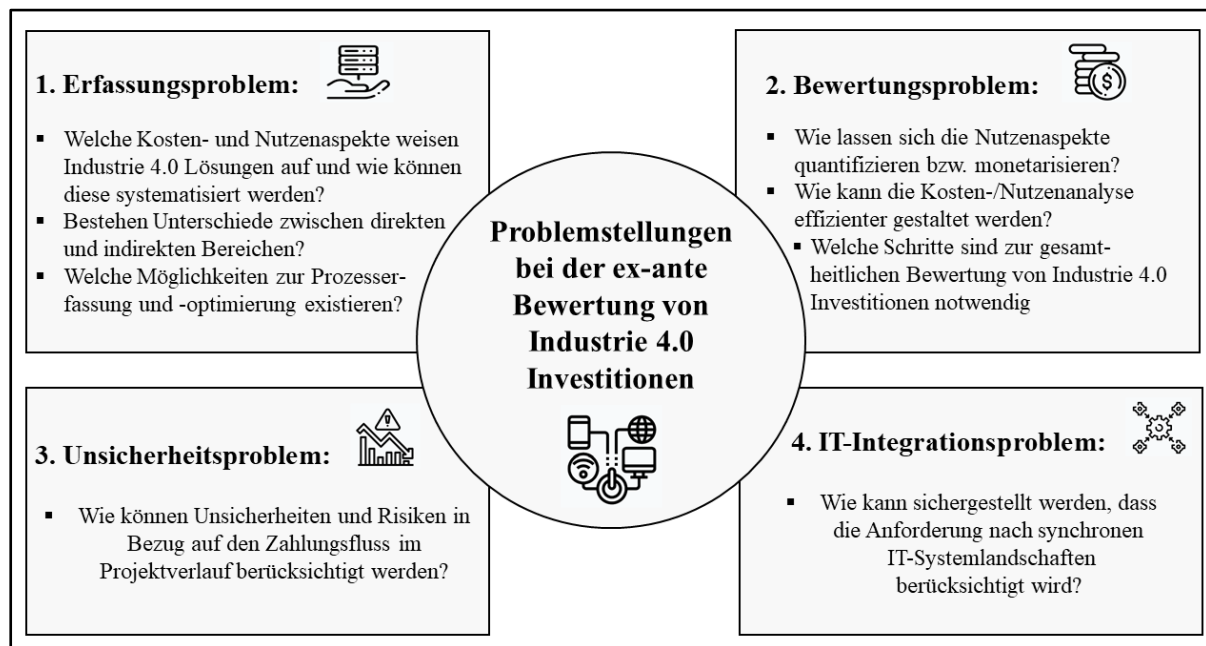


Abbildung 1: Problemstellungen bei der ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen

### 1. Erfassungsproblem

In erster Linie stellt sich die Frage nach der Identifikation von relevanten Kosten- und insbesondere Nutzenaspekten, die für eine Bewertung herangezogen werden können (Regelmann 2019, S. 46; Günter et al. 2021, S. 1). Die Bedeutung klassischer qualitativer und quantitativer Nutzenaspekte verändert sich im Kontext der Industrie 4.0, was wiederum bedeutet, dass Erfahrungswerte aus der Vergangenheit nur bedingt verwendet werden können (Ematinger, 2018, S. 9 ff.; Roth 2016, S. 8). In diesem Zusammenhang gilt es die Bedeutung der relevanten Kosten- und Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen herauszuarbeiten. Weitere Teilaspekte des Erfassungsproblems sind die Berücksichtigung von Wirkungsketten der Nutzenaspekte, der zeitliche Verzug des Erlöseinsatzes sowie die Betrachtung unterschiedlicher Nutzenverläufe (Kesten et al. 2006, S. 4 ff.). Da Industrie 4.0 Anwendungen die Tätigkeiten und Kosten-/Nutzenursachen künftig von direkten in indirekte Unternehmens-

<sup>2</sup> Ex-ante Analysen zielen auf die Erklärung zukünftiger volkswirtschaftlicher Zusammenhänge mithilfe von Planungs- und Erwartungsgrößen ab (Wohltmann und Wübbenhorst 2018).

bereichen verschieben (Eisele et al. 2021, S. 10), stellt sich ferner die Frage nach signifikanten Unterschieden in Bezug auf die absolute und relative Bedeutung relevanter Kosten- und Nutzenaspekte für Industrie 4.0 Lösungen in direkten und indirekten Bereichen. Zum Erfassungsproblem gehört ebenfalls die Frage nach den geeigneten methodischen Ansätzen zur Prozesserfassung und -visualisierung in Hinblick auf die Prozessoptimierung (Kirazli 2017, S. 69), die als Grundlage für die Ermittlung geeigneter Kosten- und Nutzenaspekte verwendet werden können. Die große Anzahl an Nutzenaspekten für Industrie 4.0 Lösungen in der Literatur wirft weiterhin die Frage nach einer praxistauglichen und anwenderfreundlichen Systematisierung auf (Hetterscheid 2020, S. 47). Als weitere Herausforderung im Sinne des Erfassungsproblems beschreiben Schuh et al. (2018) die Sicherstellung von Vollständigkeit und Validität aller relevanten Informationen vor der Bewertung (Schuh et al. 2018, S. 42), um im Bewertungsprozess ressourceneffizient arbeiten zu können.

## **2. Bewertungsproblem**

Die klassische Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen besteht, insbesondere im betrieblichen Umfeld, nach wie vor aus einer monetären Bewertung, bestehend aus Kosten und Nutzen, sowie einer nicht monetären Bewertung, die häufig via Nutzwertanalyse quantifizierbare Ergebnisse zu generieren versucht (Schuh et al., 2018, S. 41). Da die Nutzwertanalysen stark subjektiv geprägt sind und qualitative Nutzenaspekte nur scheinbar berechenbar machen bzw. ihnen oftmals zu große Bedeutung zumessen (Obermaier und Grottko 2017, S. 122), finden diese, getreu dem Motto „if you can't measure it, it will never get done [...] and something is wrong“ (Mascarella 2005, S. 32), im betrieblichen Umfeld kaum Berücksichtigung bei der Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen (Kofner 2016, S. 163). An dieser Stelle wird eine geeignete Bewertungsmethodik benötigt, die rein quantitative bzw. monetarisierte Ergebnisse liefert und dabei qualitative Nutzenaspekte berücksichtigt (Kesten et al. 2006, S. 4 ff.). Neben der Monetarisierung von Nutzenaspekten stellt die gesamtheitliche Bewertung und schrittweise Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Industrie 4.0 Investitionen eine weitere Problemstellung dar. In der Literatur und dem betrieblichen Umfeld existiert eine Vielzahl an Vorgehensmodellen, die jedoch lediglich Teilaspekte abdecken (Obermaier und Grottko 2017, S. 143).

## **3. Unsicherheitsproblem**

Die Unsicherheit bei Investitionsentscheidungen ist eine klassische Herausforderung des Finanzcontrollings bzw. der Entscheidungstheorie (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 259). Zur Berücksichtigung von Unsicherheit im Entscheidungsprozess existiert eine Vielzahl an

Methoden und Regeln (Bock 2010, S. 32). Im Kontext der Investitionen für Industrie 4.0 Anwendungen stellt sich die Frage jedoch in erhöhtem Maße, da der Erfolg von vielseitigen Rand- und Rahmenbedingungen abhängig ist und noch keine fundierten betriebswirtschaftlichen Forschungsergebnisse vorliegen (Regelmann 2019, S. 6). Weiterhin stellt die Ermittlung und Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Ein- und Auszahlungen sowie deren Verzinsung ein Problem in Bezug auf den zukünftigen Wert der Investition dar, welches aufgrund unklarer Investitionskosten, Entwicklungszeiten sowie Produktlebenszyklen besteht (Regelmann 2019, S. 293). Es zeigt sich also, dass die Vorhersagbarkeit der Höhe des Nutzens und insbesondere des Eintrittszeitpunktes eine zentrale Problemstellung der Investitionsrechnung von Industrie 4.0 Lösungen darstellt (Kesten et al. 2006 S. 4 ff.).

#### **4. IT-Integrationsproblem**

Ein Merkmal von Industrie 4.0 Lösungen stellt die Vernetzung von IT-Systemen bspw. zur Erzielung einer prozesskettenübergreifenden Datennutzung dar (Anderl et al. 2016, S. 126 f.). Allerdings ist zur Vermeidung von künftigen Insellösungen und stetig wachsender Komplexität die nachhaltige Integration von digitalen Technologien in die bestehende IT-Systemlandschaft sicherzustellen, was im betrieblichen Umfeld aktuell als große Herausforderung anzusehen ist (Bildstein und Seidelmann 2017, S. 229 f.; Besemann et al. 2021, S. 6; Kaddoumi und Watfa 2021, S. 1). Hierbei ist die Definition und Einhaltung umfassender IT- und Programmierstandards sowie Referenzarchitekturen nötig, um die erwünschte Vernetzung sicherzustellen (Seiter et al. 2017, S. VII; Kagermann et al. 2013, S. 6). „Um Systemkomponenten funktional vernetzen zu können, müssen diese bspw. auf einer gemeinsamen Schnittstellenspezifikation aufsetzen“ (Liggesmeyer und Forstner 2017, S. 120). Weiterhin müssen neue Industrie 4.0 Systeme auf Basis ihrer Funktionsumfänge auf die Integrationsfähigkeit in die bestehende IT-Systemlandschaft überprüft werden, um den Aufbau von Redundanzen und Insellösungen zu verhindern (Bildstein und Seidelmann 2017, S. 230). Dabei können „White-Spot-Analysen“ (Fraunhofer IAO 2018). bzw. „Business Capability Analysen“<sup>3</sup> als Instrument des „Enterprise Architecture Management“<sup>4</sup> Transparenz über die aktuelle IT-Systemlandschaft sowie deren Funktionsumfänge schaffen und aufzeigen, wo Handlungsbedarf besteht (Aurelius und Partner 2012; Korhonen und Halen 2017, S. 351). Als weiterer Teilaspekt des IT-Integrationsproblems ist der Auswahlprozess architekturkonformer Anwendungstechnologien zu betrachten, um

---

<sup>3</sup> Business Capabilities sind Fähigkeiten, die eine Organisation zur Erbringung von Kernfunktionen des Geschäftsmodells benötigt (Denman 2011).

<sup>4</sup> Enterprise Architecture Management (EAM) ist ein Instrument um die Synchronisierung von fachlichen und IT-Anforderungen innerhalb eines Unternehmens herzustellen (Kleehaus und Matthes 2019, S. 11).

cyberphysische Systemlandschaften mit umfassender Systemintegration erreichen zu können (Poschmann 2021, S. 1; Korhonen und Halen 2017, S. 351).

Die Aufstellung der aktuellen Herausforderungen bei der Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen zeigt die Notwendigkeit zur Entwicklung einer geeigneten ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen auf, welche die Beantwortung aller vier Problemstellungen inklusive der Unterpunkte umfasst.

## 1.2 Zielstellung und Forschungsfragen

In Anbetracht der Herausforderungen und der Unsicherheit bei der Bewertung von Industrie 4.0 Projekten ist festzuhalten, dass Unternehmen oftmals nicht in der Lage sind, die Wirtschaftlichkeit solcher Investitionen zu ermitteln (Joppen et al. 2019, S. 483 f.). Obermeier und Grottko (2017) schreiben hierzu, dass gesamtheitliche Bewertungsverfahren nicht flächendeckend im Einsatz sind und an dieser Stelle großer Forschungsbedarf besteht (Obermaier und Grottko 2017, S. 143). Vielmehr befindet sich die Industrie 4.0 Migration noch ganz am Anfang (Schmelting 2019, S. 484).

Die grundlegende Schwierigkeit bei der Bewertung von Industrie 4.0 Projekten liegt aktuell in der fehlenden methodischen Unterstützung (Joppen et al. 2019, S. 484). Zudem ist die Abschätzung belastbarer Nutzenpotenziale sowie deren Systematisierung (Obermaier und Grottko 2017, S. 122) in Hinblick auf den finanziellen Erfolg als Herausforderung zu nennen (Schumacher et al. 2020, S. 25). In der Literatur ist diesbezüglich zwar eine Vielzahl an qualitativen und quantitativen Nutzenaspekten zu finden (Smith, 2010, S. 9), doch fehlt oftmals die konkrete Messbarkeit (Günter et al. 2021, S. 1; Horvath et al. 2015, S. 19) oder die Systematisierung. Gründe hierfür liegen in der komplexen Wirklogik von Industrie 4.0 Technologien und der damit verbundenen kausalen Abbildung von finanziellen Größen. Insbesondere qualitative Nutzeneffekte erlangen immer mehr Bedeutung und müssen daher quantifiziert und monetarisiert werden (Hettterscheid 2020, S. 122). Zudem existieren aufgrund der Neuartigkeit, langen Entwicklungs- und Implementierungszeit sowie hohen Anfangsinvestitionen von Industrie 4.0 Projekten (Schumacher et al. 2020, S. 25) hierfür noch keine verlässlichen Erfahrungswerte oder verlässlichen ex-post Analysen (Obermaier und Grottko 2017, S. 122).

Daher liegen die zentralen Forschungsschwerpunkte im Rahmen der vorliegenden Arbeit in der Identifizierung der relevanten Industrie 4.0 Kosten- und Nutzenpotenziale inklusive einer geeigneten Systematisierung sowie deren Messbarkeit, um dem operativen „Return on

Investment (ROI)<sup>5</sup> - Zwang“ zu entsprechen (Stocker et al. 2019, S. 499). Der Fokus liegt dabei nicht auf der Weiterentwicklung von hochkomplexen, stark theoretischen Kennzahlen, die im betrieblichen Kontext schwer anwendbar sind sondern auf der Entwicklung von möglichst einfachen und praxistauglichen Lösungen. Es lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

***Forschungsfrage 1: Welche Kosten- und Nutzenaspekte sowie deren Bedeutung können für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik identifiziert und validiert werden?***

***Forschungsfrage 2: Wie muss ein geeigneter Ordnungsrahmen zur Systematisierung der Nutzenaspekte aufgebaut sein, um zur Komplexitätsreduzierung bei der Kosten- und Nutzensauswahl beizutragen?***

***Forschungsfrage 3: Wie lassen sich die identifizierten Nutzenaspekte quantifizieren, monetär messbar machen und anwendergerecht sowie praxistauglich aufbereiten?***

Da ganzheitliche Industrie 4.0 Lösungen den gesamten Produktlebenszyklus im Sinne einer gesamtheitlichen Vernetzung gezielt mit Informationen versorgen, sind zwangsläufig unterschiedliche direkte wie indirekte Unternehmensbereiche betroffen (Eigner 2016, S. 144; Stark et al. 2016, S. 177). Die Befragung von 235 Unternehmensvertretern ergab, dass nur 24 Prozent der primären Bereiche und nur 20 Prozent der sekundären Bereiche in den Unternehmen in Bezug auf die Wertschöpfungskette digital durchdrungen sind.

Dem Finanzcontrolling kommt diesbezüglich die Aufgabe zu, den Transformationsprozess der einzelnen Unternehmensbereiche individuell zu begleiten (Obermaier und Grottko 2017, S. 121; Horvath et al. 2015, S. 43). Die Ausführungen legen nahe, dass eine individuelle Betreuung der unterschiedlichen Unternehmensbereiche durch eine jeweils angepasste Bewertungssystematik erfolgen kann. Ähnlich der Einteilung in primäre und sekundäre Bereiche, lassen sich Unternehmen in direkte und indirekte Bereiche untergliedern, die starke strukturelle, prozessuale und soziale Unterschiede aufweisen (Hillmer 2016, S. 66).

Auf Basis der Analyse von Industrie 4.0 Anwendungen aus direkten und indirekten Bereichen im Produktions- und Logistikumfeld soll nachgewiesen werden, ob eine individuelle oder allgemeingültige Kosten-/Nutzenanalyse zu entwickeln ist.

---

<sup>5</sup> Der ROI beschreibt die Rentabilität des Kapitaleinsatzes. Im Rahmen der Analyse von Kennzahlen errechnet sich der ROI üblicherweise aus dem Verhältnis des Gewinns zum gesamten investierten Kapital (Rolfes, 2020).

Daher wird in dieser Arbeit untersucht, ob Aspekte abweichender Kosten- und Nutzenstrukturen in direkten und indirekten Bereichen zu abweichenden Anforderungen an Kosten-/Nutzenanalysen für Industrie 4.0 Investitionen führen. Daraus ergibt sich für die vierte Forschungsfrage folgende Fragestellung:

***Forschungsfrage 4: Weisen Industrie 4.0 Lösungen in direkten und indirekten Unternehmensbereichen in Produktion und Logistik unterschiedliche Kosten-/Nutzenaspekte auf und stellen somit unterschiedliche Anforderungen an eine Kosten-/Nutzenanalyse?***

Häufig starten Industrie 4.0 Pilot-Projekte ohne klare Zielstellung und Wirtschaftlichkeitsbewertung, was der Vorgehensweise bei Forschungs- und Entwicklungsprojekten gleicht (Regelmann 2019, S. 233). Um jedoch zu vermeiden, dass Industrie 4.0 zum reinen Selbstzweck verkommt, wo Effizienz eine untergeordnete Rolle spielt (Regelmann 2019, S. 262), gilt es eine gesamtheitliche, rein quantitative Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen zu entwickeln, um diesem Problem entgegenzuwirken (Obermaier und Grottko 2017, S. 122; Günter et al. 2021, S. 1). Denn es gilt schließlich nicht das technisch mögliche, sondern das betriebswirtschaftlich sinnvolle umzusetzen (Fach 2021, S. 2). Dabei gilt es den operativen Anwendern durch das Controlling Leitplanken für die anstehende Bewertung zur Verfügung zu stellen (Regelmann 2019, S. 262; Horvath et al. 2015, S. 19). Im Rahmen dieser Arbeit soll diesbezüglich ein Vorgehensmodell zur schrittweisen ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik entwickelt werden, der auf die effiziente Anwendung im industriellen Umfeld optimiert ist und die in Kapitel 1.1 aus der Literatur zusammengetragenen Herausforderungen abdeckt. Dabei ergibt sich folgende Fragestellung:

***Forschungsfrage 5: Welche Bewertungsschritte muss eine ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik umfassen, um allen Anforderungen zu entsprechen?***

Da aufgrund der verwirrenden Begriffswelt zu Industrie 4.0 sowie der nie da gewesenen Häufigkeit ihrer Verwendung keine Einigkeit über die Ausprägung der Begriffsaspekte besteht, gilt es für seriöse wissenschaftliche Untersuchungen eine klare Definition sowie Abgrenzung des Untersuchungsbereichs vorzunehmen (Mertens et al. 2017, S. 37). Daher erfolgt die Beantwortung der Forschungsfragen mit dem Fokus der ex-ante Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Einzelinvestition von innerbetrieblichen Industrie 4.0 Projekten im Bereich Produktion und der innerbetrieblichen Logistik. Dieser Untersuchungsrahmen wird

gewählt, da bisherige Studienergebnisse zu den wirtschaftlichen Nutzenaspekten zu ca. 66 Prozent auf die Optimierung innerbetrieblicher Prozessabläufe hinweisen und hierfür nach wie vor geeignete Bewertungsmethodiken für Investitionen fehlen (Schuld und Pokorni 2016, S. 16). Dadurch sollen Kostenstrukturen signifikant reduziert werden, was 65 Prozent der Teilnehmer einer Deloitte Studie angaben (Meyer und Seiz 2019, S. 12). Zudem sind 75 Prozent der genannten quantitativen Einsparungen im innerbetrieblichen Bereich erzielt worden. Weiterhin gaben 85 Prozent der Befragten einer Stufen Studie an, dass der Schwerpunkt für Industrie 4.0 Lösungen aktuell das Produktionsumfeld darstellt, da dort aktuell die größten Potenziale zu erwarten sind (Goschy und Rohrbach 2017, S. 21; Haas und Negele 2018, S. 19; Kagermann et al. 2016, S. 6).

### 1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Die Wissenschaftstheorie hat die Systematisierung der Wissenschaften sowie die Festlegung von Methoden zum Ziel (Kirazli 2017, S. 5). Um die vorliegende Arbeit einordnen zu können, wird zuerst das übergeordnete Wissenschaftsspektrum betrachtet.

Nach Ulrich und Hill (1976) lässt sich die Wissenschaftstheorie in die Formalwissenschaft und die Realwissenschaft unterteilen. Formalwissenschaften wie bspw. die Mathematik, theoretische Informatik oder Logik widmen sich der Entwicklung von formal beschreibbaren Systemen. Die Realwissenschaften hingegen befassen sich mit der Beschreibung, Erklärung und Entwicklung von Systemen der empirisch wahrnehmbaren Realität. Hierbei unterteilen Ulrich und Hill (1976) die Realwissenschaften in die reinen Grundlagenwissenschaften und die angewandten Handlungswissenschaften, wobei die Wirtschaftswissenschaften eine zusätzliche Querschnittsdisziplin darstellen.

Reine Grundlagenwissenschaften wie bspw. die Chemie und Physik verschreiben sich dem Ziel, Theorien und Hypothesen über beobachtbare Ereignisse in der Realität zu formulieren und zu erklären. Die angewandten Handlungswissenschaften weisen einen klaren praktischen Bezug auf und umfassen Teildisziplinen wie bspw. die Betriebswirtschaftslehre oder die Psychologie. Dabei geht es um die Entwicklung und Erprobung von Entscheidungsmodellen oder -prozessen, um schlussendlich Handlungsempfehlungen für den praktischen Einsatz ableiten zu können (Ulrich und Hill 1976, S. 305).

Die vorliegende Arbeit lässt sich aufgrund der starken Praxisrelevanz der Problemstellung, dem primären Ziel der Entwicklung einer ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen, welcher die betriebliche Praxis unterstützen soll, sowie der konsequenten

Überprüfung der entwickelten Modelle anhand von Praxisanwendungen, im Bereich der angewandten Handlungswissenschaften verorten.

Damit werden alle drei wesentlichen Kriterien der anwendungsorientierten Handlungswissenschaften erfüllt (Ulrich 1981, S. 7):

- Konsequente Ausrichtung an praktischen Problemstellungen
- Untersuchung von Anwendungszusammenhängen
- Validierung der Modelle im praktischen Anwendungszusammenhang

Ulrich (1981) beschreibt weiterhin einen idealen Forschungsprozess für die angewandten Handlungswissenschaften in sieben Schritten. Abbildung 2 zeigt den Vergleich eines idealisierten Forschungsprozesses nach Ulrich (1981) mit der gewählten Vorgehensweise dieser Arbeit. Dabei wird erneut deutlich, dass die vorliegende Arbeit auf dem Forschungsprozess von Ulrich (1981) basiert und einen starken praktischen Bezug aufweist (Ulrich 1981, S. 20).

Um zu verhindern, dass unter dem Deckmantel der Praxistauglichkeit anwendungsorientierter Forschungswissenschaften theoriearme, wenig wissenschaftlich Forschungsvorhaben entstehen, werden beim vorliegenden Forschungsprozess empirische Grundlagen- und Formalwissenschaften mit regelmäßigen praktischen Eingangsgrößen und Validierungsschritten kombiniert (Ulrich 1995, S. 166 f.).

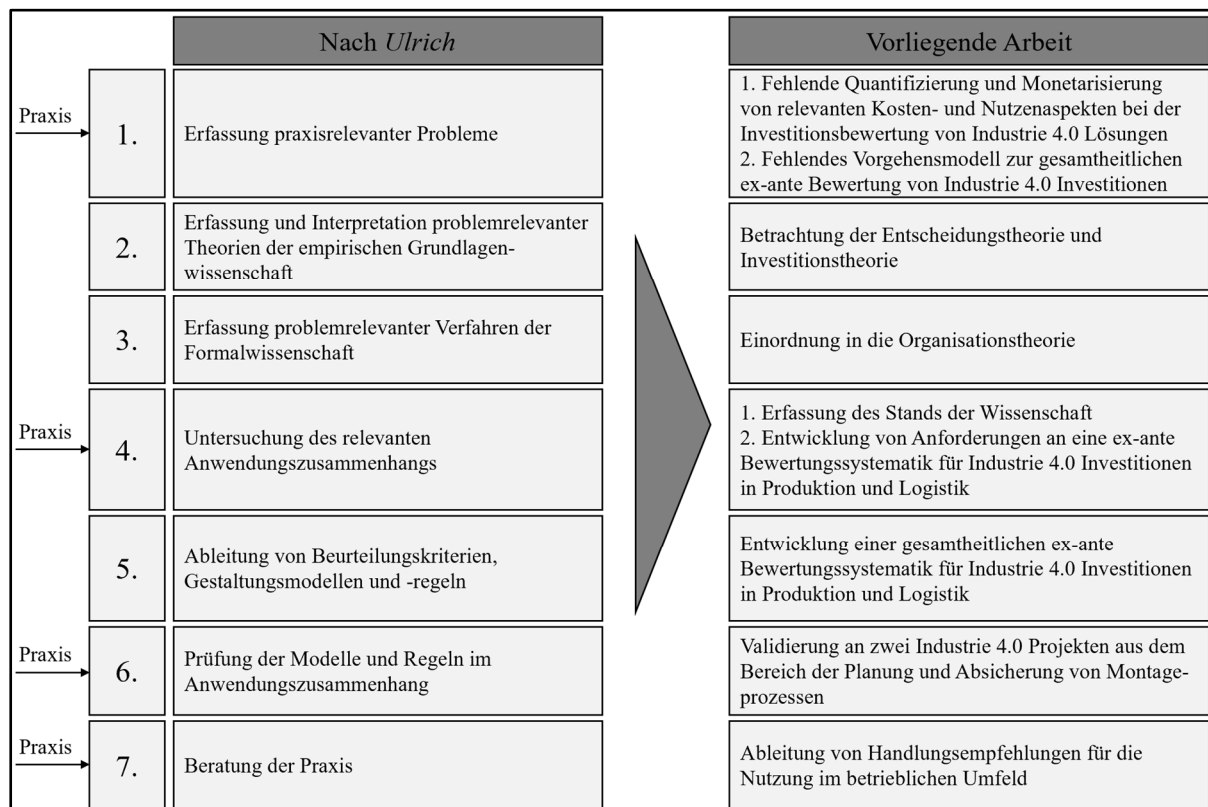


Abbildung 2: Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben logisch aufeinander aufbauende Kapitel zur Beantwortung der identifizierten Forschungsfragen zur Entwicklung einer ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik. Die Systematik der Arbeit ist in Abbildung 3 dargestellt.

**Kapitel 1** schafft den Rahmen und die Grundlagen des Leseverständnisses durch die Erläuterung der Problemstellung sowie der Zielstellung der vorliegenden Arbeit. Zudem umfasst die Einleitung eine Heranführung des Lesers an das Thema Industrie 4.0.

**Kapitel 2** vermittelt die notwendigen theoretischen Grundlagen in Bezug auf die Vorgehensweise zur Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen und umfasst eine Detailvorstellung Industrie 4.0bezogener Inhalte. Zudem werden Grundlagen zu direkten und indirekten Unternehmensbereichen, Entscheidungstheorien, Investitionsrechnungsverfahren und Forschungsmethoden gelegt. Die Eingrenzung des Untersuchungsbereichs schließt das Kapitel ab.

**Kapitel 3** beinhaltet neben der Entwicklung eines Anforderungskatalogs die Analyse der relevanten nationalen und internationalen ökonomischen Bewertungsmodelle für Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Projekte, die als Basis für die anschließende Ableitung der Forschungsfragen dient.

**Kapitel 4** beginnt mit der Vorstellung der Forschungssystematik sowie den ausgewählten Forschungsmethoden und wird mit der Ergebnisvorstellung der Experteninterviews und Focus Group sowie der Literaturanalyse zu den aktuellen Bewertungsansätzen fortgeführt. Auf dieser Basis können abschließend der Modellrahmen sowie die relevanten Bewertungsschritte einer ex-ante Bewertungssystematik hergeleitet und im Detail vorgestellt werden.

Um die Praxistauglichkeit des entwickelten Ansatzes nachzuweisen und Handlungsempfehlungen für die Nutzung ableiten zu können, findet eine Validierung an zwei praktischen Industrie 4.0 Projekten aus der Industrie in **Kapitel 5** statt.

Abschließend rundet **Kapitel 6** mit einer Zusammenfassung der Forschungsergebnisse, kritischen Würdigung und einem Ausblick bzgl. dem weiteren Forschungsbedarf, die Arbeit ab.

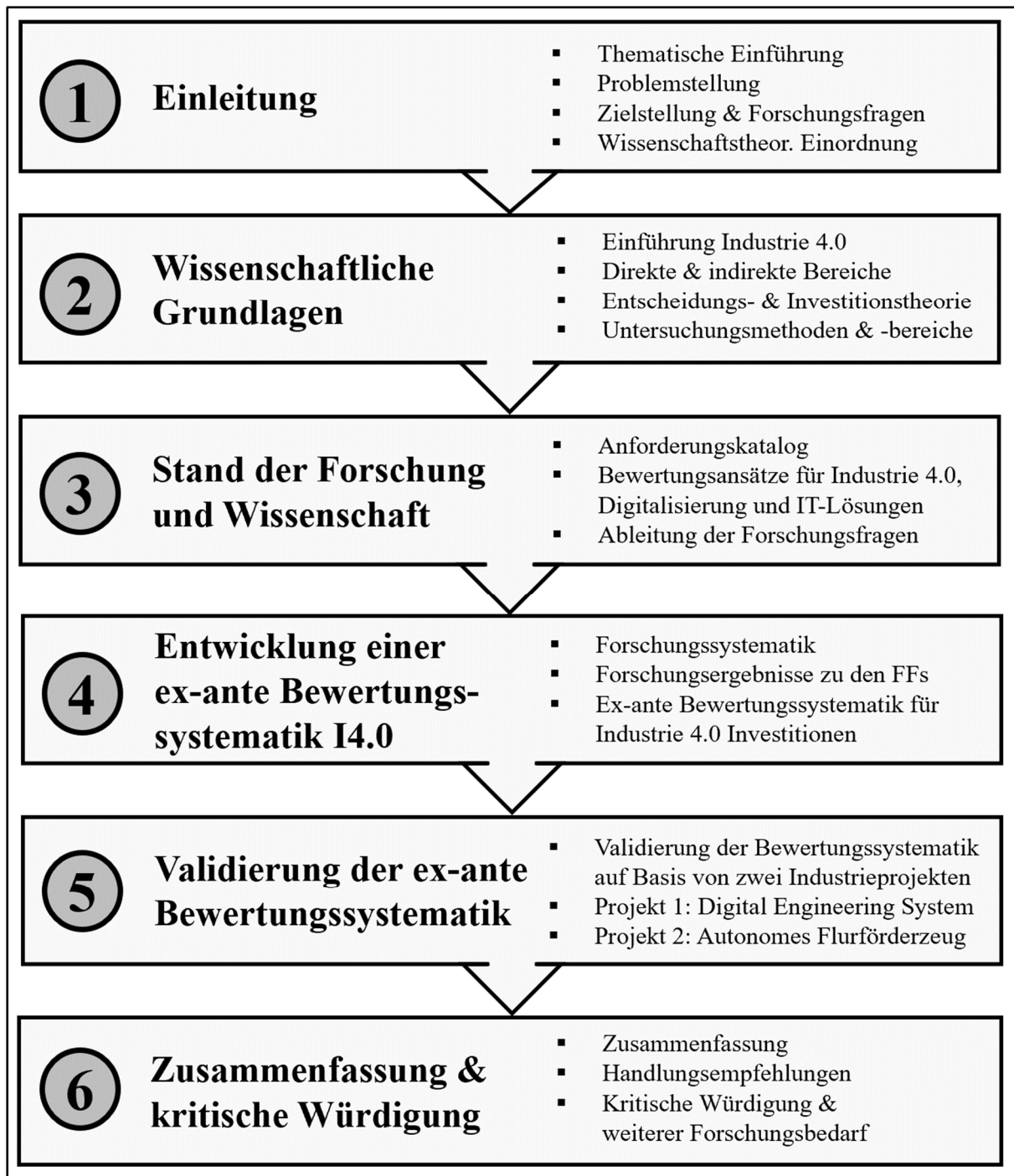


Abbildung 3: Aufbau der Arbeit

## 2 Wissenschaftliche Grundlagen zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen

Die Inhalte dieses Kapitels dienen der weiteren Hinführung zum Thema einer ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik und stellen durch die Einordnung der Forschungsschwerpunkte in übergeordnete Themengebiete eine weitere Eingrenzung des Untersuchungsfelds dar. Es erfolgt die Konkretisierung des Untersuchungsraums in Bezug auf Industrie 4.0 Lösungen und insbesondere deren Nutzenaspekte, die kriterielle Angrenzung direkten und indirekter Unternehmensbereiche sowie die Einordnung des Themas in die betriebswirtschaftlichen Disziplinen der Entscheidungstheorie und Investitionsrechnung. Zudem werden relevante Forschungsmethoden vorgestellt. Die Definition des Bezugsrahmens der Arbeit schließt das Kapitel ab.

### 2.1 Grundlagen der Industrie 4.0

Da das Forschungsfeld Industrie 4.0 vielfältige Möglichkeiten bietet, die seitens des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) bereits mit 550 Mio. Euro unterstützt werden (BMBF 2020), ist eine Eingrenzung des Forschungsraums für diese Arbeit unerlässlich, um den Fokus der Untersuchungen wahren und ein konkretes, praxistaugliches Ergebnis erarbeiten zu können. Neben einer ökonomischen Einordnung erfolgt eine literaturbasierte Begriffsdefinition bzw. Abgrenzung der Industrie 4.0 sowie eine detaillierte Beschreibung der Kriterien für Industrie 4.0 Anwendungsfälle und deren Nutzenaspekte.

#### 2.1.1 Entwicklungsstand und Potenziale der Industrie 4.0 in Deutschland

Seit 2011 wird das Schlagwort der Industrie 4.0 als Zeichen einer sich anbahnenden Revolution im industriellen Umfeld verwendet (Obermeier 2019, S. 3). Nahezu alle technisch geprägten Branchen weltweit können sich dieser Entwicklung nicht entziehen, da im Rahmen der Implementierung von Industrie 4.0 Lösungen vielfältige Optimierungen von innovativen Produkten, über effizientere Geschäftsprozesse bis hin zur Entstehung von disruptiven Geschäftsmodellen und Dienstleistungen zu erwarten sind (Bauer et al. 2014, S. 7). Durch die Vernetzung der einzelnen Unternehmen der Wertschöpfungskette können sogar Optimierungen in der gesamten Wertschöpfungskette und darüber hinaus erzielt werden (Becker et. al 2019, S. 183 f.). „Die erfolgreiche Gestaltung der vierten industriellen Revolution ist einer der wichtigsten Voraussetzungen für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts

Deutschlands“ (Schebek et al. 2017, S. 10). Der „Industrie 4.0 Smart Factory Index“ der Staufer AG zeigt deutliche jährliche Steigerungen, was die stärkere Durchdringung des industriellen Umfelds in Bezug auf Industrie 4.0 Technologien betrifft (Schlicke und Negele 2019).

Große Potenziale versprechen die Ergebnisse unterschiedlicher freier Studien zur Wirksamkeit von Industrie 4.0 wie bspw. der BITKOM, dem Fraunhofer IAO oder der Staufer AG sowie die Studienresultate staatlicher Institutionen wie bspw. dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Eine der ersten Quellen zu quantitativen Potenzialen der Industrie 4.0 stellt die 2014 veröffentlichte Studie der BITKOM und des Fraunhofer IAO mit dem Titel „Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland“ dar (Bauer et. al. 2014; Pfeiffer 2015, S. 2). Das Ergebnis der Studie prognostiziert ein zusätzliches Wertschöpfungspotenzial für unterschiedliche Sektoren in Deutschland bis 2025 in Höhe von 78,77 Milliarden Euro. Der größte Anteil davon fällt auf das verarbeitende Gewerbe mit 61,94 Milliarden Euro. Innerhalb des verarbeitenden Gewerbes wird der Maschinenbau mit 23,04 Milliarden Euro am stärksten von der Industrie 4.0 profitieren, gefolgt von der Automobilindustrie mit 14,80 Milliarden Euro (Bauer et al. 2014, S. 8). Dabei werden die volkswirtschaftlichen Effekte durch den Einsatz von „Embedded Systems“, „Smart Factory“, „Robuste Netzwerke“, „Cloud-Computing“ und „IT-Security“ erwartet (Bauer et al. 2014, S. 6 f.). Eine Übersicht zu den Potenzialen aller untersuchten Branchen ist in Abbildung 4 dargestellt.

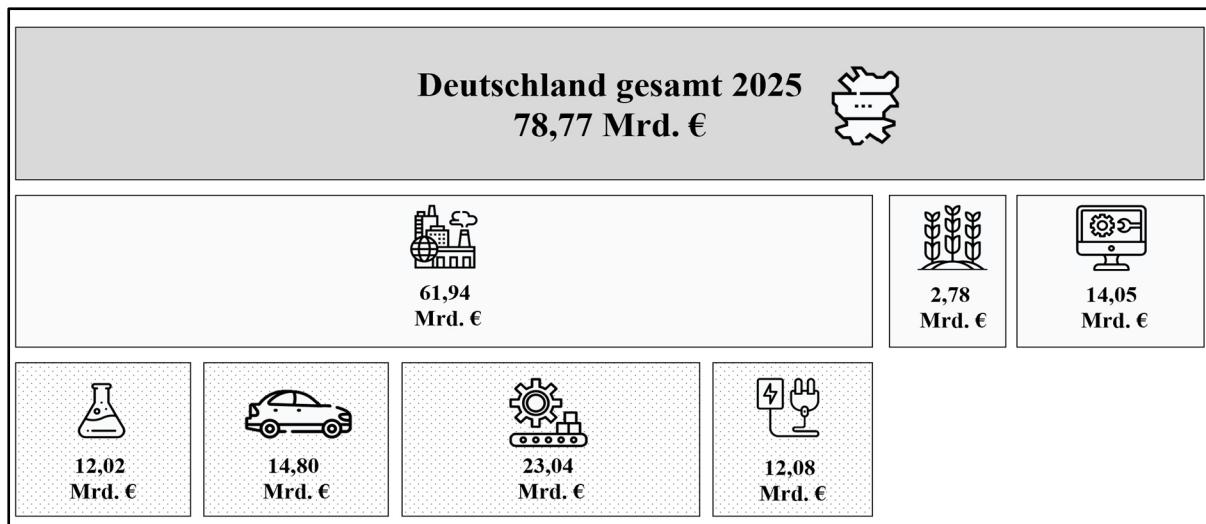


Abbildung 4: Potenziale der Industrie 4.0 für Deutschland bis 2025 nach BITKOM (Bauer et al. 2014, S. 8)

Eine Studie von Pricewaterhouse Coopers International (PwC) aus dem Jahr 2014 unter Unternehmen der Kommunikations-, Informations-, Elektro-, Prozess- und Automobilindustrie sowie des Maschinen- und Anlagenbaus kommt zu dem Ergebnis, dass deutsche Unternehmen bis 2020 jährlich 40 Milliarden Euro in die Umsetzung von Industrie 4.0 Anwendungen

investieren. Die Steigerung der Produktions- und Ressourceneffizienz wird mit durchschnittlich 3,3 Prozent pro Jahr gesehen. Zudem erwirtschaften digitale Produkte und Dienstleistungen einen zusätzlichen Nutzen von 30 Milliarden Euro jährlich (Koch und Geissbauer 2014, S. 6 ff.).

Doch wie weit sind wir auf dem Weg zur Industrie 4.0 in Deutschland wirklich? Diese Frage versucht bspw. die Staufen AG seit 2014 mit einer jährlichen Studie zu beantworten. Weiterhin veröffentlichte die Ingenics AG in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IAO im Jahr 2016 eine Studie zum Stand der Umsetzung der Industrie 4.0 in Deutschland. Die Kernergebnisse der Studien lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Grundsätzlich ist die Industrie 4.0 in der betrieblichen Realität angekommen (Schuld und Pokorni 2016, S. 5). 48 Prozent der befragten Unternehmen setzen Industrie 4.0 Lösungen bereits teilweise oder umfassend ein. Im Umkehrschluss haben 52 Prozent der Befragten keine oder nur ansatzweise Bestrebungen zur Transformation bzw. befinden sich aktuell in der Entwicklungs- und Erprobungsphase (Schlicke und Negele 2019, S. 8). Hierzu passt die Aussage, dass ca. 50 Prozent der Unternehmen die organisatorischen Voraussetzungen noch nicht erfüllt haben bzw. nicht einmal Pläne dafür entwickeln. Der Schwerpunktbereich für Industrie 4.0 Lösungen im Unternehmen ist mit 85 Prozent nach wie vor die Fertigung (Rohrbach und Albrecht 2017, S. 18).

Die Motive für die Umsetzung von Industrie 4.0 Lösungen reichen von der Steigerung operativer Effizienz mit 80 Prozent bis hin zu Umsatzsteigerungen durch neue Geschäftsprozesse mit 39 Prozent (Haas und Negele 2018, S. 19). Der größte Nutzen besteht in einer Durchlaufzeitreduzierung von durchschnittlich 14,5 Prozent, gefolgt von einer Steigerung der Prozessqualität von 13 Prozent, einer Kostensenkung von 10 Prozent und einer Umsatzsteigerung von 7,9 Prozent (Schuld und Pokorni 2016, S. 15). Gleichzeitig erwarten 78 Prozent der Befragten eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit ihres Unternehmens (Rohrbach und Albrecht 2017, S. 25).

Es konnte aufgezeigt werden, dass die Umsetzung der Industrie 4.0 weitreichende Potenziale in deutschen Unternehmen heben kann. Zugleich muss festgehalten werden, dass die Entwicklung noch am Anfang steht und große Anstrengungen der Unternehmen notwendig sind, um eine nachhaltige Industrie 4.0 Infrastruktur aufzubauen (Schmelting 2019, S. 484). Hierbei nehmen deutsche Großkonzerne und Mittelständler eine Schlüsselrolle weltweit ein und können deshalb mit einer hohen Reputation aufwarten (Kagermann et al. 2016, S. 9).

### 2.1.2 Definition Industrie 4.0

Die erste Erwähnung findet der Begriff Industrie 4.0 im weitesten Sinne als „Integrated Industry“ oder „Advanced Manufacturing“ bereits 2006 im Rahmen des ersten nationalen IT-Gipfels am Hasso-Platter-Institut (Becker und Pflaum 2019, S. 4). Erst 2011 definierte die „Deutsche Akademie der Technikwissenschaften“ (acatech) erstmals den Begriff Industrie 4.0 mit dem allumfassenden aber wenig präzisen Satz „digitale Vernetzung der Industrie“ sowie „intelligente Fabriken und vernetzte Produktionen“, ohne eine Einordnung oder Abgrenzung vorzunehmen (Winter 2015). Ausgehend von der 2013 veröffentlichten acatech Studie zu den Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, wird das Internet der Dinge oder auch „Industrial Internet“ als globale Vernetzungsinitiative der US-amerikanischen Firma General Electrics beschrieben, bei der die Produktion jedoch nur einen von vielen Bereichen darstellt (Kagermann et al. 2013, S. 76). Das Internet der Dinge (englisch: Internet of Things, IoT) schafft die Möglichkeit, physische Produkte und digitale Services mittels CPS zu hybriden Lösungen zu verschmelzen (Fleisch et al. 2017, S. 1). CPS werden konkret beschrieben als: „Diese umfassen in der Produktion intelligente Maschinen, Lagersysteme und Betriebsmittel, die eigenständig Informationen austauschen, Aktionen auslösen und sich gegenseitig selbstständig steuern (Kagermann et al. 2013, S. 5). CPS decken dabei jedoch nur die direkt wertschöpfenden Unternehmensbereiche und -funktionen ab. Da in den Definitionen zu Industrie 4.0 häufig Formulierungen wie „alle Phasen des Lebenszyklus des Produktes eingeschlossen“ (BMW 2018; BMBF 2018), „alle an der Wertschöpfung beteiligten Akteure“ (Obermaier und Grottko 2017, S. 118) oder „new level of value chain organization and management across the lifecycle of products“ (Shafiq et al. 2015, S. 1148) zu finden sind, müssen indirekt wertschöpfende, zumeist planende Bereiche auch betrachtet werden. Das Gegenstück zu den CPS im direkten Bereich bilden „Digital Engineering Systeme“ (DES) für den indirekten Bereich, die den „Systems Engineering“<sup>6</sup> (SE) Ansatz unterstützen (Stark et al. 2011, S. 1 f.). DES sind nach Hutchison et al. (2021) definiert als: „an integrated digital approach that uses authoritative sources of systems’ data and models as a continuum across disciplines to support lifecycle activities from concept through disposal. A DE ecosystem is an interconnected infrastructure, environment, and methodology that enables the exchange of digital artifacts from an authoritative source of truth.“ (Hutchison et al. 2021, S. 9) Da in produzierenden Unternehmen heute nahezu alle planungs- und produktionsbezogenen Daten

---

<sup>6</sup> Systems Engineering beschreibt Vorgehensweisen und Methoden, um die Entwicklung komplexer Systeme zu strukturieren und somit die gezielte Synchronisation aller relevanten Fachdisziplinen sicherzustellen. (Fraunhofer IPK, 2023)

durch DES wie bspw. PLM- oder „Computer Added Design (CAD) Systeme“ verwaltet werden (Janik und Weber 2016, S. 1), müssen diese zwangsläufig als Planungs- und Steuerungsinstrument von gesamtheitlichen industriellen Abläufen angesehen werden (Eigner und Stelzer 2009, S. 2 f.). Nach Shafiq et al. (2015) sind in der Industrie 4.0 die planerischen und physischen Dimensionen sogar zwangsläufig koexistent und zeitlich synchronisiert (Shafiq et al. 2015, S. 1154). Elkmann et al. (2015) beschreiben die Industrie 4.0 ebenfalls als Zusammenspiel aus CPS und DES in Form von technischer, semantischer und organisatorischer Interoperabilität, die gleichermaßen umgesetzt werden müssen, um die Vision Industrie 4.0 Realität werden zu lassen (Elkmann et al. 2015, S. 37 f.).

Im Rahmen des 2017 veröffentlichten „Industry 4.0 Maturity Index“ der acatech werden Integrationsstufen der Industrie 4.0 in Form eines Reifegradmodells genannt. Hierbei findet eine Unterteilung in Aspekte der Digitalisierung und der Industrie 4.0 statt. Die Stufen eins „Computerisierung“ und zwei „Vernetzung“ werden der Digitalisierung zugeordnet und die Stufen drei „Sichtbarkeit“, vier „Transparenz“, fünf „Vorausschauende Planung“ und sechs „Anpassungsfähigkeit bzw. Selbstoptimierung“ sind der Industrie 4.0 zugeordnet (Wahlster et al. 2017, S. 16). Die acatech Studie besagt also, dass die Digitalisierung lediglich eine Vorstufe der Industrie 4.0 ist und als Voraussetzung für die Umsetzung der Industrie 4.0 gesehen werden muss. Das Internet der Dinge findet in der Studie als notwendige Voraussetzung für die gesamtheitliche Vernetzung aller Elemente und somit für die Industrie 4.0 und Digitalisierung nur am Rande Erwähnung (Wahlster et al. 2017, S. 17).

Ein wieder anderes Beispiel für den Versuch einer Definition von Industrie 4.0 nehmen Andelfinger und Hänisch (2017) in ihrem Buch „Industrie 4.0: Wie CPS die Arbeitswelt verändern“ vor. Die Frage nach dem „neuen“ in der Industrie 4.0 wird ganz pragmatisch beantwortet: „Irgendwie wohl das Zusammenspiel all dieser Technologien [aus den vorangegangenen industriellen Revolutionen] in weniger zentralisierter Weise als bisher“ (Hänisch 2017, S. 9). Auch Andelfinger und Hänisch nehmen keine Abgrenzung vor, schreiben aber häufiger von Industrie 4.0 und Digitalisierung in einem Zusammenhang, was vermuten lässt, dass die Begriffe äquivalent zu verstehen sind. Im Gegensatz zu anderen Beiträgen sehen die Autoren die Industrie 4.0 als den zentralen Begriff an, dem das Internet der Dinge unterordnet ist. Hierzu wird ausgeführt, dass „Industrie 4.0 [...] natürlich mehr als IoT + Big Data, [...]“ ist (Hänisch 2017, S. 16).

Eine wiederum komplett andere Sichtweise auf die Abgrenzung zwischen Industrie 4.0, Digitalisierung, Internet der Dinge, DES und CPS bieten Obermaier und Grottko (2017). Industrie 4.0 wird dabei als eine „[...] Form der industriellen Wertschöpfung [...] die durch

Digitalisierung, Automatisierung und Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Akteure gekennzeichnet ist [...]“ (Obermaier und Grottko 2017, S. 118). Demnach betrachteten Obermaier und Grottko die Digitalisierung lediglich als Teilbereich der Industrie 4.0, der nur in Kombination mit den beiden anderen Bereichen Automatisierung und Vernetzung die volle Wirkung entfalten kann und sowohl direkte als auch indirekte Unternehmensbereiche umfasst. Das Internet der Dinge wird als das zentrale CPS und DES dargestellt, welches die allgemeine Voraussetzung für die Industrie 4.0 und somit auch für die Digitalisierung darstellt (Obermaier und Grottko 2017, S. 119). Demzufolge beschreiben die Autoren eine klare Hierarchie und Abhängigkeiten zwischen den fünf Begriffen.

Bracht et.al. (2018) schreiben in dem Buch „Digitale Fabrik“, dass Industrie 4.0 lediglich ein Metabegriff<sup>7</sup> sei (Bracht et. al 2018, S. 14), welcher somit weder klar definierbar noch differenzierbar ist, da die Industrie 4.0 sowohl Inhalt als auch Gegenstand der Betrachtung sein kann (Becker et al. 2003, S. 82). Weiterhin beschreiben die drei Professoren die Industrie 4.0 als die „Weiterentwicklung der Produktions- und Wertschöpfungssysteme durch die Vernetzung der realen und digitalen Welt“ (Bracht et al. 2018, S. 14). Daraus lässt sich ableiten, dass die Digitalisierung nur einen Teilbereich der Industrie 4.0 darstellt. Für die Vernetzung sorgen sich selbst steuernde CPS, die jedoch in Form von eingebetteten Systemen<sup>8</sup> existieren müssen. Abschließend wird die Industrie 4.0 nochmals als übergeordnete Ebene beschrieben, welche die CPS sowohl horizontal als auch vertikal vernetzen soll (Becker et al. 2003, S. 14 f.). Das Internet der Dinge und DES werden in diesem Beitrag nicht erwähnt.

Seiter et.al (2017) vertreten die Ansicht, dass Digitalisierung und Vernetzung die Industrie 4.0 kennzeichnen und somit Teilelemente dieser sind (Seiter et al. 2017, S. VI). Bei der Industrie 4.0 steht die gesamte inner- und zwischenbetriebliche Informationsverarbeitung in Fertigung und Logistik einschließlich Dienstleistungen sowie deren übergreifender Vernetzung im Fokus, was darauf schließen lässt, dass sowohl direkte als auch indirekte Unternehmensbereiche ein Bestandteil sind (Mertens et al. 2017, S. 35 ff). Weiterhin wird die Industrie 4.0 als Teilbereich des Internets der Dinge beschrieben (Seiter et al. 2017, S. 4). Die Abgrenzung beruht auf der Vision des IoT, in welcher „alle Gegenstände und Lokationen der realen Welt mit Sensorik ausgestattet und Teil des Internets werden“ (Seiter et al. 2017, S. 3), wobei sich Industrie 4.0 jedoch lediglich auf das industrielle Umfeld bezieht. CPS werden in dieser Quelle sehr nah an die Industrie 4.0 gekoppelt, da CPS „Verknüpfung von realen Objekten und Prozessen mit

---

<sup>7</sup> Metabegriff ist ein Wort, welches zur Verallgemeinerung dient und im Sinne des Modellbegriffs sowohl Gegenstand als auch Inhalt eine Betrachtung sein kann (Becker et al. 2003, S. 82).

<sup>8</sup> Eingebettete Systeme oder engl. „Embedded Systems“ sind IT-Systeme, die Hard- und Softwarekomponenten kombinieren, um technische Prozesse zu steuern und zu überwachen (Wilhelm Büchner Hochschule 2020).

informationsverarbeitenden Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze“ umfasst (Geisberger et al. 2012, S. 7). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich in der wissenschaftlichen Literatur bisher keine allgemeingültigen Definitionen sowie Abgrenzungen zwischen den Begrifflichkeiten Industrie 4.0, Internet der Dinge, Digitalisierung, CPS und DES finden lassen. Mertens et al. (2017) fassen diesen Umstand in dem Buch „Digitalisierung und Industrie 4.0 – eine Relativierung“ folgendermaßen zusammen: „Es bleibt abzuwarten, ob sich ein solider Begriffsapparat ausprägt, sei es von selbst oder durch Fachautoritäten gesteuert. Sonst wäre seriöse Arbeit in Wissenschaft und Praxis sehr erschwert“ (Mertens et al. 2017, S. 35). Für diese Dissertation ist es jedoch notwendig, eine Abgrenzung der Begrifflichkeiten vorzunehmen, um die Industrie 4.0 Anwendungen als zentrale Untersuchungselemente in den Gesamtkontext der Begrifflichkeiten einzuordnen. Hierzu wird auf die analysierten Definitionen und Abgrenzungen zurückgegriffen und ein hierarchisches Modell entwickelt, welches eine Abgrenzung zwischen den Begriffen zulässt und in Abbildung 5 dargestellt ist.

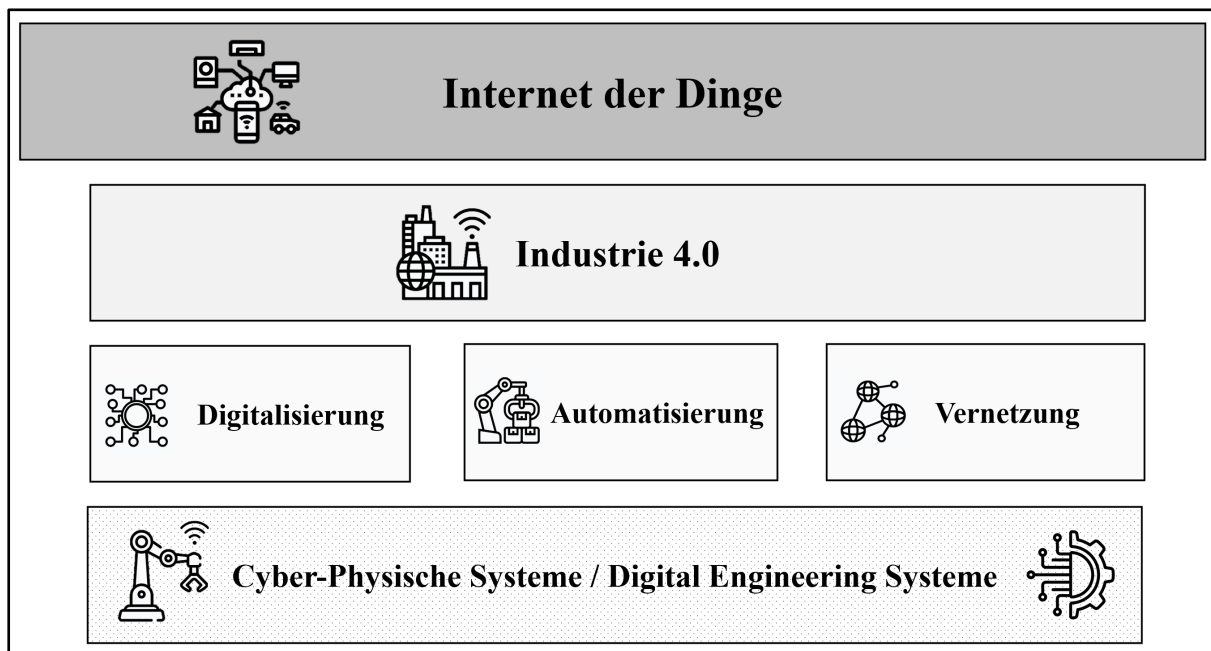


Abbildung 5: Abgrenzung Internet der Dinge, Industrie 4.0, Digitalisierung, Cyber-Physische Systeme und Digital Engineering Systeme

Das übergeordnete Element in diesem Modell stellt das Internet der Dinge dar. Das IoT ist eine Umgebung, in der alle Gegenstände der realen Welt mit dem Internet verbunden sind. Einen Teilbereich des Internets der Dinge stellt die Industrie 4.0 durch die Vernetzung der gesamten inner- und zwischenbetrieblichen Informationsverarbeitung im industriellen Umfeld dar. Die Digitalisierung ist neben der Automatisierung und Vernetzung lediglich ein Teilelement der Industrie 4.0. Nur alle drei Elemente in Kombination können die volle Wirkung der Industrie

4.0 erzeugen. CPS bilden die niedrigste bzw. operative Ebene des Modells durch die Verknüpfung von physischen und informationsverarbeitenden Objekten, bezogen auf einen konkreten Anwendungsfall in direkten Unternehmensbereichen. Analog dazu ermöglichen DES durch digitale Werkzeuge unterstützte Entwicklungs- und Planungstätigkeiten in indirekten Unternehmensbereichen im gesamten Lebenszyklus von Produkt, Fabrik und Prozess (Volkman et al. 2014, S. 14; Bing et al. 2019, S. 373 f.; Hutchison et al. 2021, S. 9).

### 2.1.3 Kriterien für Industrie 4.0 Lösungen

Wie die im vorigen Kapitel aufgezeigte Uneinigkeit in Bezug auf die Definition der einzelnen Begriffe sowie der Abgrenzung zueinander existiert auch keine allgemeingültige Definition darüber, was genau ein Industrie 4.0 Projekt ausmacht bzw. was die Kriterien dafür sind (Ustundag und Cevikcan 2018, S. 5). Auch hier existiert eine Vielzahl an Veröffentlichungen mit teilweise stark abweichenden Kriterien und Definitionen. Da Industrie 4.0 als Kumulation der vorangegangenen Industriellen Revolutionen zu betrachten ist (Horvath et al. 2018, S. 420), stellt sich die Frage, welche Kriterien ausschlaggebend für die Beschreibung eines Industrie 4.0 Projektes sind und welche nicht. Da diese Arbeit auf der Analyse von Industrie 4.0 Anwendungen im Unternehmensumfeld aufbaut, muss an dieser Stelle definiert werden, wodurch sich ein Industrie 4.0 Projekt auszeichnet, um geeignete Praxisprojekte auswählen zu können. Die Notwendigkeit zur Definition eines Industrie 4.0 Projektes ist zudem der Tatsache geschuldet, dass die Unternehmen häufig keine klare Trennung zwischen Industrie 3.0 und 4.0 sowie Digitalisierungs- und IT-Projekten aufgrund der fehlenden Definition von Industrie 4.0 vornehmen (Regelmann 2019, S. 162). Demzufolge stellt der in diesem Kapitel entwickelte Kriterienkatalog eine notwendige Voraussetzung für die Auswahl von geeigneten Industrie 4.0 Use Cases<sup>9</sup> für die Analyse im Unternehmensumfeld sowie der darauf basierenden Beantwortung der Forschungsfragen 1, 3 und 4 dar.

Die Vorgehensweise bei der Kriterienermittlung umfasst eine qualitative Literaturanalyse. Mittels Google Scholar und Google Web Search wurden mit den Schlagwörtern „Industrie 4.0 Lösungen“, „Anforderungen“ und „Kriterien“ insgesamt achtzehn deutsch und englisch sprachige Beiträge ausgewählt. Der Focus lag darauf, die Kriterien für Industrie 4.0 Anwendungen des jeweiligen Autors zu identifizieren und in einem übergreifenden Kriterienkatalog zusammenzufassen. Es wurde darauf geachtet, dass Literaturbeiträge aus

---

<sup>9</sup> Use Cases sind Anwendungsfälle, bei denen ein „Nutzer als Akteur mit dem System in Interaktion tritt, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Ein einzelner Use Case wird normalerweise so benannt, wie das Ziel aus Sicht des Akteurs heißt und ist dabei eine Folge von Aktionen, die in einer festgelegten Reihenfolge ablaufen.“ (microTOOL 2018).

unterschiedlichen wissenschaftlichen Quellen wie Fachbüchern, Dissertationen, Fachzeitschriften sowie Beiträgen von praxisnahen Forschungseinrichtungen bzw. Verbänden und öffentlichen, teilweise staatlichen Stellen mit technischen, organisatorischen und prozessualen Betrachtungswinkeln auf Industrie 4.0 Lösungen in die Untersuchung einzubeziehen, um ein möglichst breites Spektrum abzudecken.

Einen konkreten Leitfaden zur Frage „Welche Kriterien müssen Industrie 4.0 Produkt erfüllen?“ bietet die „Plattform Industrie 4.0“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aus dem Jahr 2018. Der Leitfaden beinhaltet sieben Kriterien, die eine Industrie 4.0 Anwendung erfüllen muss (BMWi 2018, S. 10 f.):

1. Identifikation: Übergreifende Identifikation des Assets, elektronisch lesbar
2. Kommunikation: Produkt ist netzwerkfähig und kann Daten übertragen
3. Semantik: standardisiertes Datenformat und -struktur
4. Virtuelle Beschreibung: Virtuelles Abbild über Lebenszyklus
5. Dienste und Zustände: Allgemeine Schnittstellen als Basis für Kommunikation
6. Standardisierung: einheitlicher Entwicklungsstandard von Soft- und Hardware
7. Security: Mindestanforderungen an IT-Security

Da diese sieben Kriterien von einer aus Wissenschaftlern und Praktikern bestehenden interdisziplinären Arbeitsgruppe des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) und der Plattform Industrie 4.0 erarbeitet wurden und sowohl auf Produkte, Maschinen, Systeme, Hardware und Software angewendet werden können (BMWi 2018, S. 1) dienen sie als Basis für die weitere Untersuchung.

Industrie 4.0 Use Cases zeichnen sich in vielerlei Hinsicht durch Standardisierungen aus (Valenta 2017, S. 379 ff.). In erster Linie bezieht sich die IT-Standardisierung auf Schnittstellen, Datenformate und Austauschprotokolle zur Erzeugung von Prozesstransparenz (Feldmann und Vogel-Heuser 2017, S. 325 ff.). Dadurch sollen die Datenstrukturen, welche die Basis für Industrie 4.0 Anwendungen darstellen so effizient wie möglich gestaltet werden (Regelmann 2019, S. 245). Das übergeordnete Ziel hierbei ist in der Erzeugung von nachhaltiger Datenkonsistenz durch die durchgängige Vernetzung (Kirsch 2017, S. 2) und Verwendung der erzeugten Stamm-<sup>10</sup> und Bewegungsdaten<sup>11</sup> auf Basis der gesetzten Kommunikationsstandards zu sehen (Papenform et al. 2015, S. 200 f.).

---

<sup>10</sup> Stammdaten sind statische, zeitlich beständige Datensätze (Ennemann und Rückert 2016, S. 25).

<sup>11</sup> Bewegungsdaten werden kurz- bis mittelfristig gehalten, sie haben ein Gültigkeitsdatum und sie sind zeitlich variant, ändern sich also häufig (Ennemann und Rückert 2016, S. 25).

Die durchgängige Verwendung aller im Prozess erzeugten Daten ermöglicht die Verwendung von virtuellen Absicherungsmaßnahmen wie bspw. Verbausimulationen an virtuellen Fahrzeugmodellen, lange bevor diese physisch hergestellt sind (Wegener 2017, S. 396). Die hierzu benötigten Daten werden bei Industrie 4.0 Anwendungen vollautomatisch durch Sensorsysteme (Hierzer 2017, S. 43) erzeugt und manipuliert, sodass stets alle Produkt- oder Prozessinformationen aktuell gehalten werden können (Obermaier und Grottke 2017, S. 118). Dies ist jedoch meist nur in direkten Anwendungsgebieten gegeben. Die Unterstützung bei der Datenerfassung in indirekten, bspw. planenden Unternehmensbereichen erfolgt durch strukturierte Eingabemasken mit Pflicht- und Optionsfeldern sowie einem nachhaltigen Wissens- und Erfahrungsmanagement, welches dem Nutzer in Form einer Assistenzfunktion relevante Eingabedaten zur Verfügung stellt oder Vorschläge zu Eingabemöglichkeiten anbietet (Ustundag und Cevikcan 2018, S. 5 f).

Die durchgängige Verwendung aller Daten, optimiert durch „Algorithmen gestützte Datenverarbeitung“, „Machine Learning“<sup>12</sup> oder „Künstlicher Intelligenz“<sup>13</sup> (KI), ermöglicht zudem den Aufbau von echtzeitfähigen Assistenzsystemen, die entweder voll- oder teilautonom Entscheidungen treffen oder vorbereiten (Obermaier und Grottke 2017, S. 118; Mosler 2017, S. 495 ff.; Kagermann et al. 2016, S. 5). Dadurch führen Industrie 4.0 Anwendungen zu einer verbesserten Reaktionsfähigkeit und erhöhten Flexibilität bei Veränderungen in Prozess und Umfeld (Lasi et. al 2014, S. 262; Ott 2017, S. V; Deuse et al. 2018 b, S. 51).

Grundvoraussetzung für eine umfassende Vernetzung und Prozessflexibilität ist jedoch die Datenverfügbarkeit. Diesbezüglich verfügen Industrie 4.0 Anwendungen über zentrale Datenhaltungsplattformen wie bspw. einen „Data Lake“<sup>14</sup> oder binden direkt an diese an. „Cloud-Computing“<sup>15</sup> kann hier die Datenverfügbarkeit zentralisiert für alle Prozesspartner sicherstellen (Krüger et al. 2017, S. 89 ff.; Kagermann et al. 2016, S. 5).

Neben der Standardisierung von Schnittstellen, Kommunikationswegen und Architekturen zeichnet Industrie 4.0 Lösungen die Standardisierung von Geschäftsprozessabläufen (Kagermann et al. 2016, S. 7) bspw. in Form von Workflows aus. Der workflowbasierte,

---

<sup>12</sup> Machine Learning ist ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz und beinhaltet das automatische Lösen von Problemen durch das Erkennen von Mustern in vorhanden Daten durch IT-Systeme (Luber und Litzel 2016).

<sup>13</sup> Künstliche Intelligenz ist ein Teilgebiet der Informatik, welches sich mit der Erforschung von Mechanismen des intelligenten menschlichen Verhaltens befasst. Dieses geschieht durch Simulation mit Hilfe künstlicher Artefakte, gewöhnlich mit Computerprogrammen auf einer Rechenmaschine (Wichert 2000).

<sup>14</sup> Data Lakes sind Plattformen, die Daten in ihrer unbearbeiteten, originalen Form direkt von den Datenquellen mit keiner oder wenig Bereinigung, Standardisierung, Ummodellierung oder Veränderung aufnehmen (Gluchowski 2018).

<sup>15</sup> Cloud-Computing beschreibt ein Konzept, um Anwendungsprogramme nicht auf lokalen Endgeräten sondern über das Internet zur Verfügung zu stellen (Leymann und Fehling 2018).

standardisierte Prozessablauf ermöglicht die Synchronisierung und horizontale sowie vertikale Integration unterschiedlicher Prozessbeteiligter über den gesamten Wertschöpfungsprozess hinweg (Diemer 2017, S. 187 f.; Kirsch 2017, S. 1; Kagermann et al. 2016, S. 5 f.).

Industrie 4.0 Anwendungen werden nicht aus dem reinen Selbstzweck der Weiterentwicklung einer Technologie oder einem Forschungsaspekt heraus umgesetzt (Regelmann 2019, S. 262). Vielmehr ist das Ziel der Industrie 4.0 mit all seinen Elementen, Aspekten und Bereichen die Steigerung der Produktivität im betrieblichen Umfeld durch die Verbesserung der Effizienz der vorhandenen Ressourcen (Trompisch 2017, S. 370 f.; Schuh et al. 2018, S. 6 f.; Kagermann et al. 2016, S. 5). Hierbei handelt es sich bspw. um die Bereiche Energie, Material, Emission und Personaleinsatz (Schebek et al. 2017, S. 267).

Das vom BMWi als siebtes Kriterium genannte „Mindestanforderungen an die IT Security“ konnte bei der Literaturrecherche nicht als Hauptkriterium bestätigt werden. Vielmehr stellen Industrie 4.0 Anwendungen neue Anforderungen an die IT-Sicherheit (Wang et al. 2017, S. 203), die es bei der Umsetzung zu berücksichtigen gilt. Von der acatech wird die IT-Sicherheit als erfolgskritischer Faktor für Industrie 4.0 beschrieben und somit zur Grundvoraussetzung erhoben (Kagermann et al. 2013, S. 50).

Die aus der Literatur zusammengestellten Kriterien für Industrie 4.0 Projekte lassen sich in Form von zwölf übergreifenden Kriterien zusammenfassen. Allerdings ist es bei der Vielzahl an Kriterien unwahrscheinlich, dass eine Industrie 4.0 Lösung alle davon vollumfänglich erfüllt. Zumal nicht alle Literaturquellen jedes Kriterium gleichermaßen erwähnen. Hierzu gibt Tabelle 1 einen Überblick, welches Kriterium in den einzelnen Literaturbeiträgen Erwähnung findet. Dadurch lassen sich die Überschneidungen herausarbeiten, die in allen Literaturbeiträgen gleichermaßen vorhanden sind.

Die Analyse zeigt, dass fünf Kriterien übergreifend über alle Quellen als Kriterium für Industrie 4.0 Lösungen definiert werden können:

1. Vernetzung von Systemen
2. Systemunterstützte Datenerfassung
3. Algorithmengestützte Datenverarbeitung
4. Reaktionsfähigkeit und Flexibilität bei Prozessveränderungen
5. Ressourceneffizienz

Diese fünf Kriterien dienen der Auswahl von Praxisprojekten zur Beantwortung der Forschungsfragen 1, 3 und 4 im weiteren Verlauf der Arbeit.

Literaturquellen			Kriterien für Industrie 4.0 Lösungen											
			1. Standardisierung von Prozessen, Daten und Schnittstellen	2. Datenkonsistenz und -durchgängigkeit durch die Vernetzung von Systemen	3. Unterstützung bei der Datenerfassung (bspw. sensorgestützt)	4. Erhöhung der Reaktionsfähigkeit und Flexibilität bei Prozessveränderungen	5. Algorithmengestützte Datenverarbeitung	6. Generierung neuer Erkenntnisse aus Daten (bspw. ML oder KI)	7. Verbessertes Wissens-, Erfahrungs- und Informationsmanagement	8. Teil- oder vollautomatische Entscheidungs-vorbereitung oder -findung	9. Vertikale oder horizontale Systemintegration	10. Erhöhung der Ressourceneffizienz	11. Erhöhung der Prozesstransparenz	12. Möglichkeit zur virtuellen Prozessabsicherung
BMW (2018)	Minist.beitrag	tech.	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	●
Vogel-Heuser et al. (2017)	Fachbuch	div.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Regelmann (2019)	Dissertation	orga.	○	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	○
Kirsch (2017)	Beratungsbeitrag	proz.	○	●	●	○	●	○	○	○	●	●	○	○
Papenform et al. (2015)	Fachzeitschrift	tech.	○	●	○	●	●	○	○	○	●	●	○	○
Hierzer (2017)	Fachbuch	proz.	○	●	●	○	●	●	○	○	○	●	●	○
Obermeier & Grottko (2017)	Fachbuch	proz.	○	●	●	○	●	○	○	○	●	●	○	○
Ustundaq & Cevikcan (2018)	Fachbuch	div.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Mosler (2017)	Fachbuch	tech.	●	●	○	○	○	○	○	○	●	●	●	○
Kagermann et al. (2016)	Akademiebeitrag	orga.	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	○
Lasi et al. (2014)	Fachzeitschrift	tech.	○	●	●	●	●	○	○	○	○	●	○	○
Anderl et al. (2017)	Fachbuch	orga.	○	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○	●
Reinhart et al. (2017)	Fachbuch	div.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Trompisch (2017)	Fachzeitschrift	orga.	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Schuh et al. (2018)	Institutsbeitrag	proz.	○	●	●	●	○	○	○	○	●	●	●	○
Wang et al. (2017)	Konferenzbeitrag	tech.	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Schebek et al. (2017)	Verbandsbeitrag	proz.	○	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●
Kagermann et al. (2013)	Akademiebeitrag	proz.	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●

● = vorhanden      ○ = teilweise vorhanden      ○ = nicht vorhanden

Tabelle 1: Kriterienübersicht für Industrie 4.0 Lösungen

### 2.1.4 Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen

Industrie 4.0 Lösungen weisen gemäß den unterschiedlichen Fachliteraturbeiträgen vielfältige Nutzenaspekte auf (Anderl et al. 2016, S. 132; Spöttl und Windelband 2019, S. 14), die je nach Quelle stark abweichend sein können und nicht standardisiert definiert und beschrieben sind. Es wird eine qualitative Literaturrecherche genutzt, die zum Ziel hat, die relevanten Nutzenaspekte für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik zu identifizieren, sodass diese als Befragungsgrundlage für Experteninterviews verwendet werden können. Die Experteninterviews sollen insbesondere zur Beantwortung der Forschungsfragen nach der tatsächlichen operativen Relevanz der Nutzenaspekte in direkten und indirekten Bereichen

sowie einer möglichen Quantifizierbarkeit und Monetarisierbarkeit von Nutzenaspekten dienen. Durch die qualitative Literaturanalyse konnten unter Verwendung von Google Scholar und Google Web Search insgesamt sechsunddreißig Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen aus einundvierzig nationalen und internationalen Literaturbeiträgen extrahiert werden. Diese Aspekte sind in Abbildung 6 dargestellt und werden im weiteren Verlauf des Kapitels vorgestellt.

Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen					
1. Komplexitätsreduzierung	2. Verbesserung der Reaktionsfähigkeit	3. Standardisierung	4. Modularisierung	5. Value Chain Integration	6. Usability/Nutzerfreundlichkeit
7. Autonome Systeme	8. Wissens- & Erfahrungsmanagement	9. Assistenzsysteme	10. Durchlaufzeitreduzierung	11. Automatisierung	12. Produktqualität
13. Variantenflexibilität	14. Volumenflexibilität	15. Mitarbeiter-einsatzflexibilität	16. Engpasserkennung	17. Individualisierung der Bedienoberfläche	18. Mitarbeitervernetzung
19. Mitarbeiterakzeptanz	20. Arbeitsergonomie	21. Virtuelle Absicherung	22. Ausfallsicherheit	23. Ressourceneffizienz	24. Prozessqualität
25. Prozesseffektivität	26. Echtzeitsteuerung	27. Informationsverfügbarkeit	28. Lernfähigkeit von Systemen	29. Vernetzung der Systeme	30. Datenkonsistenz
31. Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen	32. Anforderungs- & Fertigungsgerechtigkeit	33. Termintreue	34. Bedarfsglättung	35. Prozesstransparenz	36. Skalierbarkeit

Abbildung 6: Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen

Tabelle 2 zeigt zusätzlich die Zuordnung der vierzig Literaturquellen zu den sechsunddreißig identifizierten Nutzenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen im Detail auf. Die Darstellung verdeutlicht, dass nicht einige wenige Nutzenaspekt von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik identifiziert werden können. Vielmehr steht eine große Zahl an unterschiedlichen Nutzenaspekten zur Auswahl, die bei operativen Anwendern im Rahmen eines Auswahlprozesses leicht zu Überforderung führen können.

Nr.	Nutzenaspekte	Literaturquellen
1	Mitarbeitereinsatzflexibilität	Günter et al. (2021)
2	Variantenflexibilität	Brosa-Abut & Parlings (2017) & Xu et al. (2021)
3	Volumenflexibilität	
4	Mitarbeitervernetzung	Günthner et al. (2017)
5	Individualisierung der Bedienoberfläche	Gorecky (2017)
6	Modularisierung	Hung Vo (2016)
7	Komplexitätsreduzierung	Kagermann et al. (2013) & (2016)
8	Usability/Nutzerfreundlichkeit	
9	Value Chain Integration	Wang et al. (2016)
10	Verbesserung der Reaktionsfähigkeit	Regelmann (2019)
11	Standardisierung	Kagermann et al. (2016) & Bitkom (2016)
12	Autonome Systeme	Schlick et al. (2017)
13	Automatisierung	Hoppe (2017)
14	Produktqualität	Ghouat et al. (2021)
15	Durchlaufzeitreduzierung	Vogel-Heuser et al. (2017)
16	Assistenzsysteme	Teucke et al. (2017)
17	Wissens- und Erfahrungsmanagement	Ustundaq et al. (2018) & Sabou et al. (2018)
18	Mitarbeiterakzeptanz	Hirsch-Kreinsen (2014)
19	Arbeitsergonomie	Reinhart (2017)
20	Virtuelle Absicherung	Anderlfinger & Hänisch (2017)
21	Ausfallsicherheit	BMWi (2018) & Soder (2017)
22	Ressourceneffizienz	Papenform et al. (2015) & Sandler (2016)
23	Prozessqualität	Winkler et al. (2017)
24	Prozesseffektivität	Seiter et al. (2017) & Anderl et al. (2018)
25	Echtzeitsteuerung	Müller & Voigt (2018)
26	Informationsverfügbarkeit	Günthner (2017)
27	Lernfähigkeit von Systemen	Uhlmann et al. (2017)
28	Datenkonsistenz	Anderl et al. (2018)
29	Vernetzung von Systemen	Obermeier & Grottko (2017)
30	Anforderungs- & Fertigungsgerechtigkeit	Schuh et al. (2018)
31	Termintreue	
32	Skalierbarkeit	Stegmüller & Zürn (2017)
33	Bedarfsglättung	Bogaschewsky (2019)
34	Engpasserkennung	Steven (2019)
35	Prozesstransparenz	Lasi et al. (2014) & Licke et al. (2017)
36	Denzentralisierung von Entscheidungen	Jahn (2017)

Tabelle 2: Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen in Abhängigkeit der Literaturquellen

### **1. Komplexitätsreduzierung**

Häufig ist davon zu lesen, dass durch Industrie 4.0 Anwendungen die Komplexität der Prozesse besser und einfach gemanagt werden kann (Kagermann et al. 2013, S. 25), was Komplexitätsreduzierungen für den Endnutzer zur Folge hat. Grundsätzlich gilt: „Komplexität stellt ein Aggregat bestehend aus mehreren Dimensionen und mehreren Ebenen dar. Die Mehrdimensionalität besteht dabei aus Sachdimension (Multiplizität, Diversität und

Interdependenz) und Zeitdimension.“ Das Komplexitätsmanagement bezieht sich auf die Handhabbarkeit eines Systems (Beisswenger 2016, S. 3).

## **2. Verbesserung der Reaktionsfähigkeit**

Im Rahmen von disruptiven Aspekten weisen Industrie 4.0 Lösungen ein dynamisches Reaktionsverhalten bei unvorhersehbaren Veränderungen auf (Kagermann et al. 2013, S. 109). „Reaktionsfähigkeit beschreibt [...] die Fähigkeit eines Produktionssystems oder einer Organisation gezielt und schnell auf Kundennachfragen oder Veränderungen des Marktes reagieren zu können.“ Reaktionsfähigkeit stellt „die Fähigkeit dieser Organisation dar, auf einen einzelnen Anreiz aus der Umwelt, beispielsweise einer einzelnen Kundennachfrage, schnell reagieren zu können.“ (Hohrath 2013, S. 5)

## **3. Standardisierung**

Prinzip und Vorgehen zur Entwicklung und Nutzung betrieblicher Lösungen, vorrangig als zeitweilige Bestlösungen, z.B. der Ausführung von Prozessen und Aufgaben sowie zur vereinheitlichten Gestaltung von Produkten, speziell durch die Verallgemeinerung und verbindliche Anwendung von betrieblichen Erfahrungen und Praktiken, werden unter Standardisierung verstanden. Standardisierung ist ein Kernelement von Produktionssystemen, unterstützt den Leistungsvergleich, wird aber bevorzugt eingesetzt, um zwar stabile, aber dennoch an wechselnde Bedingungen anpassbare Lösungen zu finden und zu nutzen (REFA Consulting AG 2019). Hierbei kann Industrie 4.0 bspw. in Form von standardisierten Referenzarchitekturen (Kagermann et al. 2013, S. 6), Plattformen, Schnittstellen, Prozessen und Betriebskonzepten (Bitkom 2016, S. 20), sowie Semantik, Funktionen (BMW 2018, S. 7) oder Wertschöpfungsketten (Deuse et al. 2015, S. 100) erheblich beitragen.

## **4. Modularisierung**

Im Kontext Industrie 4.0 umfasst Modularisierung verschiedene, sich selbst steuernde und konfigurierende Elemente und Produktionsstationen. Weiterhin ist damit auch der Aufbau von Soft- und Hardwarelösungen gemeint (Kagermann et al. 2013, S. 105). „Die Gestaltung von Produktionsanlagen nach modularen Gesichtspunkten [...] wird durch Wiederverwendung sowie Standardisierung erreicht. Grundlegende Kriterien zur Modulbewertung sind innere Festigkeit und Abgeschlossenheit, geringe Kopplung, Geheimnisprinzip, Handhabbarkeit und Wiederverwendbarkeit (Jasperneite et al. 2015, S. 2).

## **5. Value Chain Integration**

Insbesondere logistische Industrie 4.0 Lösungen ermöglichen durch eine gezielte Value Chain Integration „End-To-End“<sup>16</sup> Prozesse über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg (Kagermann et al. 2013, S. 5). „Value-Chain Integration beschreibt die Qualität der aktuell etablierten Zusammenarbeit zwischen mehreren Abteilungen und/oder Unternehmen, um zielgerichtet auf die Anforderungen der Umwelt reagieren zu können.“ (Awad und Nassar 2010, S. 282)

## **6. Usability / Nutzerfreundlichkeit**

Da Anwendungen in der Regel vom Endnutzer umgangen werden, wenn diese keine geeignete Nutzerfreundlichkeit aufweisen, gilt insbesondere bei hoch vernetzten und komplexen Industrie 4.0 Lösungen vom Design, über die Entwicklung bis hin zum Betrieb den Nutzer in den Mittelpunkt zu stellen (Kagermann et al. 2013, S. 54). Industrie 4.0 Lösungen können dabei durch die nutzerzentrierte Aufbereitung von Informationen bspw. Qualifizierungsaufwände für Mitarbeiter oder Reaktionszeiten bei Prozessveränderungen reduzieren (Reischauer und Schober 2016, S. 289).

## **7. Autonome Systeme**

Industrie 4.0 Lösungen sind durch KI in der Lage, autonom und adaptiv zu arbeiten (Schlick et al. 2017, S. 8). Dabei können durch Autonome Systeme Informationen aus den unterschiedlichsten Quellen ausgewertet, technische Prozesse modelliert und auf dieser Basis Handlungsempfehlungen generiert werden (Schlick et al. 2017, S. 24). „Autonomie wird grundsätzlich als Freiheit von externer Kontrolle im Sinne einer Selbstbestimmtheit verstanden. Ein Akteur ist umso autonomer, über je mehr der in einer Situation relevanten Ziele sowie der Regeln für ihre Erreichung er entscheiden kann.“ (Breyer-Mayländer 2018, S. 17 f.)

## **8. Wissens- und Erfahrungsmanagement**

Da Industrie 4.0 Lösungen digitale und damit maschinell verarbeitbare Modelle der Unternehmensinformation bereitstellen, können Informationen unternehmensweit wiederverwendet werden, was zu einem besseren Wissen- und Erfahrungsmanagement führt (Sabou et al. 2017, S. 301 f.). „Wissensmanagement soll dazu dienen, unter den für ein Unternehmen [...] geltenden Rahmenbedingungen die Ausschöpfung des in den Menschen steckenden

---

<sup>16</sup> Für eine vollkommene „End-To-End Perspektive [müssen] alle Prozesse als Gesamtbild für eine Leistungserstellung verstanden werden, nur so wird der Kunde mit seinen Bedürfnissen und das Produkt oder die Leistung als Prozessergebnis zum Prozessmittelpunkt (Becker et al. S. 176).

Potenzials zu ermöglichen.“ Ein weiteres Ziel des Wissensmanagement ist die „Verbesserung der organisatorischen Fähigkeiten auf allen Ebenen der Organisation.“ (Ernst 2005, S. 99)

### ***9. Assistenzsysteme***

Assistenzsysteme im Kontext Industrie 4.0 im direkten Bereich stellen technische, sensorgestützte Systeme dar, die den Menschen in bestimmten Situationen oder Handlungen unterstützen (Teucke et al. 2017, S. 581 f.). Dabei bedingt die zunehmende technische Entwicklung eine dynamische Arbeitsverteilung zwischen Mensch und Maschine (Deuse et al. 2018 a, S 200). Im indirekten Bereich ist „ein [...] Assistent [...] ein digitaler „Mitarbeiter“, der zusammen mit und für einen Nutzer bestimmte Aufgaben bearbeiten kann. [...] Ein Assistent ist in der Lage einzelne Arbeitsschritte selbstständig zu bearbeiten, ohne dass es einer ständigen Anleitung und Interaktion bedarf.“ (Steidle und Rossnagel 2005, S. 2)

### ***10. Durchlaufzeitreduzierung***

Die ganzheitliche Betrachtung des Produktionsprozesses inklusive des Transportes gehört zu den zentralen Vorteilen von Industrie 4.0 Lösungen. Neben einer verbesserten Wegeplanung führt die Vorausplanung zu einer gleichmäßigeren Auslastung der Produktionsfaktoren, was wiederum zu einer Verkürzung der Prozessdurchlaufzeit beiträgt (Regulin und Vogel-Heuser 2017, S. 115). Durchlaufzeit wird im Kontext direkter Bereich als „Zeitspanne, die bei der Produktion eines Gutes zwischen dem Beginn des ersten Arbeitsvorganges und dem Abschluss des letzten Arbeitsvorganges verstreicht [verstanden]. Die Durchlaufzeit eines Auftrages ist definiert als die Summe der Bearbeitungs-, Transport- und Wartezeiten auf allen Produktionsstufen.“ (Voigt 2018 a)

### ***11. Automatisierung***

Im Zeitalter der Industrie 4.0 erfolgt das Engineering weitgehend automatisiert mittels durchgängiger digitaler Werkzeuge. Die Automatisierung des Datenstroms steht hierbei im Mittelpunkt (Hoppe 2017, S. 121). Automatisierung ist als das Kernelement der Industrie 3.0 wie auch 4.0 anzusehen und führt zu signifikanten Produktivitätssteigerungen (Wallergang 2012, S. 2). „Ein Automat ist ein selbsttätig arbeitendes künstliches System, dessen Verhalten entweder schrittweise durch vorgegebene Entscheidungsregeln oder zeitkontinuierlich nach festgelegten Beziehungen bestimmt wird. Automatisierung bezeichnet in diesem Kontext das Ausrüsten einer Einrichtung, sodass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen arbeitet.“ (DIN ISO 19233 1998) Jedoch muss dabei stets die „Ironies of Automation“, wonach automatisierte Prozesse aufgrund ihres hohen Routinecharakters bei Störungen nur schwer zu bewältigende Arbeitssituationen erzeugen, berücksichtigt werden (Hirsch-Kreinsen 2014, S. 1).

### ***12. Produktqualität***

Eine gezielte, laufzeitgebundene Adaptierbarkeit von Prozessparametern einer Anlage durch den Einsatz von Industrie 4.0 verbessert zwar die Qualität im Prozess, jedoch kann erst eine anlagen- oder standortübergreifende Analyse und Verteilung der Daten für eine gesamtheitliche Steigerung der Produktqualität beitragen (Pantförder et al. 2017, S. 35 f.). „Die Produkteignung bzw. Brauchbarkeit für bestimmte Zwecke nennt man Produktqualität.“ (Glaser 1995, S. 13)

### ***13. Variantenflexibilität, 14. Volumenflexibilität, 15. Mitarbeiterereinsatzflexibilität***

Die Anforderung an die Flexibilität des Herstellungsprozesses steigt durch die Produktion komplexer, endkundenorientierter Produkte (Regulin und Vogel-Heuser 2017, S. 93). Industrie 4.0 Lösungen tragen dieser Anforderung Rechnung, indem Auftragsvergaben auf Grundlage von aggregierten Kosten erfolgen sowie verfügbare Ressourcen flexibel genutzt werden können (Regulin und Vogel-Heuser 2017, S. 112) und somit sowohl für Varianten- als auch Volumenflexibilität im Produktionssystem sorgen. Zudem entsteht die Möglichkeit, das Personal hinsichtlich der Flexibilität optimiert einzusetzen, was als horizontale und vertikale Personal- oder Mitarbeiterereinsatzflexibilität bezeichnet werden kann (Bauernhansel 2017, S. 28). Angelehnt an die allgemeine Definition von Burmann (2002) wird Flexibilität als „die Eigenschaft (...) einer Sache, einer Einrichtung oder eines Teils davon, eines Tätigwerdens oder Tuns, sich gut an veränderte Gegebenheiten und daraus resultierend, veränderte Aufgaben [und Einsatzgebiete] anpassen zu lassen.“ (Burmann 2002, S. 19 f.)

### ***16. Engpasserkennung***

Industrie 4.0 Anwendungen tragen dazu bei, auf Veränderungen in der relevanten Umwelt sowie auf ungeplante Ereignisse schneller und angemessener reagieren zu können. So ist durch die frühzeitige Erkennung von Engpässen bspw. durch fehlendes Material in Folge von Maschinendefekten eine Aufrechterhaltung des Produktionsprozesses im Schadensfall möglich (Steven 2019, S. 153). Engpässe sind definiert über das Auftreten knapper Kapazitäten bspw. von finanziellen Mitteln, Anlagenkapazitäten oder Mitarbeiterressourcen. Die zentrale Aufgabe der Unternehmensplanung besteht in der frühzeitigen Erkennung und Beseitigung von Engpässen mit dem Ziel der Glättung der Prozessabläufe (Müller-Stewens 2018).

### ***17. Individualisierung der Bedienoberfläche***

Da Vernetzung im Kontext Industrie 4.0 auch die Entwicklung von plattformübergreifenden Schnittstellen und Bedienoberflächen bedingt, stellt sich gleichermaßen die Frage nach einer flexiblen, endnutzerabhängigen Informationsbereitstellung (Gorecky et al. 2017, S. 231). Eine

einfache und transparente Visualisierung kann durch die Individualisierung von Bedienoberflächen im Rahmen eines möglichst harmonisierten Konfigurationsmanagements erreicht werden (Eigner 2016, S. 159 f.). Angelehnt an die Definition des Begriffes Produktindividualisierung nach Gausmann (2008) lässt sich die Individualisierung der Bedienoberfläche als das „Zusammenspiel der Berücksichtigung des Kundenwunsches sowie einer intensiven Kundeninteraktion in Bezug auf eine Softwareoberfläche“ definieren (Gausmann 2008, S. 74).

### ***18. Mitarbeitervernetzung***

Wie im privaten Umfeld auch, bieten Industrie 4.0 Lösungen die Möglichkeit zur Integration neuer Kooperationsformen, bspw. in Form von unternehmensinternen sozialen Netzwerken, welche die Mitarbeitervernetzung steigern. Mitarbeitervernetzung beschreibt hierbei den Grad der Interaktion zwischen Mitarbeitern eines Kommunikationssystems. Wissensbasierte soziale Netzwerke können Wissen und Erfahrungen aller an Systementwicklung und -betrieb beteiligter Mitarbeiter und externer Partner bündeln und strukturieren (Günthner et al. 2017, S. 109 ff.).

### ***19. Mitarbeiterakzeptanz***

Mitarbeiterakzeptanz beschreibt die Bereitschaft von Mitarbeitern, sich einer neuen Technologie gegenüber entweder offen und neugierig oder zurückhaltend und desinteressiert zu verhalten (Beger und Gutzeit 2003, S. 29). Für Industrie 4.0 ist die Akzeptanz der Nutzer ein wichtiger Erfolgsfaktor, da Industrie 4.0 Lösungen Auswirkungen sowohl auf die Arbeitsaufgabe an sich, als auch auf den Arbeitsablauf haben (Regulin und Vogel-Heuser 2017, S. 112 f.).

### ***20. Arbeitsergonomie***

Der Nutzenaspekt Arbeitsergonomie kennt in Bezug auf Industrie 4.0 Lösungen zwei Ausprägungsformen. Zum einen ist hiermit die Softwareergonomie gemeint, welche das implizierte Verstehen des Menschen, eine Anpassung des Systems an den Menschen sowie die Erhaltung der Fähigkeiten des Menschen mit dem Ziel der Effizienzsteigerung umfasst (Trenke und Furmans 2017, S. 49 f.). Zum anderen die klassische Form der Arbeitsergonomie durch einen Wegfall bzw. die Teil- oder Vollautomatisierung von Tätigkeiten mit hoher körperlicher Belastung (Soder 2017, S. 17; Deuse et al. 2012, S. 3). Arbeitsergonomie bezeichnet die „Wissenschaft von der Anpassung der Technik an den Menschen, zur Erleichterung der Arbeit. Das Ziel, die Belastung des arbeitenden Menschen so ausgewogen wie möglich zu halten wird unter Einsatz v.a. technischer, Erkenntnisse angestrebt.“ (Weyh 2018, S. 4)

## **21. Virtuelle Absicherung**

Adaptive Logistiksysteme zielen unter anderem darauf ab, dezentrale, selbstgesteuerte Logistikprozesse zu verstehen und zu prognostizieren. Dabei können virtuelle Simulationssysteme beitragen, hoch komplexe Zusammenhänge zu erkennen, dadurch Fehler frühzeitig zu identifizieren (Günthner et al. 2017, S. 111 f.) und somit Planungsstände virtuell abzusichern. „Unter virtueller Absicherung oder auch virtueller Inbetriebnahme versteht man das Einspielen, Erproben und Ändern von Planungsdaten auf einer virtuellen Maschine (Simulationsumgebung), bevor die erfolgreich getesteten Prozesse oder Programme in die Realität übertragen werden.“ (VDI/VDE 3693 2018)

## **22. Ausfallsicherheit**

Industrie 4.0 basierte Fertigungskonzepte mit mobilen Logistik- und Montageassistenten greifen oftmals auf eine Flotte von autonomen, intelligenten und selbstorganisierten Transportassistenten zurück, welche maximale Flexibilität im Fertigungssystem erzeugen. Flexibilität entsteht auch hinsichtlich der Ausfallsicherheit einzelner Komponenten im Gesamtsystem. Im beschriebenen Beispiel können so Transportkapazitäten einfach skaliert und Engpässe sowie Ausfälle einzelner Komponenten vermieden werden (Soder 2017, S. 18 f.).

## **23. Ressourceneffizienz**

Ein zentraler Nutzenaspekt der Industrie 4.0, welcher weit über den industriellen Bereich hinaus wirkt, stellt die Steigerung der Ressourceneffizienz durch einen intelligenten Einsatz neuer Technologien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit dar (Sendler 2016, S. 38 f.). „Die erfolgreiche Umsetzung von Ansätzen der Industrie 4.0 soll hierbei zu erkennbar gesteigerter Effizienz bei gleichzeitig verminderter Beanspruchung für den Mitarbeiter führen“ (Reinhart et al. 2017, S. 53). Zudem kann Ressourceneffizienz durch eine gezielte, datenbasierte Kreislaufwirtschaft erzielt werden (BMW i 2018; BMW i und BMBF 2018).

## **24. Prozessqualität**

„Ein effizienter Datenaustausch bzw. ein integriertes Datenmodell in einer Wertschöpfungskette ist eine zentrale Anforderung im Umfeld von Industrie 4.0, um die Qualität der Projekte, Produkte und Prozesse sicherstellen zu können“ (Winkler et al. 2017, S. 262). So verbessern bspw. serviceorientierte, skalierbare, (Cloud-) Plattformkonzepte für prädiktive Instandhaltung die Prozessqualität, indem Rückkopplungsschleifen im Qualitätsmanagementprozess geschaffen werden (Eigner 2016, S. 140).

## **25. Prozesseffektivität**

Beispielsweise durch die Implementierung eines Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI 4.0) sollen Produktionsflexibilität sowie Prozesseffektivität und -effizienz erreicht werden (Anderl et al. 2018, S. 125; Obermaier und Grottko 2017, S. 121). „Prozesseffektivität zielt auf eine möglichst weitgehende Übereinstimmung von Ziel und Ergebnis, von Soll und Ist ab. Effektivität kann somit als Zielerreichungsgrad verstanden werden.“ (Dicke 1996, S. 381)

## **26. Echtzeitsteuerung**

Der Nutzen der Echtzeitfähigkeit von Industrie 4.0 Systemen lässt sich in unterschiedlichen Bereichen nachweisen. Beispielsweise bedingt der Einsatz von digitalen Abbildern zwingend eine Echtzeitdatenanpassung. Hierbei handelt es sich um die automatisierte und kurzzyklische Datenanpassung der digitalen Kopie eines physischen Prozesses bei Veränderungen im realen Fertigungssystem (Anderl et al. 2018, S. 126 f.), um aktualisierte Daten für die digitale Planung ohne Effizienzverluste verwenden zu können. Bei der Datenverarbeitung in Echtzeitsystemen muss die Erfassung, Verarbeitung und Ausgabe von Daten zu bestimmten, durch das System und seinen Zustand vorgegebenen Zeitpunkten oder innerhalb bestimmter Zeitintervalle erfolgen. Das Ergebnis ist nur dann fehlerfrei, wenn es inhaltlich und zeitlich den gestellten Anforderungen entspricht (Lunze 2016, S. 1 ff.).

## **27. Informationsverfügbarkeit**

„Im Zuge einer zunehmenden Digitalisierung und Verbreitung von Informations- und Kommunikationstechnologien gerät die systematische Erfassung, Speicherung und Auswertung von Daten zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor.“ (Reckelkamm und Deuse 2020, S. 31) Der Grad der Informationsverfügbarkeit wird dabei anhand der Datenaktualität, Datenzuverlässigkeit und Datenrelevanz zu einem bestimmten Zeitpunkt erhoben (Liebetruth 2005, S. 67). „Mit der vierten industriellen Revolution wird auch die Logistik den nächsten Entwicklungssprung vollziehen - hin zur „Kognitiven Logistik“, die sich auf Basis einer erhöhten Informationsverfügbarkeit auf allen Ebenen logistischer Systeme flexibel und schnell an ein volatiles Umfeld anpasst [...]“ (Günthner et al. 2017, S. 98)

## **28. Lernfähigkeit von Systemen**

Die Lernfähigkeit von CPS entsteht durch den Einsatz des maschinellen Lernens, bei dem Daten analysiert werden, um Muster zu erkennen, die wiederum in nutzbares, komprimiertes Wissen abstrahiert werden (Niggemann et al. 2017, S. 475). Maschinelles Lernen kann im weitesten Sinne als Berechnungsmethodik definiert werden, die Erfahrungen bzw. vergangene

Informationen nutzen, um die Leistung zu verbessern oder genauere Vorhersagen zu treffen (Talwalkar et al. 2012, S. 1).

### **29. Vernetzung der Systeme, 30. Datenkonsistenz**

Wie am Beispiel der vollständigen „Product Lifecycle Management Systeme“ (PLM-Systeme) als „Single Source of Truth“ (SSOT) zu verdeutlichen, unterliegen künftige Industrie 4.0 IT-Systemarchitekturen der Anforderung eines durchgängigen Datentransfers durch die Vernetzung von PLM-Systemen, welche zur Verbesserung der Datenkonsistenz beiträgt (Schuh et al. 2017, S. 81). Systemkonsistenz bzw. Datenkonsistenz beschreibt die Korrektheit der in allen vorhandenen Systemen gespeicherten Daten (Schaller und Höft 1985, S. 183 f.). Vernetzung beschreibt die „Nutzung interorganisationaler Informations- und Kommunikationssysteme mit der Möglichkeit eines beständigen Informationsflusses zwischen potentiellen Partnern.“ (Krebs 1998, S. 152)

### **31. Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen**

Den 31. Nutzenaspekt von Industrie 4.0 Lösungen beschreibt Jahn in 2017 als Dezentralisierung von Entscheidungen. Dabei werden bei CPS lediglich generelle Zielvorgaben durch eine zentrale Instanz vorgenommen. Die dezentralen Einheiten stimmen sich untereinander im Arbeitsprozess ab, entscheiden eigenständig oder bieten dem Menschen Entscheidungsalternativen an (Jahn 2017, S. 5 ff.).

### **32. Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit**

Das qualitative Zielkriterium Fertigungsgerechtigkeit wird von Schuh et al. (2018) als relevant für die Umsetzung von Industrie 4.0 definiert (Schuh et al. 2018, S. 45). „Fertigungsgerechtes Gestalten strebt [...] durch konstruktive Maßnahmen eine Minimierung der Fertigungskosten und -zeiten sowie eine anforderungsgemäße Einhaltung fertigungsabhängiger Qualitätsmerkmale an“ (Beitz et al. 2007, S. 445). Im Kontext Industrie 4.0 kann dies bspw. durch eine durchgängige Datenbereitstellung im Produktentstehungsprozess erreicht werden, die zu produktbezogener Fehlerfreiheit und somit zu Fertigungsgerechtigkeit führt (Wegener 2017 S. 399).

### **33. Termintreue**

Als weiteres qualitatives Zielkriterium nennen Schuh et al. (2018) die Verbesserung der Termintreue durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen (Schuh et al. 2018, S. 45). In heutigen, hoch dynamischen Produktionsumgebungen kommt es häufig zu kurzfristigen Veränderungen, sodass der Produktionsplanung- und Steuerung eine zentrale Rolle zukommt,

um Liefertermine einzuhalten (Schuh et al. 2017, S. 77 und 83). „Termintreue ist das Verhältnis der Lieferungen, die während eines Bemessungszeitraums innerhalb des vereinbarten Zeitfensters eingetroffen sind, zur Gesamtzahl aller Lieferungen dieses Zeitraums“ (Gudehus 2006, S. 58).

### **34. Bedarfsglättung**

Als drittes qualitatives Zielkriterium nennen Schuh et al. (2018) die Bedarfsglättung, (Schuh et al. 2018, S. 45) die bei „Supply Chain Management“ (SCM) orientierten Industrie 4.0 Anwendungen im weitesten Sinne als das Ergebnis von Bedarfsprognoseunterstützung und unterstützter Produktionsplanung und -steuerung verstanden werden kann (Bogaschewsky 2019, S. 153 und 157). „Bedarfsglättung ist die Optimierung des Projektablaufs mit dem Ziel eines möglichst gleichmäßigen Ressourcenbedarfs.“ Insbesondere sollen dadurch Bedarfsspitzen vermieden und somit die Arbeitsbelastung in Produktion und Logistik reduziert werden (Deuse et al. 2011, S. 247). Der Begriff Bedarfsglättung ist nach der seit 2009 ungültigen DIN 69902:1987 definiert als das „Erzeugen eines möglichst gleichmäßigen Bedarfes einer Einsatzmittelart durch Verschieben von Vorgängen innerhalb ihrer Pufferzeiten.“ (Angermeier 2016)

### **35. Prozesstransparenz**

„Zur Steigerung der Effizienz der wertschöpfenden Prozesse (inkl. der Produktionslogistik) ist zunächst eine umfassende Sicht auf diese erforderlich. Hierzu gehören Informationen über Plan-, Soll- und Ist-Werte, die aktuelle Betriebsdaten bzw. Betriebszustände auf Maschinenebene beinhalten. Liegen diese Informationen durchgängig, d.h. prozessübergreifend in einer ausreichenden Aktualität und Granularität sowie integriert vor, kann von Prozesstransparenz gesprochen werden“ (Kemper et al. 2010, S. 29). Beispielsweise im Rahmen der prädiktiven Instandhaltung erfassen Industrie 4.0 Anwendungen mittels Sensoren den aktuellen Stand der Prozessparameter, gleichen diese mit den Vorgabewerten ab und Handeln auf Basis von Entwicklungsprognosen selbstständig. Die Darstellung aller erfassten und verarbeiteten Parameter auf einem Dashboard führt zu erhöhter Prozesstransparenz für den Instandhalter (Lucke et al. 2017, S. 75 ff.).

### **36. Skalierbarkeit**

Im Kontext der Industrie 4.0 werden wandlungsfähige Produktionssysteme als Zielbild ausgeschrieben. Neben anderen Disziplinen gehört die Skalierbarkeit zu den Kernaspekten. Dabei können Objekte fallbezogen räumlich und technisch erweitert oder reduziert werden (Steegmüller und Zürn 2017, S. 28 f.). Im transportlogistischen Umfeld weisen autonome,

schwarmintelligente Förderzeuge ebenfalls die Eigenschaft der Skalierbarkeit auf, was je nach Kapazitätssituation eine Erhöhung oder Reduzierung der im Einsatz befindlichen Förderzeuge erlaubt (Jungbluth 2017, S. 139). Allgemein gilt: „Scalability is the measure of a system’s ability to increase or decrease in performance and cost in response to changes in application and system processing demands.” (Gartner 2020)

## 2.2 Grundlagen zu direkten und indirekten Unternehmensbereichen

Um den theoretischen Rahmen zur Beantwortung von Forschungsfrage 4 nach den unterschiedlichen Anforderungen von Industrie 4.0 Lösungen an eine Kosten/Nutzenanalyse in direkten und indirekten Bereichen zu schaffen, erfolgt in diesem Kapitel die Vorstellung und Abgrenzung von direkten und indirekten Unternehmensbereichen.

Die getrennte Betrachtung von direkten und indirekten Unternehmensbereichen lässt sich auf zwei grundlegende Teildisziplinen der Betriebswirtschaftslehre zurückführen. Zum einen beschreiben Westkämper et al. (2006) aus der Sicht der Produktionsorganisation eine Trennung in Bezug auf die Wertschöpfung in einem Fertigungssystem in direkte Bereiche und periphere Bereiche (Westkämper et al. 2006 b, S. 197). In diesem Kontext erfolgt ebenfalls eine Unterteilung in „Wertschöpfung- und indirekte Bereiche“ (Langhoff und Weber 2017, S. 596), was wiederum bestätigt, dass lediglich die direkten Bereiche wertschöpfend sind. Diese Theorie lässt sich bereits in Taylors Abhandlung zur zielgerichteten Organisation der gewerblichen Arbeitsvorgänge wiederfinden (Taylor 1914, S. 9 ff.). Die Sicht der Kostenrechnung bekräftigt diese Theorie, da hier eine Unterteilung in Einzelkosten, die dem Erzeugnis direkt zugeordnet werden können und Gemeinkosten, die aus allen Unternehmensbereichen resultieren, die unterstützende Leistungen für das Enderzeugnis erbringen, stattfindet. Einzelkosten werden hierbei auch als direkte Kosten und Gemeinkosten als indirekte Kosten bezeichnet (Wildt und von Rechenberg 2018).

### 2.2.1 Direkte Bereiche

Direkte Bereiche sind diejenigen Unternehmensbereiche, welche direkt an der Wertschöpfung und somit an der betrieblichen Leistungserstellung beteiligt sind. Dabei vollzieht sich die Wertschöpfung nach Westkämper et al. (2006) jedoch lediglich in den Stufen der Produktion (Westkämper et al. 2006 b, S. 34). Es handelt sich also um die „Fertigungsvorgänge, in denen die Werkstücke bearbeitet, behandelt bzw. gefügt oder montiert werden“ (Westkämper et al. 2006 b, S. 197). Die Aufwände für die Fertigungsvorgänge werden auch als Primäraufwand

bzw. Primärkosten bezeichnet und beinhalten „Zeit, Prozesse, Energie, Information und Transport zur beabsichtigten Veränderung bzw. Vervollständigung eines Produktes“ (Deuse et al. 2016, S. 33). Entsprechende Industrie 4.0 Lösungen unterstützen demzufolge die betriebliche Wertschöpfung durch den Einsatz von cyber-physischen Systemen, die insbesondere im Fertigungsprozess durch die gezielte Unterstützung der Fertigungsmitarbeiter Effizienzsteigerungen erzielen (Wilhelm et al. 2021, S. 1039 ff.).

### 2.2.2 Indirekte Bereiche

Indirekte Bereiche werden auch als periphere Bereiche bezeichnet. Die indirekten Unternehmensbereiche stellen eine notwendige Voraussetzung für den Wertschöpfungsprozess am Endprodukt dar (Magenheimer 2014, S. 9). Es ist essentiell für den Wertschöpfungsprozess, dass Betriebsmittel in der richtigen Menge, zur richtigen Zeit in der richtigen Qualität und Verfügbarkeit bereitgestellt werden (Westkämper et al. 2006 b, S. 197). Darüber hinaus sind in einem Produktentstehungsprozess vielfältige Prozessbeteiligte involviert, deren Tätigkeiten nicht wertschöpfend sind, ohne die jedoch eine Leistungserstellung nicht möglich ist. Hierzu gehören beispielsweise die Instandhaltung sowie die Mess- und Prüftechnik (Westkämper et al. 2006 b, S. 197). Die Aufwände der indirekten Bereiche werden unter dem Sekundäraufwand bzw. den Sekundärkosten zusammengefasst und beinhalten alle „die auf Grund der gewählten Planungs- und Produktionsmethode, der Betriebsorganisation oder Firmenkultur notwendige Aufwendungen darstellen, ohne eine Wertschöpfung des Produktes zu bewirken.“ (Deuse et al. 2016, S. 33) Nach Westkämper und Spath (2019) gehören beispielsweise die Planung und Steuerung von Produktionsprozessen, die Instandhaltung sowie die Qualitätssicherung zu indirekten Aufgaben, die organisatorisch in indirekten Organisationseinheiten verortet sein müssen (Westkämper und Spath 2019, S. 6). In der Automobilindustrie sind bspw. der Vertrieb, der Einkauf und das Personalwesen als indirekte Bereiche anzusehen. Industrie 4.0 Lösungen in indirekten Bereichen werden auch als „Digital Engineering Systeme“ bezeichnet, deren Aufgabe die „mit digitalen Werkzeugen unterstützte Ingenieurleistung im gesamten Lebenszyklus von Produkt, Fabrik und Prozessen“ darstellt (Volkman et al. 2014, S. 14).

### 2.2.3 Unterschiede zwischen direkten und indirekten Bereichen

Hillmer (2016) beschreibt ein theoretisches Modell zur Differenzierung, welches auf den Ergebnissen einer Literaturrecherche zu den Charakteristika von indirekten und direkten Bereichen fußt und in Abbildung 7 dargestellt ist. Dabei lassen sich sieben Hauptcharakteristika definieren: Standardisierungsgrad, Ergebnisorientierung, Kognitivitätsgrad, Vorhersehbarkeit, Kollaborationsgrad, Ressourcenintensität und Signifikanzniveau (Hillmer 2016, S. 64 f.). Neben der wertschöpfungsorientierten und kostenrechnungsorientierten Betrachtungsweise ermöglicht dieses Modell die prozessorientierte Option der Differenzierung zwischen direkten und indirekten Bereichen.

An der Aufstellung ist zu erkennen, dass signifikante Unterschiede vorherrschend sind. In den direkten Bereichen werden häufig standardisierte, repetitive, geistig weniger anspruchsvolle und körperlich belastende Aufgaben ausgeführt. Wohingegen in indirekten Bereichen die geistige Beanspruchung weit höher als die körperliche ausfällt und die Aufgaben in weniger vorhersehbaren, jedoch weitreichenderen Projektstrukturen erledigt werden (Hillmer 2016, S. 64 ff.).

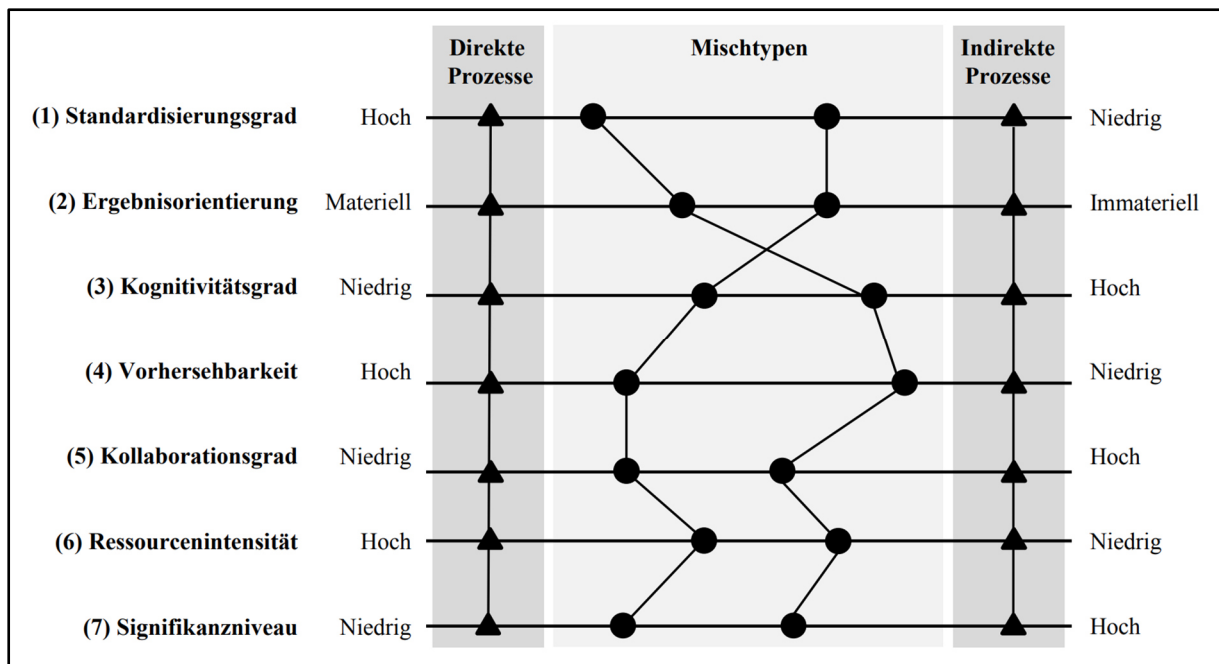


Abbildung 7: Abgrenzung direkte und indirekte Unternehmensbereiche nach Hillmer (Hillmer 2016, S. 66)

Da in der Realität oftmals Mischformen auftreten, wird am Beispiel logistischer Tätigkeiten die Schwierigkeit der Abgrenzung aufgezeigt. Erlach (2010) führt an, dass unter indirekten Bereichen beispielsweise die „Instandhaltung, Logistik und Qualitätssicherung“ zu verstehen sind (Erlach 2010, S. 130). Diese sind lediglich als unterstützende Funktion anzusehen und sollten stets von den Wertschöpfungsbereichen getrennt werden (Erlach 2010, S. 291).

Andererseits beschreibt Antoni (2017) jedoch aktuelle Organisationsformen für Arbeitsgruppen, welche die Erweiterung der Tätigkeitsumfänge im Rahmen der Teamarbeit um indirekte Aufgaben der Materialbereitstellung und des Halb- und Fertigteiltransports beinhalten, um Produktivitätssteigerungen zu erzielen (Antoni, 2017, S. 161 f.). Als sogenannter fertigungsnaher indirekter Bereich, weist die Logistik einen Großteil der Charakteristika eines direkten Bereiches auf, stellt jedoch je nach Literaturquelle keine wertschöpfende, sondern lediglich eine unterstützende Tätigkeit dar. Bereits Porter (2014) war der Auffassung, dass die Tätigkeitsebene bei der Unterteilung in direkt und indirekt Bereiche ausschlaggebend sein und auf dieser Basis Organisationseinheiten gebildet werden müssten (Porter, 2014, S. 67). Wie am Beispiel der logistischen Materialbereitstellungs- und Transporttätigkeiten im Rahmen der Teamorganisation zu sehen ist, stößt diese Theorie jedoch in der Praxis an Grenzen. Die Grenzen sowohl auf der Ebene der Organisationseinheiten als auch auf der Tätigkeitsebene einzelner Mitarbeitergruppen können demzufolge fließend sein, was in der Realität häufig zu Mischformen führt (Hillmer 2016, S. 64 ff.).

## 2.3 Grundlagen der Entscheidungstheorie

Das Treffen von Entscheidungen ist ein alltäglicher Prozess und somit von existenzieller Bedeutung. Menschen treffen täglich eine Vielzahl von Entscheidungen, oftmals ohne dies bewusst zu steuern. Aus dem betriebswirtschaftlichen Kontext heraus wird eine fundierte Entscheidung an dem Punkt benötigt, wo Wahlmöglichkeiten mit besonderer Bedeutung und weitreichenden Folgen bestehen. Meist unterliegen solche Entscheidungen komplexen und nicht direkt ersichtlichen Interdependenzen (Laux et al. 2018, S. 3 ff.). Kapitel 2.3 soll dazu dienen, die wissenschaftlichen Methoden zur Entscheidungsfindung vorzustellen.

### 2.3.1 Erwartungsstrukturen präskriptiver Entscheidungslehre

Es ist eine zentrale Herausforderung der Entscheidungslehre, die Vergleichbarkeit von Handlungsalternativen durch methodische Unterstützung als rationale Entscheidungsgrundlage herbeizuführen. Der Teilbereich der Entscheidungslehre, welcher rationale Entscheidungsgrundlagen ermöglicht, wird als präskriptive Entscheidungstheorie bezeichnet (Laux et al. 2018, S. 3 ff.). Ein weiterer Teilbereich der Entscheidungslehre, welcher die Frage nach dem „tatsächlichen (empirischen) Entscheidungsverhalten“ versucht zu beantworten ist die deskriptive Entscheidungslehre. Durch die Analyse „kontextabhängiger individueller bzw. kollektiver Entscheidungen sowie diversen soziologischen und psychologischen

Einflussfaktoren [sollen] Erklärungsgrößen für Abweichungen [...] von einer rationalen Entscheidung“ herausgestellt werden (Obermaier und Salinger 2020, S. 1 f.).

Da die „Betriebswirtschaftslehre [...] die Lehre von Entscheiden nach dem Rationalprinzip“ (Göbel 2018, S. 22) ist und im Kontext der ökologischen Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen ebenfalls die Wirtschaftlichkeit als rationale Entscheidungsgrundlage im Vordergrund steht, erfolgt in diesem Kapitel lediglich die Vorstellung der grundlegenden Ansätze der präskriptiven Entscheidungslehre, die in Abbildung 8 gemäß den zu erwartenden Umweltzuständen systematisiert dargestellt sind. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Verbesserung der Entscheidungsmethodik liegt und nicht die Frage nach dem „Wie werden Entscheidungen in der Praxis getroffen“ stellt, werden die Ansätze der deskriptiven Entscheidungslehre nicht betrachtet.

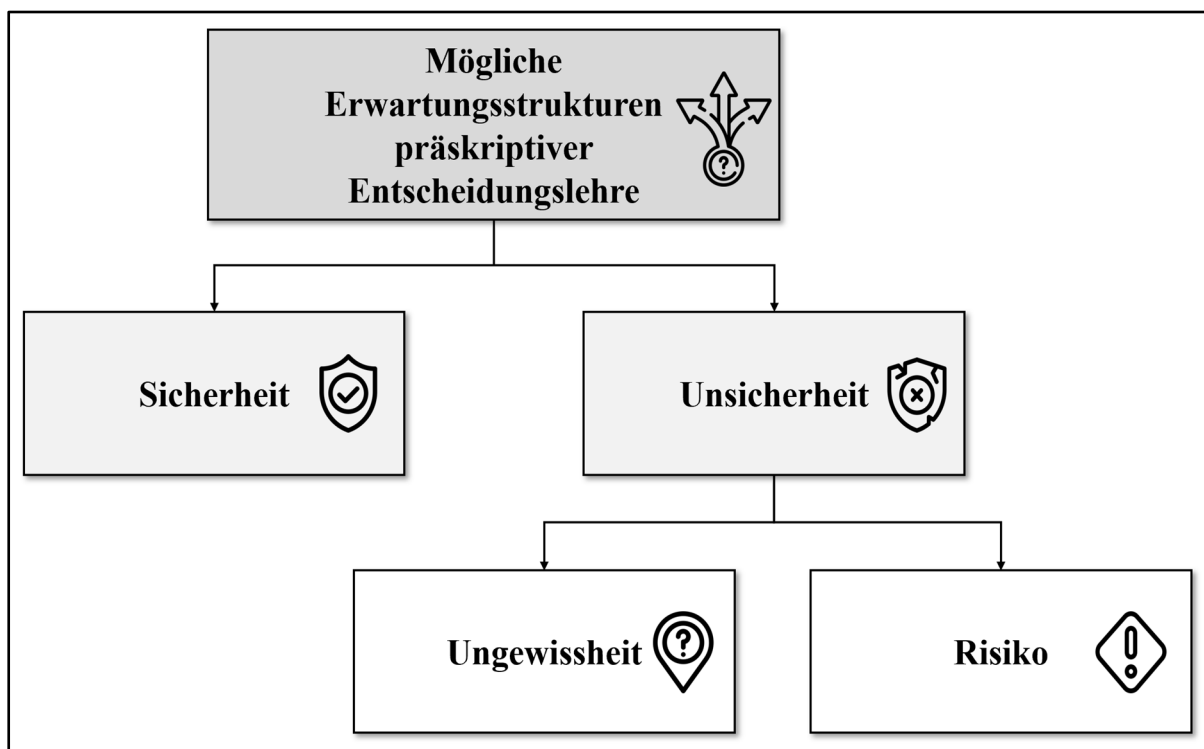


Abbildung 8: Umweltzustände der präskriptiven Entscheidungslehre nach Laux et al. (Laux et al. 2018, S. 35)

Die Erwartungsstrukturen der präskriptiven Entscheidungslehre sind in Entscheidungen bei Sicherheit und Entscheidungen bei Unsicherheit untergliedert. Sicherheit liegt vor, wenn eine Aktion einem dezidierten Ergebnis zugeordnet werden kann. Demgegenüber ist Unsicherheit dadurch definiert, dass einer Aktion mehrere Ergebnisse zuordenbar sind. Entscheidungen bei Unsicherheit sind wiederum in Entscheidungen bei Ungewissheit und Risiko unterteilt. Bei einem Risiko ist die Eintrittswahrscheinlichkeit der Umweltzustände bekannt, was bei Ungewissheit nicht der Fall ist (Obermaier und Salinger (2020), S. 14 f.).

Im folgenden Kapitel werden lediglich die Ansätze der Entscheidungen unter Unsicherheit betrachtet, da Industrie 4.0 Lösungen durch technologische wie prozessuale Neuerungen eine Vielzahl an Unvorhersehbarkeiten (Obermaier und Grottko 2017, S. 122) mit sich bringen und in diesem Kontext nicht von sicheren Entscheidungsszenarien auszugehen ist.

### 2.3.2 Entscheidungen bei Unsicherheit

Wie von Schuh et al. (2018) angeführt, unterliegen Investitionen für Industrie 4.0 Lösungen auf Basis der Neuheit des Themas einer Vielzahl von Unsicherheiten (Schuh et al. 2018, S. 41). Zu nennen sind hier die von Kesten et al. (2006) formulierten Unsicherheiten in Bezug auf die Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Ausmaße von Wirkungen wie bspw. der Kosten- und Erlösermittlung über die Projektlaufzeit oder der Einfluss von externen Effekten (Kesten et al. 2006, S. 6). Grundsätzlich unterliegen alle realitätsnahen Entscheidungen einer gewissen Unsicherheit bzgl. der entscheidungsrelevanten Daten. Das Ergebnis einer Alternative lässt sich zum Zeitpunkt der Entscheidung also nicht klar vorhersagen und ist somit von den noch unbekanntem Umweltfaktoren abhängig. Dabei unterscheidet man zwischen Entscheidungen unter Risiko und Entscheidungen unter Ungewissheit (Göbel 2018, S. 56).

Entscheidungen unter Risiko setzen voraus, dass die denkbaren Umweltzustände sowohl bekannt sind als auch deren Eintrittswahrscheinlichkeiten definiert werden können. Hierbei tritt das Problem auf, dass objektive Wahrscheinlichkeiten nicht valide quantitativ ermittelt werden können oder die Ermittlung nicht unerheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand erzeugt und somit nicht wirtschaftlich ist (Amann 2019, S. 23). Deshalb erfolgt die Nutzung von subjektiven Wahrscheinlichkeiten, die auf den persönlichen Erfahrungen oder Informationen der Entscheider beruhen und zu unterschiedlichen Risikobewertungen von Alternativen führen (Laux et al. 2018, S. 93). Im Kontext der Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen lassen sich die Einflussfaktoren und Umweltzustände noch valide herausarbeiten. Die Quantifizierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten stellt jedoch ein weit größeres Problem dar, da Erfahrungswerte auf Grund der Neuheit der Lösungen oftmals nicht vorhanden sind (Ematinger 2018, S. 9 ff.). Aus diesem Grund verfolgen die Ansätze von Entscheidungen unter Ungewissheit, auch Entscheidungen unter Unsicherheit im engeren Sinne genannt, ein anderes Ziel. Hierbei wird eingestanden, dass die Zukunft vielseitige Unsicherheiten birgt, die zum Zeitpunkt einer Entscheidung weder in ihrer genauen Anzahl und Ausprägung noch in ihrer Wahrscheinlichkeit definierbar sind. Trotzdem ist es unabdingbar, Informationsbeschaffungsaktivitäten einzuleiten und sich über mögliche Umweltzustände sowie deren Auswirkungen Gedanken zu machen, um „Wenn-Dann“ Aussagen formulieren zu können (Göbel 2018, S. 95; Amann 2019, S. 23).

Dadurch entsteht eine gewisse Planbarkeit in Bezug auf die Ergebnisse des Eintritts eines gewissen Umweltzustandes. Diese Logik lässt sich auf die Investitionsentscheidung für IT-gestützte Lösungen gut und praktikabel übertragen (Mascarella 2005, S. 95 ff.).

Aufgrund der Tatsache, dass es bei dieser Arbeit um die Bewertung der absoluten Vorteilhaftigkeit von Einzelinvestitionen geht und dieser Prozess detaillierter beschrieben werden soll, werden im Folgenden lediglich die hierzu relevanten Methoden der Entscheidung unter Ungewissheit vorgestellt (Kesten et al. 2006, S. 23).

### ***Korrekturverfahren***

Bei dem Korrekturverfahren erfolgt eine triviale und nicht systematisch ablaufende Anpassung von unterschiedlichen Rechenelementen auf einer subjektiven Basis. Rechenelemente können hierbei der Kalkulationszinssatz, die Nutzungsdauer oder die zu betrachtenden Zahlungsgrößen sein (Poggensee 2015, S. 259). Üblicherweise erfolgt die Anpassung in Form von Risikozuschlägen, deren Höhe variieren kann bzw. fallspezifisch festgelegt werden muss. Als Vorteil ist die grundlegende Berücksichtigung von Unsicherheiten zu erwähnen. Kritisch sind die subjektive Ermittlung der Risikozuschläge sowie die Auswahl der geeigneten Rechenparameter einzustufen. Es besteht bspw. die Gefahr, dass unkritische Parameter angepasst und somit verfälscht werden (Götz 2008, S. 24 f.).

### ***Sensitivitätsanalyse***

Auch die Sensitivitätsanalyse umfasst keine theoretisch anspruchsvolle oder objektive Systematik der Unsicherheitsbewertung oder -berücksichtigung. Im Gegensatz zum Korrekturverfahren liegt der Fokus jedoch auf der Veränderung von Rechenelementen in Bezug auf den Zielwert bzw. das Ergebnis der dynamischen Investitionsrechnung (Götz 2008, S. 363). Drei Verfahren der Sensitivitätsanalyse sind in der Literatur erwähnt (Poggensee 2015, S. 264 ).

#### ***1. Kritische-Werte-Rechnung***

Hierbei erfolgt lediglich die Anpassung eines Parameters sowie die Ermittlung der Auswirkung auf den Zielwert, um deren Sensitivität in Bezug auf den angepassten Parameter zu ermitteln (Poggensee 2015, S. 264 f.).

#### ***2. Dreifachrechnung oder Szenarioanalyse***

Die Dreifachrechnung oder Szenarioanalyse umfasst die Erstellung von drei, möglichst sachlich plausiblen Datensätzen oder Szenarien, die wiederum auf künftigen Umweltentwicklungen beruhen. Die Basis bietet ein realistisches Trendszenario, welches als Grundlage für die

Ermittlung eines „Best Case“ bzw. optimistischen und eines „Worst Case“ bzw. pessimistischen Szenarios genutzt wird. Die Gegenüberstellung der drei Szenarien deckt ein breiteres Spektrum an künftigen Entwicklungen ab und bietet somit eine bessere Entscheidungsgrundlage (Poggensee 2015, S. 274 f.; Kesten et al. 2006, S. 17 f.).

### *3. Zielgrößenänderungsrechnung*

Im Gegensatz zur Kritischen-Werte-Rechnung findet bei der Zielgrößenänderungsrechnung eine Anpassung der jeweiligen Zielwerte der dynamischen Investitionsrechnung statt. Dadurch lässt sich der Einfluss der einzelnen Rechenparameter auf den Zielwert ermitteln (Poggensee 2015, S. 277 f.).

### ***Risikoanalyse***

Die Risikoanalyse umfasst die Kalkulation von möglichen Ausprägungen für unsichere Inputgrößen, die in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen visualisiert werden (Götz 2008, S. 376). Ausgangspunkt ist die Risikoeinstellung eines fiktiven Investors, deren Einteilung ähnlich der Dreifachrechnung, in risikofreudig, risikoneutral und risikoavers erfolgt (Poggensee 2015, S. 298). Dabei findet zusätzlich eine quantitative Datenermittlung für künftige Umweltzustände statt. Im Anschluss erfolgen die Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Berechnung der Ergebnisverteilung. Abschließend findet die Interpretation und Auswahl der Investitionsalternative statt (Poggensee 2015, S. 297 f.). Als Vorteil kann die systematische und aktienmarktorientierte Ableitung von Kennzahlen angesehen werden, sodass die Berücksichtigung der Unsicherheit relativ objektiviert wird (Kesten et al. 2006, S. 21). Als Nachteil der Risikoanalyse ist die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung anzusehen, da diese oftmals nur durch subjektive Schätzungen erfolgt (Götz 2008, S. 376 f.).

### ***Sequenzielle Investitionsentscheidung***

Die sequenzielle Investitionsentscheidung hat die im Zeitablauf optimale Folge der Investitionsentscheidungen zum Ziel (Poggensee 2015, S. 281). Dabei muss ein Investor stets zwischen endlich vielen Umweltzuständen sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten in einem dynamischen Modell wählen. Die möglichen Entscheidungswege werden dabei grafisch in einer Baumstruktur dargestellt (Kesten et al. 2006, S. 21). Daher ist diese Technik auch unter dem Entscheidungsbaumverfahren bekannt (Poggensee 2015, S. 281). Als Zielgröße wird zumeist der Erwartungswert des Kapitalwerts herangezogen, sodass folgende Regel gilt: „Optimal ist die zustandsabhängige Entscheidungsfolge, die den maximalen Erwartungswert des Kapitalwertes aufweist“ (Götz 2008, S. 384 f.). Laut Götz (2008) ist die Erstellung solcher Modelle zur Beurteilung von Investitionsentscheidungen in Form von Eventualplanungen

(Poggensee 2015, S. 282) als grundsätzlich sinnvoll anzusehen. An seine Grenzen stößt die Methode bei komplexen Entscheidungsstrukturen, die zusätzlich einen signifikanten Anteil an Unsicherheiten aufweisen (Götz 2008, S. 394).

## 2.4 Grundlagen der Investitionsrechnung

Da die Umsetzung von Industrie 4.0 Lösungen mit erheblichen finanziellen Aufwendungen verbunden ist, stellt sich die Frage nach der Wirtschaftlichkeit einer solchen Investition. Denn in Bezug auf eine Investition gilt der Grundsatz: „Eine Investition sollte [...] mindestens immer eine gegenüber der Ausgangssituation verbesserte Situation schaffen“ (Poggensee 2015, S. 7). „Eine Investition ist durch einen Zahlungsstrom gekennzeichnet, der mit Auszahlungen beginnt und in späteren Zahlungszeitpunkten Einzahlungen [...] erwarten lässt“ (Götz 2008, S. 5). Hierzu bietet die Investitionsrechnung als Teilbereich der Wirtschaftlichkeitsrechnung (Pape et al. 2018) eine Vielzahl an Methoden und Verfahren, um Kosten und Nutzen sowie den zeitlichen Kapitalfluss zu ermitteln. Dies ist sowohl aus strategischer Sicht im Rahmen der langfristigen Kapitaldisposition, als auch aus operativer Sicht zur quantitativen Evaluierung konkreter Investitionsprogramme sinnvoll (Poggensee 2015, S. 2). Grundsätzlich lassen sich statische, dynamische und neue Rechenverfahren unterscheiden.

Dabei unterscheiden sich statische von dynamischen Verfahren dadurch, dass die zeitliche Struktur der Ein- und Auszahlungen keine Berücksichtigung findet (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 29). Kapitel 2.4 soll dazu dienen, die Methoden zur Erfassung von Nutzenpotenzialen und die anschließende Bewertung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Investition vorzustellen.

### 2.4.1 Statische Verfahren

Die statischen Verfahren der Investitionsrechnung beschränken sich auf die Aufstellung von Ertrag und Aufwand sowie Leistungen und Kosten für Investitionen innerhalb einer einzelnen Periode, die meist ein Jahr umfasst. Daher werden die statischen Verfahren auch als periodische Verfahren bezeichnet. Hierbei erfolgt die Übernahme der Planungsdaten des ersten Jahres oder eines repräsentativen Jahres für die komplette Planungsperiode (Poggensee 2015, S. 37). Der große Vorteil dieser Verfahren liegt in der Einfachheit der Datenerfassung und Ergebnisermittlung, was somit zu schnellen Ergebnissen führt. Obwohl statische Verfahren große Nachteile für komplexe und langfristige Investitionen aufweisen, werden diese aufgrund der Einfachheit in der betrieblichen Praxis nach wie vor flächendeckend genutzt (Poggensee 2015, S. 36). Nachteile im Vergleich zu den dynamischen Verfahren sind unter anderem die fehlende

Berücksichtigung der kompletten Nutzungsdauer des Investitionsobjektes, die Annahme, dass Umsätze, Kosten und Gewinne konstant sind, oder die fehlende zeitliche Diskontierung von Ein- und Auszahlungen (Poggensee 2015, S. 38). In diesem Kapitel werden die vier statischen Verfahren vorgestellt.

### ***Kostenvergleichsrechnung***

Die Kostenvergleichsrechnung berücksichtigt lediglich die Kosten einer Investition und stellt diese ggf. den Kosten anderer Investitionsobjekte gegenüber. Durch die fehlende Berücksichtigung der Umsatzseite sollte dieses Verfahren lediglich zum Vergleich von Investitionsobjekten mit sowohl ähnlicher Umsatzerwartung als auch zeitlichem Zahlungseingang genutzt werden (Poggensee 2015, S. 50 f.).

### ***Gewinnvergleichsrechnung***

Die Gewinnvergleichsrechnung stellt das Gegenstück zur Kostenvergleichsrechnung dar, indem lediglich die Einnahmenseite Betrachtung findet. Daher sollte dieses Verfahren lediglich zum Vergleich von Investitionsobjekten mit sowohl ähnlicher Gewinnerwartung als auch zeitlichem Zahlungseingang genutzt werden (Poggensee 2015, S. 59 f.).

### ***Rentabilitätsrechnung***

„Bei der Rentabilitätsrechnung wird eine Verhältniszahl ermittelt. Hier wird eine periodische Erfolgsgröße zum durchschnittlich gebundenen Kapital ins Verhältnis gesetzt.“ Dabei lassen sich die Werte für Zähler und Nenner mit unterschiedlichem Bezug definieren, was zu einer Vielzahl an Rentabilitäten führt. Im Gegensatz zur Kosten- und Gewinnvergleichsrechnung, lässt sich die Rentabilitätsrechnung auch auf Einzelinvestitionen anwenden, wenngleich dies allein für die Praxis nicht ausreichend erscheint (Poggensee 2015, S. 67 ff.). Dennoch findet die Rentabilitätsrechnung in der Praxis breite Anwendung, bspw. als Entscheidungsgrundlage vor Lieferantenwechseln oder zur Reduzierung von Kosten (Helmold 2021, S. 91).

### ***Statische Amortisationsrechnung***

Die statische Amortisationsrechnung führt keine Investitionsentscheidung auf Basis des ökonomischen Prinzips<sup>17</sup> herbei. Es wird vielmehr eine Entscheidungsgrundlage auf Basis der „Anzahl von Perioden, gemessen in Jahren, nach denen aus den Rückflüssen der einzelnen Jahre ohne Beachtung von Zinsen das ursprünglich eingesetzte Kapital wieder-gewonnen ist“ erstellt. Die abschließende Investitionsentscheidung hängt von der zumeist unternehmens- oder

---

<sup>17</sup> Es existieren zwei ökonomische Prinzipien. Während das Maximalprinzip mit gegebenem Input versucht den maximalen Output zu erzielen, strebt das Minimalprinzip die Erreichung eines Outputs mit minimalem Input an (Eichhorn und Merk 2016, S. 179 f.).

bereichsspezifisch definierten Anzahl an Soll-Perioden bis zum finalen Rückfluss der Investitionen ab (Poggensee 2015, S. 75 f.).

„Im praktischen Alltag besitzt die Amortisationsrechnung erhebliche Bedeutung“ (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 280), da die Methode nützliche Informationen über die kritische Nutzungsdauer einer Investition ermittelt, bis der Überschuss gleich null ist (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 294).

#### 2.4.2 Dynamische Verfahren

Die dynamischen Verfahren versuchen die Schwachstellen der statischen Verfahren der Investitionsrechnung durch die Berücksichtigung des unterschiedlichen zeitlichen Anfalls von Zahlungen, auch Diskontierung genannt, sowie eines festgelegten Zinssatzes über die gesamte Investitionsdauer hinweg zu eliminieren.

Dabei ist dabei ein weit größerer Aufwand nötig als bei den statischen Verfahren, um ein verlässliches Kalkulationsergebnis zu erzielen, welches jedoch deutlich realitätsnäher ausfällt (Poggensee 2015, S. 92). Grundsätzlich haben dynamische Methoden das Ziel, „die absolute Vorteilhaftigkeit eines Investitionsrechnungsobjektes anhand eines singulären Kriteriums [zu] bewerten“ (Poggensee 2015, S. 93). Singuläre Kriterien sind hierbei Geldsätze, Zinsen oder Zeitpunkte. Die Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit impliziert, dass lediglich singuläre Investitionsentscheidungen auf Sinnhaftigkeit hin überprüft werden können. „Ob das lohnende Investitionsobjekt einem anderen lohnenden Investitionsobjekt vorzuziehen wäre (relative Vorteilhaftigkeit), lässt sich auf dem Boden der dynamischen Investitionsrechnungsverfahren bereits nicht mehr qualifiziert entscheiden“ (Poggensee 2015, S. 93).

Ebenso muss bei der Auflösung mehrdimensionaler Zielfunktionen auf andere Techniken wie bspw. der linearen Optimierung zurückgegriffen werden. Lediglich die Methode der vollständigen Finanzpläne wird in der Literatur teilweise auch unter den dynamischen Verfahren geführt, obwohl ebenfalls die relative Vorteilhaftigkeit ermittelt werden kann (Götz 2008, S. VIII). In Kapitel 2.4.2 werden die sechs wichtigsten dynamischen Verfahren vorgestellt.

##### ***Kapitalwertmethode***

Die Kapitalwertmethode berücksichtigt bei der Ermittlung des Kapitalwerts die Transformation aller zukünftigen Informationen bzgl. einer Investition auf den Gegenwartswert zum aktuellen Zeitpunkt mit dem Ziel der Endwertmaximierung (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 31). Der Kapitalwert stellt die Differenz zwischen den barwertigen Ein- und Auszahlungen im

Zeitverlauf dar. Dadurch soll die Vorteilhaftigkeit einer Investitionsentscheidung aufgezeigt werden (Poggensee 2015, S. 105).

Die Kapitalwertmethode erfreut sich im betrieblichen Umfeld größter Beliebtheit (Schuh et al. 2018, S. 44 f.) und ist dort auch unter der Bezeichnung ROI bekannt (Becker 2011, S. 81 f.).

### ***Horizontwertmethode***

Die Horizontwertmethode oder Vermögensendwertmethode (Götz 2008, S. 110) stellt das Gegenstück zur Kapitalwertmethode dar, denn es wird stets der Vermögenszuwachs am Ende der Nutzungsdauer ermittelt. „Der Horizontwert [kann als] Differenz der endwertigen Ein- und Auszahlungen [angesehen werden]“ (Poggensee 2015, S. 118).

### ***Annuitätenmethode***

Bei der Annuitätenmethode erfolgt die Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit über die Berechnung eines periodisch konstanten Überschusses (auch durchschnittlicher jährlicher Überschuss oder Annuität) einer Investition über die komplette Laufzeit hinweg (Poggensee 2015, S. 122). Allerdings ist der Begriff Annuität in der Betriebswirtschaftslehre nicht klar definiert (Poggensee 2015, S. 123).

### ***Interne Zinsfußmethode***

Die interne Zinsfußmethode steht in direkter Verbindung zu den drei zuvor genannten Methoden. Dabei wird der interne Zinssatz als endogene Variable<sup>18</sup> so lange angepasst, bis die Zielwerte der anderen Methoden null ergeben. Somit ist das Ergebnis immer ein dimensionsloses Kriterium (Poggensee 2015, S. 128 f.). Diese Methode ist trotz zweifelhafter Ergebnisse in der Praxis beliebt, obwohl bereits in den 1970er-Jahren die Tilgung vorgeschlagen wurde (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 88).

### ***Dynamische Amortisationsrechnung***

Die dynamische Amortisationsrechnung konzentriert sich im Gegensatz zur internen Zinsfußmethode nicht auf die Anpassung des Zinssatzes sondern auf die Anpassung der variablen Nutzungsdauer bis alle anderen Dynamiken null ergeben (Poggensee 2015, S. 138). Somit kann die dynamische Amortisationszeit, welche die Zeitspanne umfasst, in der „das für eine Investition eingesetzte Kapital aus den Einzahlungsüberschüssen des Objektes wiedergewonnen wird“ ermittelt werden (Götz 2008, S. 107). Wie die statische Amortisations-

---

<sup>18</sup> Endogene Variablen sind abhängige Variablen, deren Wert innerhalb eines Modells oder einer Berechnungssystematik erklärt werden (Auer et al. 2018).

rechnung auch, erfreut sich die dynamische Amortisationsrechnung in der Praxis hoher Beliebtheit (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 291).

### ***Vollständige Finanzpläne***

Der von Heister (1962) entwickelte Ansatz der vollständigen Finanzpläne (Heister 1962, S. 3 f.) berücksichtigt neben den originären Zahlungsreihen eines Investitionsobjektes auch die derivativen Zahlungsreihen und ermöglicht somit die differenzierte Betrachtung der Finanzmittelaufnahme in Eigen- und Fremdkapital sowie den Ausgleich von Unterschieden bei der Kapitalbindung. Das Verfahren ist durch seine Komplexität sehr aufwendig und somit wenig praxistauglich (Götz 2008, S. 119 f.).

### 2.4.3 Verfahren zur Nutzenerfassung

Da Forschungsfrage 3 zum Ziel hat, eine Vorgehensweise zur Quantifizierung und somit monetären Messbarkeit der Kosten- und Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen zu erarbeiten, werden in diesem Kapitel die Verfahren der Nutzenermittlung aus Abbildung 9, angelehnt an die Systematisierung von Walter und Spitta, erweitert um Irani und Love, zusammengefasst von Becker, vorgestellt (Becker 2011, S. 78 ff.). An dieser Stelle ist anzumerken, dass es in der Literatur keine einheitliche Systemisierungslogik gibt (Becker 2011, S. 79). Beispielsweise unterteilt Potthof (1998) die Verfahren in lediglich zwei Klassen: Berechnungs- und Beschreibungsverfahren (Potthof 1998, S. 17). Becker hat daher die hier vorgestellte Systematisierung zu den Verfahren der Nutzenerfassung aus der Kombination unterschiedlicher Systemisierungslogiken entwickelt. Ferner basiert die Systematisierung von *Becker* auf der Nutzenbetrachtung von IT-Systemen. Da Industrie 4.0 Lösungen im Rahmen des Vernetzungsgedankens stets einen IT-Anteil aufweisen und die gleichen Herausforderungen bzgl. schwieriger Erfassbarkeit und Heterogenität der Nutzenaspekte (Kagermann et al. 2013, S. 45) bestehen, wird die in Abbildung 9 dargestellte Systematisierung gewählt. Die Gesamtbewertungsverfahren konnten bereits in den Kapiteln 2.3.1, 2.4.1 und 2.4.2 in detaillierterem Umfang und getrennt voneinander beschrieben werden, da diese keine Instrumente der Nutzenerfassung, sondern der Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Investition sind. Zudem generiert die Vorstellung der kundenbezogenen und unternehmenszielbezogenen Verfahren im Kontext dieser Arbeit keinen Erkenntnisgewinn in Bezug auf die Beantwortung der vorliegenden Forschungsfragen und entfällt daher.

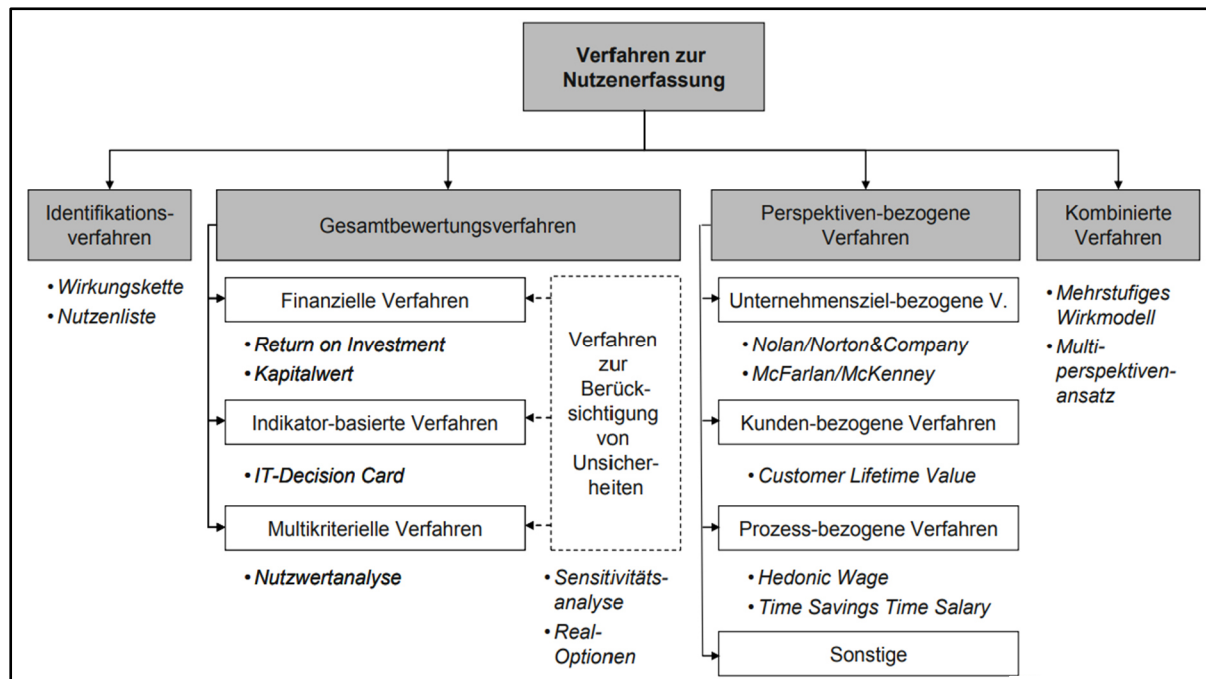


Abbildung 9: Systematisierung der Verfahren der Nutzenerfassung nach Becker (Becker 2011, S. 81)

### ***Wirkungskettenanalyse***

Die zentrale Idee der Wirkungskettenanalyse besteht darin, eine mehrstufige Wirkungs- und Nutzenabhängigkeit innerhalb des bestehenden Wirkgefüges einer IT-Lösung zu beschreiben und diese abschließend zu quantifizieren (Kesten et al. 2006, S. 12 f.). Dabei sollen sowohl die direkten als auch die indirekten Auswirkungen, die auch als Folgewirkungen bekannt sind, Berücksichtigung finden (Okujava 2006, S. 289). Die Vorgehensweise bei der Erstellung der Wirkungsketten ist unternehmens- bzw. anwendungsfallspezifisch anzupassen, da es keinen allgemeingültigen Standard gibt. Das Verfahren ist dann beendet, wenn ein monetär quantifizierbarer Effekt identifiziert ist (Becker 2011, S. 81). Es lassen sich mit diesem Verfahren sowohl qualitative als auch quantitative Nutzenaspekte erfassen und bewerten (Becker 2011, S. 81 f.). Abbildung 10 verdeutlicht schematisch die Vorgehensweise bei einer Wirkungskettenanalyse am Beispiel eines IT-Systems.

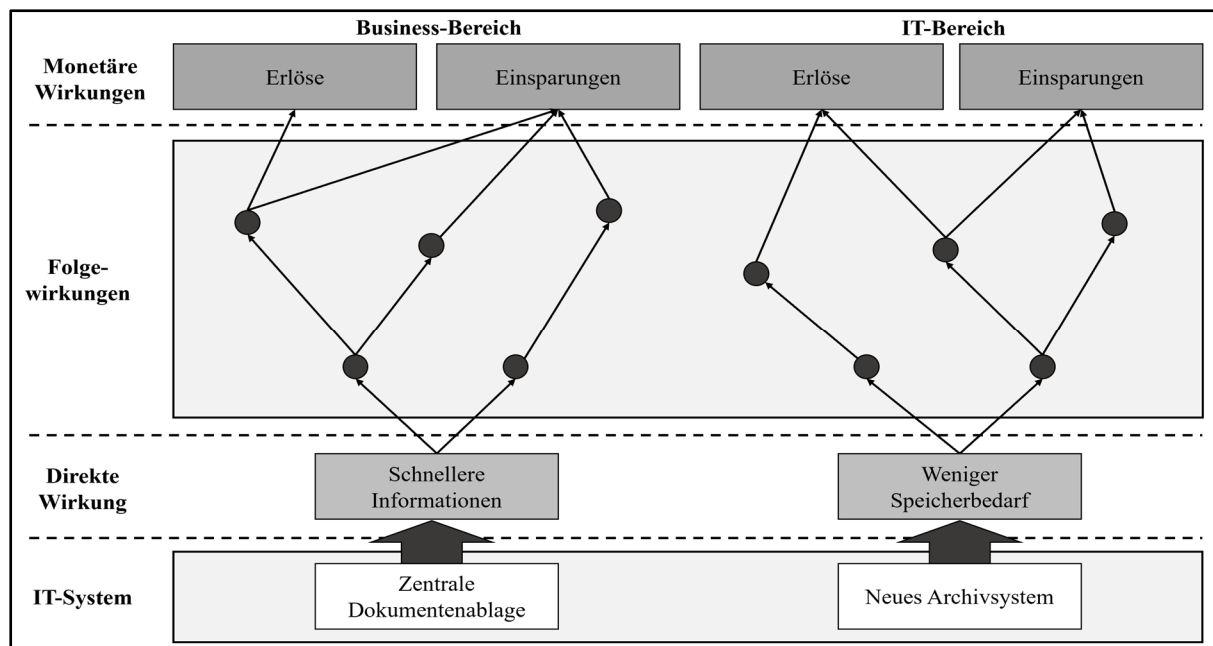


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Wirkungskette nach Kesten (Kesten et al. 2006, S. 12)

### ***Nutzenliste***

Die von Okujava (2006) entwickelte „Nutzenmatrix“ basiert auf der Erstellung einer Nutzenliste und hat das Ziel, eine möglichst umfangreiche Aufstellung von Nutzenaspekten durch eine strukturierte Literaturrecherche sowie eine empirische Erhebung zu generieren (Becker 2011, S. 83). Die Matrix umfasst zwei Dimensionen. Die erste Dimension ist eine sachlogische Dimension, die in zehn Kategorien eingeteilt wird. Diese sind: Strategie, Finanzen, Prozesse, Organisation, Technologie und Technik, Beziehungen zur Umwelt, Informationsversorgung, Flexibilität, Produkte sowie Dienstleistungen und persönliche Faktoren. Die zweite Dimension bezieht sich auf die Interessengruppen der Nutzenaspekte, die aus drei Kategorien besteht. Diese sind: In-, Zwischen- und Umsystem. Die Einordnung von Nutzenaspekten in die Matrix ermöglicht eine Systematisierung im betrieblichen Kontext sowie eine Abgrenzung zueinander (Okujava 2006, S. 114).

### ***Prozessbezogene Verfahren***

Das Monetarisierungsverfahren basiert auf der Kalkulation eines zeitlichen Äquivalents, welches die zeitliche Einsparung einer IT-Lösung widerspiegelt. Die eingesparte Arbeitszeit wird dabei über Stundensätze in Personalkosten umgerechnet (Becker 2011, S. 96). Laut Sassone (1987) ist das „Cost-Benefit Methodology“ genannte Verfahren allerdings nur für die finanzielle Validierung von „Office Information Systems“ anwendbar (Sassone, 1987, S. 273 ff.). In der Praxis häufig angewendet, da gut kalkulier- und nachvollziehbar, fehlt die Berücksichtigung der Verwendung der eingesparten Zeit. Was dazu führt, dass teilweise keine budgetwirksamen Einsparungen entstehen (Kesten et al. 2006, S. 11 f.). Ferner besteht nach

Pietsch (2003) die Möglichkeit, dass lediglich „latentes vorhandenes Potenzial“ entsteht (Pietsch 2003, S. 133). Trotzdem bietet das Monetarisierungsverfahren eine transparente und praxistaugliche Lösung, um Nutzen finanziell messbar zu machen.

Als Weiterentwicklung führt Sassone das „Hedonic Wage Modell“ an, welches impliziert, dass durch die Einführung von IT-Systemen niederwertige Tätigkeiten eliminiert und durch höherwertige Tätigkeiten ersetzt werden können. Durch die Tätigkeitsgewichtung hinsichtlich Produktivität und einer auf Stundensätzen basierten monetären Quantifizierung der Tätigkeiten je Mitarbeiter, kann über den Vorher-Nachher-Vergleich der Tätigkeitsprofile die gestiegene Prozessqualität nachgewiesen werden (Sassone, 1987, S. 283 ff.). Der Nachteil des Ansatzes liegt in der subjektiven Bewertung und der Mischung von qualitativen und quantitativen Merkmalen begründet, ähnlich der Nutzwertanalyse (Kesten et al. 2006, S. 11 f.). Die Höherwertigkeit von Tätigkeiten der Mitarbeiter durch die Einführung von IT-Systemen unterliegt in der Praxis einer Vielzahl an Einflussfaktoren und muss im jeweiligen Einzelfall untersucht werden. Zudem verhindert die Mischung aus qualitativen und quantitativen Merkmalen das Ziel der Monetarisierung von Nutzenaspekten.

## 2.5 Grundlagen zu Forschungsmethoden

Grundlegend lassen sich zwei Forschungsrichtungen definieren (Schumann 2018, S. 147 f.). Die qualitative Forschung orientiert sich am Vorbild der Naturwissenschaften und versucht in natürlichen Forschungsumgebungen mittels induktiver Vorgehensweise theoretische Verallgemeinerungen interpretationsbedürftiger Daten zu erzielen (Röbken und Mitschke 2022, S. 15). Dabei werden empirische Untersuchungen in Form von Beobachtungen oder Befragungen verwendet, um durch die Beschreibung und Interpretation der erlebbaren Realität wissenschaftliche Fragestellungen zu beantworten. Bei der qualitativen Forschung steht das Subjekt im Zentrum der holistischen Forschung (Schumann 2018, S. 148).

Die Methoden der qualitativen Datenerhebung zeichnen sich dadurch aus, dass zumeist kleine, jedoch möglichst repräsentative Stichproben erhoben werden. Ziel hierbei ist es, tiefere Einblicke in die Entscheidungskriterien und Motivationsstrukturen der Zielgruppe zu gewinnen. Neben Interviews gehören auch Gruppengespräche und Beobachtungslogiken zu den Methoden der qualitativen Forschung (Qualtrics 2020).

Die quantitative Forschung unterliegt dem Vorbild der Geisteswissenschaften (Regelmann 2019, S. 157) und nutzt Laborbedingungen und deduktive Vorgehensweisen zur Kausalerklärung von numerischen Massendaten. Im Kern geht es um die statistische Absicherung von Untersuchungsergebnissen in Form von Verallgemeinerungen unter dem

Gesichtspunkt der Kausalität (Schumann 2018, S. 151) mittels standardisierter, objektiver Messinstrumente und Forschungssystematiken (Röbken und Mitschke 2022, S. 15; Schumann 2018, S. 148).

Quantitative Forschungsmethoden erfordern in erster Linie eine große Anzahl an Daten, um die statistische Absicherung der Ergebnisse zu erreichen. Hierzu müssen Forschungsschwerpunkte dezidiert gesetzt werden. Die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit spannen eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungsfelder auf, welche darauf ausgerichtet sind, einen allgemeingültigen Ansatz zur Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik zu entwickeln. Durch den breit angelegten Untersuchungsrahmen können im Rahmen dieser Arbeit nicht genügend Daten zu jeder Forschungsfrage erhoben werden, um fundierte quantitative Analysen durchzuführen und statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erzeugen. Daher werden im weiteren Verlauf des Kapitels die relevanten Methoden der qualitativen Forschung vorgestellt.

### 2.5.1 Experteninterviews

Experteninterviews gehören zu den klassischen qualitativen Datenerhebungsmethodiken (Mieg und Näf 2005, S. 5), die wiederum ein Teilgebiet der Primärforschung repräsentieren. Innerhalb der Primärforschung werden einzigartige, bisher nicht vorhandene Daten erhoben und ausgewertet, um komplexe Forschungsfragen zu beantworten (Wübbenhorst 2018). Experteninterviews sind eine spezielle Form der qualitativen Datenerhebung, bei der Einzelpersonen in Hinblick auf den Status als Experte befragt werden. Die Grundannahme besteht dabei darin, dass Experten spezifisches Wissen zu einem Themengebiet besitzen und somit auch über Entscheidungskompetenzen verfügen (ViLes 2019). Jedoch herrscht wenig Einigkeit darüber, wer als Experte bezeichnet werden darf und wer nicht. Generell gilt, dass Experten Personen mit einem besonderen Ausbildungshintergrund oder einer spezifischen Stellung innerhalb einer Institution sind und zumeist einen überdurchschnittlichen Erfahrungsschatz aufweisen (Mieg und Näf 2005, S. 6). Um die Experteninterviews möglichst standardisiert ablaufen zu lassen, alle Fragen vollständig abzuhandeln (Mieg und Näf 2005, S. 10) und eine erleichterte Auswertung sicherzustellen ist ein Interviewleitfaden zu erstellen. Dabei ist auf klare Strukturen und einen logischen Aufbau zu achten. Zudem sollten vorrangig Einschätzungsfragen gestellt werden, um die Antwortmöglichkeiten des Experten nicht zu stark einzuengen (Universität Trier 2002, S. 3). Das eigentliche Interview beginnt mit einer Vorstellung der Teilnehmer und einer thematischen Einführung. Danach wird anhand des Leitfadens die Einschätzung des Experten erfragt. Nach jeder Frage besteht die Möglichkeit für

immanente, exmanente und Deutungsfragen, bevor das Interview beendet wird (Universität Leipzig 2019). Für eine möglichst objektive Auswertung der Antworten ist die vollständige Aufnahme des Interviews unerlässlich. Diese kann anschließend transkribiert und systematisch ausgewertet werden (Universität Trier 2002, S. 5 ff.).

### 2.5.2 Focus Group Methodik

Focus Groups fallen traditionell in den Geltungsbereich der qualitativen Forschungsverfahren (Hennink 2014, S. 1). In den 1920er Jahren zum ersten Mal erwähnt, im Rahmen von sozialwissenschaftlichen Untersuchungen in den 1930er Jahren spezifiziert und breite Bekanntheit in den 1950er Jahren durch den großflächigen Einsatz bei der Marktforschung erlangt, sind Focus Group Modelle heute in unterschiedlichen akademischen Disziplinen im flächendeckenden Einsatz (Hennink 2014, S. 4).

In erster Linie sind Focus Groups einfache, unstrukturierte, quantitative Diskussionen einer kleinen Anzahl an vorausgewählten Personen zu einem spezifischen Themenfeld oder einer praxisrelevanten bzw. wissenschaftlichen Fragestellung (Silverman 2004, S. 177). Der Einsatzbereich von Focus Groups ist demzufolge sehr breit gestreut und reicht von explorativen Untersuchungen über erklärende und evaluierende Analysen bis hin zu entwicklungsbasierten Fragestellungen (Hennink 2014, S. 16).

Das Ziel einer Focus Group im ingenieurwissenschaftlichen Kontext ist stets die Generierung von Erkenntnissen zu spezifischen Fragestellungen aus der Diskussion heraus und nicht die Identifikation und Analyse von bspw. gruppenspezifischen Phänomenen (Carey und Asbury 2016, S. 15). Dabei muss kein Konsens innerhalb der Gruppe erzeugt werden. Vielmehr kann auch die Identifikation von unterschiedlichen Perspektiven zu einer spezifischen Fragestellung im Mittelpunkt stehen (Hennink 2014, S. 2). Ursprünglich waren Focus Groups einmalige Sessions mit einander unbekanntem Teilnehmern. Allerdings hat sich die Art der Durchführung in den vergangenen Jahrzehnten stark verändert, sodass heute zumeist mehrere Sessions mit untereinander teilweise bekannten Personen durchgeführt werden (Carey und Asbury 2016, S. 16).

Typischerweise umfassen Focus Groups zwischen 5 und 10 Personen, die einen gemeinsamen Hintergrund haben oder Erfahrungen zu einem spezifischen Untersuchungsgebiet aufweisen. Die Eingrenzung des Untersuchungsbereichs im Vorfeld der Durchführung sowie die moderierte Durchführung sind als wichtige Erfolgskriterien einzustufen (Silverman 2004, S. 177 f.). Focus Groups sind generell als effizientes und flexibles Forschungsverfahren einzustufen (Silverman 2004, S. 178 f.). Im Vergleich zu zeitaufwendigen Einzel-

Experteninterviews können im Rahmen einer Focus Group Session circa 70 Prozent der übereinstimmenden Inhalte ermittelt werden. Ferner liegt die Besonderheit darin, dass durch intensive Diskussionen Daten generiert werden, die durch Experteninterviews nicht generiert werden können (Hennink 2014, S. 2 f.).

### 2.5.3 Literaturanalyse

Die Literaturanalyse entstammt ursprünglich der Methodenwelt der quantitativen respektive quantifizierenden empirischen Sozialforschung, die auf Basis von formalen Aspekten statistische Signifikanzen ermittelt (Münster 2014, S. 85). Das Ziel der qualitativen Literaturanalyse dagegen liegt in der Zusammenfassung, Bewertung und Integration ähnlicher Ergebnisse und Herangehensweisen an eine Problemstellung. Vorhandenes Wissen soll so strukturiert und die Möglichkeit geschaffen werden, darauf aufzubauen bzw. Forschungsbedarfe abzuleiten (Lindner 2017).

Bei der qualitativen Literaturanalyse nach Mayring (2010), in der Fachliteratur auch als qualitative Inhaltsanalyse bezeichnet, findet die Entwicklung oder die Bestätigung einer Hypothese oder Forschungsfrage auf Grundlage relevanter Literatur statt (Bortz und Döring 2005, S. 329 ff.). Dies geschieht durch eine komplexitätsreduzierte Analyse unterschiedlicher relevanter Quellen auf Basis eines Kategoriensystems. Der Begriff Kategorie ist hierbei sehr weit gefasst (Meier 2014). Eine Kategorie wird als „ein Bezeichner (oder etwas Bezeichnendes) verstanden, dem Textstellen [oder Textbereiche] zugeordnet werden“ (Kukartz 2007, S. 57). Letztendlich geht es um die Ordnung von Inhalten nach vorgegeben Kriterien.

## 2.6 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen ist es von zentraler Bedeutung, dass Schwerpunkte im Betrachtungsbereich sowie Gültigkeiten in Bezug auf die spätere Anwendbarkeit des zu entwickelnden Vorgehensmodells festgelegt werden (Schlüter 2020, S. 59). Zudem wird von Malone und Crowston (1994) bei der Aufstellung eines Vorgehensmodells gefordert, spezielle Bestandteile der Realität zur Reduzierung der Komplexität auszuschließen (Malone und Crowston 1994, S. 100). Die Abgrenzung des Untersuchungsbereichs für die vorliegende Arbeit ist in Form eines morphologischen Kastens in Abbildung 11 zusammengefasst. Die Darstellung orientiert sich an den Problemstellungen der ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik sowie den in Kapitel 2 gelegten theoretischen Grundlagen.

Merkmale	Ausprägung				
Netzwerkstufe	Lieferant	Logistikdienstleister	OEM	Kunde	
Geschäftsbereichsebene	Vertrieb	Personal	Produktion & Logistik	Beschaffung	Technische Entwicklung
Unternehmensbereiche	Direkte Bereiche			Indirekte Bereiche	
Vorgehensmodell	Phasenorientiertes Modell	Inkrementelles Modell		Prototyping	Agiles Modell
Managementperspektive	Ziel	Planung	Entscheidung	Realisierung	Überwachung
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	Aufwand			Nutzen	
Bewertungsmethode	Qualitativ			Quantitativ	
Investitionstheorie	Absolute Vorteilhaftigkeit			Relative Vorteilhaftigkeit	
	Betrachtet			Nicht betrachtet	

Abbildung 11: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Als Grundlage zur Entwicklung einer ex-ante Investitionsbewertung für Industrie 4.0 Lösungen wird der größte und bedeutendste Industriezweig Deutschlands (BMW 2021) mit den OEMs als letztes Glieder in der Wertschöpfungskette gewählt. Da die Nutzenerwartung durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen in den Bereichen Produktion und Logistik am höchsten ist (Goschy und Rohrbach 2017, S. 21; Haas und Negele 2018, S. 19; Kagermann et al. 2016, S. 6), wird dieser Schwerpunktbereich gesetzt. Da Industrie 4.0 Anwendungen sowohl in direkten wie auch in indirekten Bereichen Anwendung finden, werden Projekte aus beiden Unternehmensbereichen analysiert. Es gilt ein phasenorientiertes Vorgehensmodell zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen zu entwickeln, welches im betrieblichen Umfeld effizient angewendet werden kann. Dabei sollen gemäß „Dortmunder Management-Modell der Industrie 4.0“ (Henke et al. 2018) die Definition von Zielen, die Planung sowie die Entscheidung hinsichtlich einer Industrie 4.0 Investition im Rahmen der Managementperspektive fokussiert werden. Hervorzuheben ist hierbei der Schwerpunkt in Bezug auf das investitionstheoretische Prinzip der Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Industrie 4.0 Investition. Zudem sollen sowohl Aufwand als auch Nutzen betrachtet werden. Dabei gilt es eine ausschließlich quantitatives Vorgehensmodell zu entwickeln. Die Vorgestellte Eingrenzung definiert den Gültigkeitsbereich des zu entwickelnden Vorgehensmodells.

## 2.7 Zwischenergebnis: Grundlagen und theoretische Einordnung

Im ersten Teil des Kapitels konnten die Potenziale der Industrie 4.0 für die deutsche Wirtschaft erläutert werden. Die Studienergebnisse der BITKOM, Staufen AG, des Fraunhofer IAO und von PWC zeigen eindrucksvoll, dass durch die flächendeckende Umsetzung von Industrie 4.0 Produktivitätssteigerungen in Milliardenhöhe erreicht werden können (Bauer et al. 2014, S. 8). Gleichzeitig wird durch die Abgrenzung der Begriffe Industrie 4.0, Digitalisierung, CPS, DES und Internet der Dinge klar, dass in der Literatur keine Einigkeit über die Definition des Begriffs Industrie 4.0 sowie deren Abgrenzung zu anderen Fachbegriffen herrscht. Um diesem Problem auf der Ebene des Anwendungsfalls zu begegnen, konnten aus übereinstimmenden Inhalten der Literatur 5 Kriterien definiert werden, die eine Industrie 4.0 Lösung definieren, die wiederum zur Auswahl geeigneter Praxisprojekte zu verwenden sind.

Weiterhin konnten auf Basis einer qualitativen Literaturrecherche sechsunddreißig Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Anwendungen identifiziert werden, die als Grundlage des Leitfadens für Experteninterviews mit Projektleiter aus dem industriellen Umfeld herangezogen werden.

Die Abgrenzung der direkten und indirekten Unternehmensbereiche ergab signifikante, strukturelle, prozessuale und mitarbeiterbezogene Unterschiede. Dadurch ist eine Untersuchung in Hinblick auf die Notwendigkeit einer separaten Entwicklung einer Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in direkten und indirekten Bereichen als notwendig einzustufen.

Die Kapitel Grundlagen der Entscheidungstheorie, Grundlagen der Investitionsrechnung und Grundlagen zu Forschungsmethoden dienen der Vorstellung von Verfahren zur Berücksichtigung von Unsicherheit im Investitionsbewertungsprozess, Kalkulation von Finanzkennzahlen und Methoden zur Datenerhebung, die nach weiteren Untersuchungen in Kapitel 4.4 Einzug in ein Vorgehensmodell zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen finden.

Die detaillierte Abgrenzung des Untersuchungs- und Festlegung des Gültigkeitsbereichs der zu entwickelnden ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik schließt das Kapitel ab.

Im folgenden Kapitel wird auf Basis der wissenschaftlichen Grundlagen und der Eingrenzung des Untersuchungsbereiches der Stand der Wissenschaft vorgestellt und anschließend der Forschungsbedarf abgeleitet.

## 3 Stand der Forschung und Wissenschaft zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Lösungen

Die Inhalte von Kapitel 3 weisen große Bedeutung für die Arbeit auf, da nicht nur die Ableitung der Forschungsfragen auf Basis der Vorstellung und Analyse ausgewählter Ansätze zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Lösungen in Kapitel 3.5 erfolgt, sondern auch die Konkretisierung der Anforderungen und Ermittlung der relevanten Bewertungsschritte für eine ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Kapitel 4.4 daraus abgeleitet werden. Der Umfang des Kapitels ist erforderlich, um der Vielzahl an unterschiedlichen Bewertungsansätzen und Vorgehensweisen für Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Lösungen Rechnung zu tragen und die Breite der wissenschaftlichen Diskussion aufzuzeigen.

### 3.1 Entwicklung eines Anforderungskatalogs für das Vorgehensmodell

In diesem Kapitel wird auf Basis der vorgestellten Problemstellungen und Forschungsziele ein Anforderungskatalog für das zu entwickelnde Vorgehensmodell zur ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen aufgebaut. Der Anforderungskatalog dient ebenfalls dazu, den aktuellen Stand der Forschung und Wissenschaft vergleichend zu bewerten.

#### **AK 1: Gültigkeit für Industrie 4.0 Lösungen in den Bereichen Produktion und Logistik**

Wie in Kapitel 2.6 vorgestellt, liegt der Schwerpunkt des zu entwickelnden Modells auf den Bereichen Produktion und Logistik, sodass sich die Gültigkeit und Anwendbarkeit des zu entwickelnden Vorgehensmodells insbesondere darauf beziehen muss. Prinzipiell gilt es dabei ein allgemeingültiges Modell für die definierten Bereiche zu entwickeln.

#### **AK 2: Entwicklung eines praxistauglichen, strukturierten Vorgehens- und Entscheidungsmodells für operative Endanwender**

Um den Anforderungen einer effizienten praktischen Anwendung im betrieblichen Umfeld Rechnung zu tragen, gilt es ein strukturiertes, systematisches und unterstützendes Vorgehensmodell für operative Endanwender zu entwickeln. Dabei ist es von Bedeutung, dass ein gesamtheitliches Vorgehensmodell entwickelt werden soll, welches alle Problemstellungen aus Kapitel 1.1 adressiert.

### **AK 3: Berücksichtigung von Kosten-/Nutzenaspekten als Eingangsgrößen für eine Kosten-/Nutzenanalyse (AK 3)**

Gemäß Forschungsfrage 1 gilt es die relevanten Kosten- und Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen zu identifizieren, die als Eingangsgrößen für eine Kosten-/Nutzenanalyse verwendet werden können und den operativen Endanwendern als Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung stehen, um eine möglichst vollumfängliche Kosten-/Nutzenbewertung durchführen zu können.

### **AK 4: Systematisierungslogik für Kosten- und Nutzenaspekte zur Komplexitätsreduzierung**

Aufgrund der Vielzahl an Nutzenaspekten für Industrie 4.0 Lösungen in der aktuellen Literatur gilt es eine Systematisierung zur Komplexitätsreduzierung zu entwickeln, die es operativen Endanwendern erleichtert, die für ihr Projekt relevanten Nutzenaspekte effizient auszuwählen. Forschungsfrage 2 zielt darauf ab, eine praxistaugliche Systematisierungslogik aufzubauen.

### **AK 5: Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten**

Um Forschungsfrage 3 beantworten zu können, muss das zu entwickelnde Vorgehensmodell eine Methodik zur Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten aufzeigen, um dem betrieblichen „ROI-Zwang“ und der damit verbundenen rein quantitativen Entscheidungsfindung in der betrieblichen Praxis zu entsprechen.

### **AK 6: Bibliotheken mit Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten für Nutzenaspekte**

Die Verwendbarkeit von wissenschaftlichen Vorgehensmodellen stößt in der Praxis häufig an Grenzen. Insbesondere die Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten kann als langwieriger Prozess betrachtet werden, für den in der betrieblichen Praxis oftmals die Zeit und das Know-how fehlen. Daher gilt es Bibliotheken aufzubauen, die dem Endanwender Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten der einzelnen Nutzenaspekte vorgeben, sodass lediglich ein Auswahlprozess stattfinden muss. Nur in Einzelfällen ist auf ein wissenschaftliches Vorgehensmodell zurückzugreifen. Bibliotheken fördern die Operationalisierung von Nutzenaspekten und vereinfachen den Bewertungsprozess für den Endanwender gleichermaßen.

### **AK 7: Berücksichtigung von Anforderungen aus direkten und indirekten Unternehmensbereichen bei der Kosten-/Nutzenbewertung**

Forschungsfrage 4 zielt drauf ab herauszuarbeiten, ob Industrie 4.0 Lösungen in direkten und indirekten Bereichen unterschiedliche Anforderungen an eine Kosten-/Nutzenanalyse stellen.

Hierbei steht die Frage im Mittelpunkt, ob die relevanten Kosten- und Nutzenaspekte signifikant voneinander abweichen, sodass eine individuelle Kosten-/Nutzenanalyse zu entwickeln ist.

#### **AK 8: Beitrag zur Schaffung synchroner IT-Systemlandschaften inklusive Technologieauswahl**

Damit Industrie 4.0 Lösungen die volle Wirksamkeit entfalten können, müssen alle Daten eines bspw. Fertigungssystems im Sinne der umfassenden Vernetzung jederzeit zur Verfügung stehen. Um zu verhindern, dass durch die singuläre Auswahl einer Industrie 4.0 Technologie ohne Prüfung der architektonischen Interdependenzen asynchrone IT-Systemlandschaften entstehen, die einen echtzeitfähigen Datenaustausch verhindern, ist es von zentraler Bedeutung, dass der zu entwickelnde Ansatz diese Anforderung erfüllt.

#### **AK 9: Berücksichtigung von Unsicherheiten und Risiken bei der Investitionsbewertung**

Zur Bewältigung des Unsicherheitsproblems muss das Vorgehensmodell eine geeignete Methodik beinhalten, die es ermöglicht, Risiken und mögliche Umweltzustände im Projektverlauf auf angemessen zu quantifizieren. Hierbei gilt es aufzuzeigen, welche monetären Auswirkungen Veränderungen im Projektverlauf auf die Wirtschaftlichkeit der Investition haben.

#### **AK 10: Einbeziehung geeigneter Methoden zur Prozessvisualisierung und -optimierung**

Um den quantitativen und idealerweise monetären Einfluss einer Prozessveränderung durch die Implementierung einer Industrie 4.0 Lösung zu ermitteln, werden häufig Prozessanalyseverfahren angewendet (Günter et al. 2021, S. 2; Obermeier et al. 2015, S. 487 f.). Auch das zu entwickelnde Vorgehensmodell muss die Möglichkeit zur Prozessanalyse bieten, um die prozessbezogenen Veränderungen zwischen Ist und Soll-Zustand der zu bewertenden Industrie 4.0 Lösung strukturiert analysieren zu können.

#### **AK 11: Grobbeschreibung des Investitionsvorhabens zur Sicherstellung der Projektreife**

Um sicherzustellen, dass lediglich gefestigte Projektvorhaben mit entsprechenden Personalressourcen, Abstimmungsständen und technischem sowie organisatorischem Know-how Einzug in das Vorgehensmodell erhalten, sind formale Projektbeschreibungen zu erstellen. Der daraus resultierende Reifegradnachweis des Vorhabens stellt sicher, dass sich der Aufwand zur Abarbeitung des Vorgehensmodells zur ex-ante Investitionsbewertung lohnt und nicht unnötig Ressourcen bindet.

## **AK 12: Abschließende Investitionsbewertung mittels relevanter Investitionsrechenverfahren**

Um die Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Investition überhaupt durchführen zu können, sind entsprechende Investitionsrechenverfahren anzuwenden, um auf Basis der Prämissen des Finanzcontrollings und der Bewertungsergebnisse eine abschließende Investitionsentscheidungen treffen zu können.

Die nachfolgende Tabelle 3 fasst die zwölf Anforderungskriterien in einer Darstellung übersichtlich zusammen.

<b>Kriterien</b>	<b>Anforderung</b>
<b>AK 1</b>	Gültigkeit für Industrie 4.0 Lösungen in den Bereichen Produktion und Logistik
<b>AK 2</b>	Entwicklung eines praxistauglichen, strukturierten Vorgehens- und Entscheidungsmodells für operative Endanwender
<b>AK 3</b>	Berücksichtigung von relevanten Kosten-/Nutzenaspekten als Eingangsgrößen für eine Kosten-/Nutzenanalyse
<b>AK 4</b>	Systematisierungslogik für Kosten-/Nutzenaspekte zur Komplexitätsreduzierung
<b>AK 5</b>	Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten
<b>AK 6</b>	Bibliotheken mit Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten für Nutzenaspekte
<b>AK 7</b>	Berücksichtigung von Anforderungen aus direkten und indirekten Unternehmensbereichen bei der Kosten-/Nutzenbewertung
<b>AK 8</b>	Beitrag zur Schaffung synchroner IT-Systemlandschaften inkl. Technologieauswahl
<b>AK 9</b>	Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Investitionsbewertung
<b>AK 10</b>	Einbeziehung geeigneter Methoden zur Prozessvisualisierung und -optimierung
<b>AK 11</b>	Grobbeschreibung des Investitionsvorhabens
<b>AK 12</b>	Abschließende Investitionsbewertung mittels relevanter Investitionsrechenverfahren

Tabelle 3: Anforderungskriterien für das zu entwickelnde Vorgehensmodell

### **3.2 Nationale Bewertungsansätze für Industrie 4.0 Investitionen**

Da der Begriff der Industrie 4.0 ursprünglich aus dem deutschsprachigen Raum stammt und im internationalen Kontext als „IoT“ oder „digitalization“ verstanden wird (Gloy 2020, S. 1 f.), umfasst dieses Kapitel ausgewählte Veröffentlichungen von deutschsprachigen Bewertungsansätzen mit dem Schwerpunkt der Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen. Zur Identifikation relevanter Literatur wurden Google Scholar, Google Web Search und die Hochschulbibliothek der TU-Dortmund verwendet. Dabei erfolgte die Suche mittels der Suchkriterien „Industrie 4.0“ und „Investitionsbewertung“ sowie „Vorgehensmodell“ und „Wirtschaftlichkeitsanalyse“. Es wurden Beiträge mit dem Erscheinungsjahr zwischen 2014 und 2021 ausgewählt.

## **Konzeption einer Prozess- und Potenzialanalyse zur ex-ante Beurteilung von Industrie 4.0 Investitionen nach Obermeier et al. (2015)**

Der Bewertungsansatz von Obermeier et al. (2015) für eine Prozess- und Potenzialanalyse zur ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen stützt sich im ersten Schritt auf die Grundlogik des Prozessmanagements. Hierbei gilt es den Ist-Zustand eines bereits vorhandenen Prozesses zu erfassen und in all seinen Teilbereichen inklusive Prozessbeteiligten und Schnittstellen zu visualisieren. Auf Basis dieser Darstellung kann nun mit den Prozessexperten der Ist-Zustand auf Schwachstellen untersucht werden. Diese Schwachstellen werden anschließend mit den Prozessexperten im Detail analysiert und Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet, adressiert und terminiert. Obermeier et al. sprechen in diesem Zusammenhang von der Definition von Anforderungen an das Soll-Konzept. Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den ersten beiden Schritten werden anschließend zur Konzeptionierung des Soll-Zustandes herangezogen. Ziel eines Soll-Zustandes sollte stets die Darstellung eines in der Zukunft liegenden, optimierten Prozesses sein. Wie bei der Ist-Prozessdarstellung auch, werden alle Teilelemente, Prozessbeteiligten und Schnittstellen erfasst und visualisiert. Schritt vier des Ansatzes umfasst einen Soll-Ist-Vergleich mit dem Ziel, prozessrelevante Kennzahlen und Wirtschaftlichkeitspotenziale, die im Zusammenhang mit der Investition beeinflussbar sind, zu identifizieren. Beispiele hierfür sind die „Overall Equipment Effectiveness“ (OEE)<sup>19</sup>, die Prozessqualität oder die Prozessdurchlaufzeit (Obermeier et al. 2015, S. 487 f.). Schritt fünf des Ansatzes beinhaltet die Potenzialanalyse, deren Basis die Erkenntnisse aus Schritt vier sind. Zunächst werden die Problemursachen je Prozessbeteiligtem aufgelistet und mit einer kurzen Erläuterung versehen. Anschließend erfolgten die Beschreibung und Quantifizierung der jeweiligen Nutzenaspekte. Hierbei wird ausschließlich von Produktivitätssteigerungen durch Zeiteinsparungen ausgegangen. Abschließend erfolgt eine Monetarisierung der zuvor ermittelten zeitlichen Einsparungen mittels eines spezifischen Kostensatzes. Da je nach Nutzenaspekt nicht nur quantitative Bewertungen vorgenommen werden können, beziehen Obermeier et al. die qualitative Wirkung von quantitativ messbaren Nutzenaspekten in den Ansatz mit ein. Hierzu können die qualitativen Einsparungen in textueller Form beschrieben werden. Danach erfolgt eine Auswahl, ob der qualitative Nutzen in den Bereichen Produktqualität, Prozessqualität, Termintreue, Flexibilität, Transparenz, Standardisierung wirksam wird oder nicht. Hierfür steht lediglich eine binäre Entscheidung, bestehend aus ja

---

<sup>19</sup> Die Overall Equipment Effectiveness (OEE) ist eine komplexe, weit verbreitete Produktionskennzahl, die sich aus den Elementen Verfügbarkeit, Produktivität und Qualität zusammensetzt und somit eine dreidimensionale Kennzahl darstellt (REFA AG 2020 c).

oder nein zur Verfügung. Abschließend besteht die Möglichkeit den zuvor spezifizierten Nutzen auf einer Skala von eins bis fünf gemäß der Bedeutung für den eigenen Prozess nochmals zu bewerten, um einen individuellen Gewichtungsfaktor in die Bewertung mit aufzunehmen zu können. Dieser Bewertungsprozess der qualitativen und quantitativen Nutzenaspekte sowie deren konkreter Wirkung wird nun von allen Prozessbeteiligten individuell vorgenommen und in einer Übersichtstabelle zusammengefasst (Obermeier et al. 2015 , S. 489 f.). Die Zusammenführung der Einzelbewertungen erfolgt in einer separaten Tabelle. Diese Tabelle berücksichtigt die kumulierten Einsparungen in Stunden und in Euro. Zusätzlich werden die qualitativen Nutzenaspekte von allen Prozessbeteiligten auf einer Skala von null bis hundert bewertet und anschließend kumuliert dargestellt. Eine direkte Zusammenführung von monetären und qualitativen Nutzenaspekten findet bei diesem Bewertungsansatz nicht statt (Obermeier et al. 2015, S. 491).

### **Ansatz zur ökonomischen Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen nach Günter et al. (2021)**

Der im Rahmen einer Focus Group am Fraunhofer IML in Zusammenarbeit mit Praxispartnern aus der Industrie entwickelte Ansatz umfasst sechs Schritte (Günter et al. 2021, S. 2). Die Vorgehensweise ist in Abbildung 12 dargestellt.

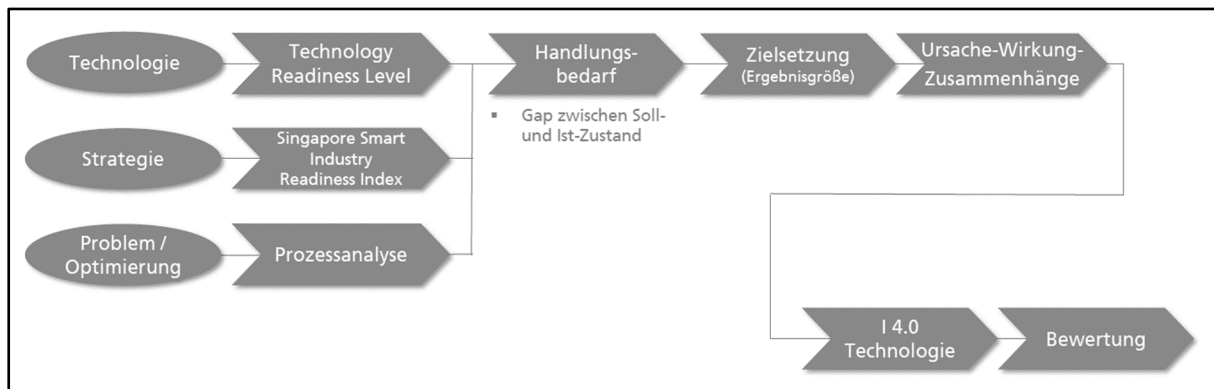


Abbildung 12: Bewertungsleitfaden zur ökonomischen Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen nach Günter et al. (Günter et al. 2021, S. 2)

Auffällig sind die drei möglichen Einstiegspunkte in einen Bewertungsprozess für Industrie 4.0 Lösungen sowie der jeweils daraus resultierende erste Prozessschritt. Es besteht die Möglichkeit, dass auf Basis einer speziellen neuen Technologie, die beispielsweise auf einer Messe identifiziert werden konnte, eine Implementierung im Unternehmen anzustreben. Daran anschließend findet eine Bewertung der Technologie im Rahmen eines „Technology Readiness Level Checks“ statt, welcher dem Unternehmen den Reifegrad der jeweiligen Technologie und

den damit verbunden Implementierungsaufwand im Unternehmen aufzeigt (Grande, 2013, S. 97). Wenn ein Unternehmen aus strategischen Gründen bspw. zur Erreichung einer Technologieführerschaft Industrie 4.0 Anwendungen implementieren möchte, ohne jedoch einen genauen Anhaltspunkt über die relevanten Unternehmensbereiche oder Technologien zu haben, hilft der „Singapur Smart Industry Readiness Index“ (Bhunia, 2017). Dieser Index verfolgt eine relativ komplexe Logik mit dem Ziel, diejenigen Unternehmensbereiche zu identifizieren, in denen noch Handlungsbedarf besteht, um bspw. die Technologieführerschaft zu erreichen (Hauser 2020). Ein anderes Reifegradmodell, welches zur Erreichung strategischer Ziele im Industrie 4.0 Umfeld eingesetzt werden kann, ist der 2017 von der acatech veröffentlichte „Industrie 4.0 Maturity Index“, welcher die Entwicklungsschritte zu einem vollständig autonomen System beschreibt (Wahlster et al. 2017, S. 22).

Ein weiterer Startpunkt in einen Bewertungsprozess kann eine spezifische Problemstellung oder ein Optimierungsprojekt sein. Wie beim Ansatz von Obermeier et al. (2015) folgt drauf eine Prozessanalyse, bestehend aus einer Ist-Prozessaufnahme, Schwachstellenbetrachtung und Soll-Prozessdefinition (Fürmann 2014, S. 49 ff.).

Der letzte Startpunkt umfasst die Veränderung eines Geschäftsmodells, bspw. die Umstellung auf eine Plattformstrategie wie es E-Bay und Amazon praktizieren (Church 2017, S. 1. f.). Hierbei gilt es vielseitige Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Dies ermöglicht das „Business Model Canvas Modell“<sup>20</sup>, indem es alle relevanten Elemente in Bezug auf das Produkt, die Ressourcen, den Kunden, die Infrastruktur und die Finanzen beleuchtet (Ojasalo und Ojasalo, 2017). Als vergleichbarer Ansatz zur Messung der operativen Leistungsfähigkeit könnte hier auch die „Balanced Scorecard“ (BSC) Anwendung finden (Weber 2018 a).

Unabhängig von dem Startpunkt des Prozesses erfolgt in Schritt zwei die Ermittlung des Handlungsbedarfs. Dieser wird stets über eine Gap-Analyse zwischen Ist- und Soll-Zustand abgeleitet. Zudem erfolgt die Definition von konkreten Maßnahmen, um vom Ist- zum Soll-Zustand zu gelangen. An diesem Punkt fehlt jedoch noch die Festlegung der eigentlichen Zielstellung bzw. draus abgeleitet die Kosten- und Nutzenaspekte des Investitionsvorhabens. Hierzu bietet der Ansatz einen strukturierten Auswahlprozess, jedoch ausschließlich für Nutzenaspekte. Zunächst existieren bei den Nutzenaspekten drei unterschiedliche Klassen, welche die Kernaspekte der Industrie 4.0 darstellen (Günter et al. 2021, S. 6):

---

<sup>20</sup> „Der Business Model Canvas ist ein aus neun Elementen bestehendes Plakat (engl.: canvas = Leinwand) zur Definition und Dokumentation eines Geschäftsmodells.“ (Angermeier 2015)

## 1. Zielgrößen

In dieser Klasse sind die vier zentralen Ziele für Investitionsvorhaben im Industrie 4.0 Umfeld aufgeführt. Diese sind Produktivität, Flexibilität, Qualität und Wandlungsfähigkeit.

## 2. Ergebnisgrößen

Diese Klasse bildet die zweite Ebene und besteht aus 18 Ergebnisgrößen wie bspw. Reaktionsfähigkeit, Ressourceneffizienz oder Produktqualität. Es besteht eine direkte Zuordnung der Ergebnisgrößen zu den Zielgrößen. Dabei sind einzelne Ergebnisgrößen auch bei zwei oder mehr Zielgrößen zugeordnet. Die Ergebnisgrößen sind im Gegensatz zu den Zielgrößen direkt beeinflussbar und zahlen demzufolge in die Zielgrößen ein. In Abbildung 13 ist eine Übersicht der Zielgrößen mit den zugehörigen Ergebnisgrößen dargestellt.

## 3. Steuergrößen

Die dritte und letzte Ebene der Nutzenaspekte sind die insgesamt siebenunddreißig Steuergrößen. Wie bei den Ergebnisgrößen auch, können einzelne Steuergrößen mehreren Ergebnis- und somit auch Zielgrößen zugeordnet sein. Diese Größen lassen sich direkt beeinflussen und zahlen jeweils in die zugehörige Ergebnis- und Zielgröße ein. Die Steuergrößen sind als letzte Ebene definiert, da zu jeder Größe konkrete „Key Performance Indicators“ (KPIs) definiert werden können.

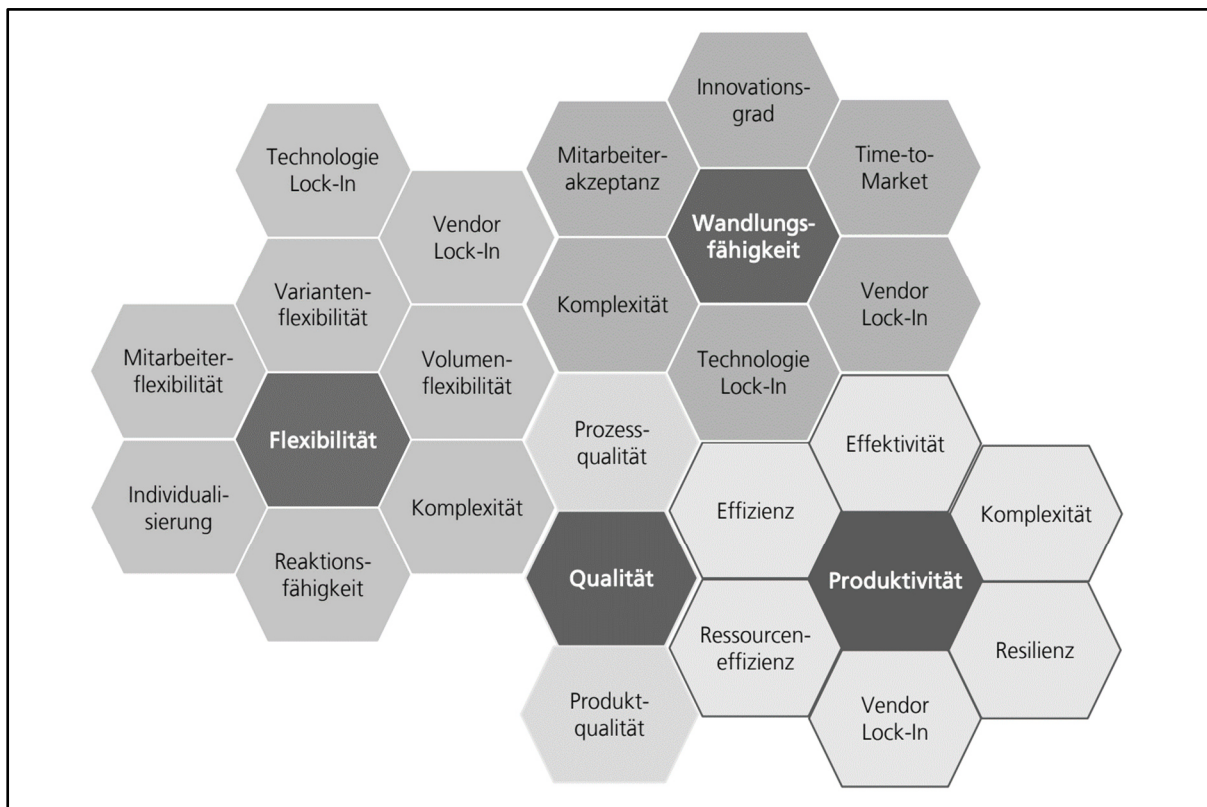


Abbildung 13: Ziel- und Ergebnisgrößen für Industrie 4.0 Anwendungen nach Günter et al. (Günter et al. 2021, S. 7)

Die Gesamtvorgehenslogik hinter diesem Prozessschritt basiert darauf, dass die drei Ebenen nacheinander durchlaufen werden und der Anwender die für seinen Use Case relevanten Nutzengrößen identifiziert und diese abschließend individuell mit messbaren KPIs hinterlegt, sodass eine grobe Nutzenermittlung erfolgen kann. Als Hilfestellung dafür können Steckbriefe je Steuergröße genutzt werden.

Der nächste Prozessschritt beinhaltet eine Betrachtung der Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen den einzelnen Ergebnis- und Steuergrößen. Hierbei geht es jedoch lediglich um das Aufzeigen von relativen Abhängigkeiten in Form von wirkt sich positiv aus bzw. wirkt sich negativ aus und hat keine direkte Abhängigkeit (Günter et al., 2021, S. 8).

Der vorletzte Bewertungsschritt der Technologieauswahl baut auf einer Datenbank auf, welche eine Zuordnung konkreter Problemstellungen zu geeignete Lösungstechnologien beinhaltet. Dadurch soll die Auswahl der passenden Industrie 4.0 Lösungen eingegrenzt bzw. erleichtert und der Bewertungsprozess erheblich beschleunigt werden (Günter et al., 2021, S. 9).

Im abschließenden Bewertungsschritt erfolgt die Überprüfung der ermittelten Kosten- und Nutzenstrukturen auf Grundlage der relevanten Steuergrößen in Hinblick auf die absolute oder relative Vorteilhaftigkeit der zu bewertenden Industrie 4.0 Lösung (Günter et al., 2021, S. 10).

#### **Industrie 4.0: Implement IT-Ansatz nach Schuh et al. (2018)**

Analog zu anderen Konzepten einer Bewertung von Use Cases im Industrie 4.0 Umfeld, teilen auch Schuh et al. (2018) die Vorgehensweise in drei Stufen ein (Schuh et al. 2018, S. 41).

Schritt eins stellt eine Vorprüfung des Use Cases dar. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um eine formale Vorprüfung auf Vollständigkeit und Aktualität von bewertungsrelevanten Informationen des Use Cases. Hierbei verweisen Schuh et al. auf fünf zentrale Voraussetzungen: Das Konzept ist ausreichend präzisiert, relevante Informationen liegen vor und sind validiert, Neuheitsgrad des Use Cases ist gewährleistet, zeitliche und finanzielle Rahmenbedingungen sind realisierbar, Ansprechpartner für Rückfragen sind definiert (Schuh et al. 2018, S. 42). Neben der Planung der Projektdauer, den zu erwartenden Kosten sowie dem Lösungskonzept muss insbesondere eine Vorabschätzung der Wirtschaftlichkeit des zu bewertenden Use Cases vorgenommen werden. Weiterhin ist es von zentraler Bedeutung, dass in der Stufe Vorprüfung ein Abgleich des geplanten Use Cases mit der existierenden Industrie 4.0 Use Case Landschaft des Unternehmens vorgenommen wird, um etwaige Doppelbebauungen oder redundanten Lösungen ausschließen zu können (Schuh et al. 2018, S. 42).

Schritt zwei umfasst die monetäre Bewertung eines Use Cases. Hierbei verweisen Schuh et al. auf die klassischen Verfahren der statischen und dynamischen Investitionsrechnung (Schuh et al. 2018, S. 43). Ihrer Meinung nach sollten die statischen Verfahren, insbesondere die Amortisationsrechnung, bei Use Cases mit geringem finanziellem Einfluss oder schlechter monetärer Bewertbarkeit Anwendung finden, da keine Unterscheidung der Betrachtungsperioden erfolgt, was zu einem unscharfen Ergebnis führt. Im Gegenzug werden die dynamischen Verfahren bei Use Cases mit hohen Investitionen als vorteilhaft angesehen. Sollte der Fall eintreten, dass Use Cases gleiche Amortisationszeiträume ausweisen, empfiehlt der Leitfaden die zusätzliche Durchführung einer Kapitalwertberechnung, um den langfristigen monetären Nutzen zu berücksichtigen (Schuh et al. 2018, S. 45).

Zur Unterstützung des Anwenders bei der monetären Nutzenbewertung bietet der Leitfaden eine tabellarische Übersicht zu möglichen quantitativen Einsparungsgrößen an, die den Nutzen identifizieren und deren finanziellen Einfluss ermitteln. Hierbei sind die Einspargrößen nach Geschäftsbereichen sowie Kosteneinsparungen und Umsatzsteigerungen eingeteilt (Schuh et al. 2018, S. 45 f.). Schritt zwei beinhaltet zudem die Berücksichtigung der nicht monetär bewertbaren Nutzenaspekte. Eine ausschließlich monetäre Bewertung der Use Cases wird laut Leitfaden als nicht zielführend angesehen (Schuh et al. 2018, S. 45). Zur Bewertung von nicht monetären Aspekten verweisen Schuh et al. auf die Verwendung einer Nutzwertanalyse mit Kriteriengewichtung, um eine Quantifizierbarkeit sicherzustellen. Der Leitfaden bietet dem Nutzer auch hier wieder mögliche Nutzenaspekte aus den Geschäftsbereichen: Marketing und Vertrieb, Produktentwicklung, SCM und Einkauf, Produktionsplanung und -steuerung, Logistik, Produktion, Qualitätssicherung und unterstützende Funktionen an.

Im Anschluss an die Auswahl der geeigneten qualitativen Nutzenaspekte erfolgt die Durchführung eines Paarweisen Vergleichs und somit eine binäre Gegenüberstellung der einzelnen Nutzenaspekte (Schuh et al. 2018, S. 46). Das Ziel hierbei besteht in der Gewichtung der einzelnen Aspekte untereinander (TU Braunschweig 2016). Zusätzlich zur Gewichtung der Aspekte untereinander umfasst der Leitfaden die Berücksichtigung eines weiteren Gewichtungsfaktors. Dieser basiert auf dem Ergebnis des Soll-Ist-Abgleiches des Reifegradmodells der jeweiligen Geschäftsbereiche (Schuh et al. 2018, S. 46 f.). Hierbei werden viele Punkte für einen großen und wenige Punkte für einen kleinen Wert des Soll-Ist-Abgleiches vergeben (Schuh et al. 2018, S. 47).

Schritt drei umfasst die grafische Zusammenführung der Einzelergebnisse. Der Leitfaden empfiehlt hierbei die Nutzung einer Portfoliomatrix, bestehend aus der Amortisationszeit und dem Nutzwert. Zusätzlich stellt eine Indifferenzgerade durch den Koordinatenursprung die

Trennlinie zwischen qualitativem und quantitativem Nutzen dar. Als dritte Dimension wird das Investitionsvolumen gewählt, welches eine zusätzliche Information zur Entscheidungsunterstützung darstellt. Unternehmensspezifisch kann die maximal zulässige Amortisationsdauer definiert und mittels einer rot gestrichelten Linie einbezogen werden (Schuh et al. 2018, S. 48 f.).

### **Methode zur Konzeption und zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Digital Engineering-Systemen nach Volkmann et al. (2014)**

Der von Volkmann 2014 veröffentlichte Ansatz zur Konzeptionierung und Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von „Digital Engineering Systemen“<sup>21</sup> (DES) beschreibt ebenfalls eine mehrstufige Vorgehensweise. Dieser gliedert sich in drei Hauptphasen: Ist-Analyse, Soll-Konzeption und Bewertung (Volkmann et al. 2014, S. 52).

Die Ist-Analyse als Schritt eins beinhaltet in erster Instanz die Sammlung der unternehmensspezifischen Prämissen sowie die allgemeinen Verbesserungsziele, die bei der Konzeptionierung und Umsetzung eines DES berücksichtigt werden müssen. Hierbei erfolgt die Betrachtung aller Stakeholder im Unternehmen sowie deren Prozesse und Daten, die eine direkte oder indirekte Beziehung zu dem betrachteten Prozess aufweisen. Laut Volkmann et al. können dies Buchhaltung, Produktentwicklung, Kundenbetreuung, Marketing, Recht, strategische Planung aber auch Produktionsplanung sein (Volkmann et al. 2014, S. 60). Zur Systematisierung der Prämissen empfiehlt Volkmann die Visualisierung der Weiterverwendung der Daten im Bewertungsprozess gemäß Quellen/Abteilungen, zugehörigen Informationen und methodischer Verwendung (Volkmann et al. 2014, S. 58 ff.).

Als Folgeschritt innerhalb der Ist-Analyse erfolgt die Modellierung des betroffenen Hauptprozesses sowie seiner Teilprozesse und Funktionen. Dieser Prozessschritt zielt auf die Erzeugung von Transparenz im Ist-Zustand ab. Wichtiger Bestandteil hierbei ist die detaillierte Beschreibung von Funktionen sowie das Aufzeigen der Funktionsverwendungen und die daraus resultierende Ableitung von funktionalen Lastenheften (Volkmann et al. 2014, S. 62 ff.). Ferner sollen durch die Ist-Modellierung Kennzahlen ermittelt und als Basis für die Optimierung herangezogen werden. Hierzu beinhaltet der Ansatz einen separaten, parallelisierten Prozessschritt. Die Kennzahlen sind nach Zeit, Kosten und Leistung eingeteilt (Volkmann et al. 2014, S. 72 ff.).

---

<sup>21</sup> Mit digitalen Werkzeugen unterstützte Ingenieur Tätigkeiten im gesamten Lebenszyklus von Produkt, Fabrik und Prozessen. Das Digital Engineering umfasst somit von Produktkonstruktion über Fabrikbetrieb bis Service und Rückbau alle anfallenden Aktivitäten auf Produkt-, Prozess- und Fabrikseite (Volkmann et al. 2014, S.14).

Der letzte Teilprozess innerhalb der Ist-Analyse umfasst die Marktanalyse und Vorauswahl. Dieser Schritt dient zur Ermittlung der möglichen Technologien und Anbieter auf dem Markt, die für eine Umsetzung des Optimierungsvorhabens genutzt werden können. Hierbei handelt es sich noch nicht um die finale Auswahl, sondern lediglich um die Eingrenzung der möglichen Technologien und Anbieter (Volkman et al. 2014, S. 80 f.).

Die Soll-Konzeptionierung als Schritt zwei des Ansatzes unterteilt sich in die Lösungsauswahl und die Neukonzeptionierung des Prozesses auf Basis der definierten Funktionen. Im Schritt der Lösungsauswahl werden die Prozesse und Funktionen nochmals analysiert und um die Kriterien Leistungsmenge und Teilprozessdauer ergänzt, um einen Kosteneinflussfaktor sowie einen Zeiteinflussfaktor ermitteln zu können. Durch die Gegenüberstellung der einzelnen Zeit- und Kosteneinflussfaktoren je Funktionen können diejenigen Teilprozesse ausgewählt werden, die den größten relativen Aufwand erzeugen und somit primär für die Digitalisierung auszuwählen sind (Volkman et al. 2014, S. 83 ff.).

Im anschließenden Prozessschritt erfolgt die Neukonzipierung des Hauptprozesses. Dabei werden die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Schritten genutzt um einen verbesserten Soll-Zustand zu entwickeln (Volkman et al. 2014, S. 85 ff.).

Der abschließende Hauptprozessschritt beinhaltet in erster Linie die Ermittlung der Basisdaten- und Kennzahlenveränderung, die durch die Neukonzeptionierung des Prozesses und seiner Funktionen hervorgerufen werden. Hierbei gilt die analoge Vorgehensweise wie bei der Modellierung und Kennzahlenermittlung mit dem Fokus auf der Ausweisbarkeit von finanziell messbaren Effizienzsteigerungen im Soll-Prozess (Volkman et al. 2014, S. 91 ff.).

Die abschließende Wirtschaftlichkeitsrechnung in Schritt drei basiert auf der Gegenüberstellung von Ist- und Soll-Zustand. Der Ansatz setzt hierbei auf die Schwerpunkte Kosten- und Zeitenfluss. Die Möglichkeit zur iterativen Auswertung soll dazu führen, noch optimalere Varianten zu entwickeln. Weiterhin kann ein Digitalisierungsgrad des gesamten Prozesses ermittelt und vergleichend einbezogen werden (Volkman et al. 2014, S. 94 ff.).

### **Ex-Ante Profitabilitätsbewertung von Cyber-Physischen Systemen nach Schiffer und Autenrieth (2019)**

Der Leitfaden zur Investitionsbewertung des IPA und IPRI ist mit dem Schwerpunkt Industrie 4.0 Lösungen in Form von CPS entwickelt worden. Das Ergebnis des Verbundforschungsprojektes aus dem Jahr 2019 beinhaltet einen softwaregestützten Demonstrator zur schrittweisen Bewertung spezifischer Industrie 4.0 Lösungen im Bereich der Intralogistik (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 93 ff.). Als Basis der Bewertungslogik dient ein

Morphologischer Kasten, der aktuell zur Verfügung stehende Industrie 4.0 Lösungen in der Intralogistik systematisiert und nach Hersteller bzw. Anbieter sowie Anwendungsgebiet übersichtlich gliedert (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 39).

Im ersten Schritt erfolgt die Auswahl des Anwendungsbereichs im Intralogistikprozess sowie die Definition von vier Zieldimensionen: Variabilität, Qualität, Geschwindigkeit und Transparenz (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 4. ff.). Im nächsten Schritt werden dem Nutzer auf Basis des Morphologischen Kastens und der definierten Zieldimensionen geeignete Technologielösungen angeboten. Nach der Auswahl der geeigneten Technologie sind die Projektdaten zu erfassen. Hierbei handelt es sich bspw. um Projektlaufzeiten, Energiekosten oder Zinssätze (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 6 ff.).

Für den Prozessschritt der Kosten-/Nutzenbewertung werden die Kostenstrukturen des Prozesses ohne Industrie 4.0 Lösung mit denen der implementierten Industrie 4.0 Lösung verglichen und dadurch ein wirtschaftlicher Nutzen über die Laufzeit ermittelt. Hierzu existiert eine Bibliothek an Kostenfaktoren, aus denen der Nutzer auswählen kann. Die Bibliothek umfasst bspw. Personalkosten, Installationskosten, Betriebskosten und Kosten für Schäden (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 11 ff.).

Die Visualisierung der Ergebnisse stellt eine klassische „Break-Even-Analyse“<sup>22</sup> der Prozesskosten ohne und mit Industrie 4.0 Lösung dar. Die Speicherung der Ergebnisse in elektronischer Form dient der nachhaltigen Nachvollziehbarkeit der Kalkulation (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 19).

### **Beitrag zur Analyse der Nutzenpotenziale von Industrie 4.0 in der Automobilindustrie nach Kirazli (2017)**

Der Ansatz von Kirazli aus dem Jahr 2017 umfasst die Nutzenbewertung von Industrie 4.0 Lösungen am Beispiel des Supply Chain Risikomanagements. Ähnlich den Ansätzen von Obermeier et al. (2015) und Kirsch (2017) besteht der Kern der Analyse aus einer umfangreichen Prozessanalyse. Weiterhin beschreibt Kirazli Nutzenaspekte und Bewertungsszenarien, die im Industrie 4.0 Kontext für Prozessoptimierungslösungen herangezogen werden können (Kirazli 2017, S. 4).

Die Bewertungssystematik setzt sich aus sechs Prozessschritten zusammen. Im ersten Schritt findet die Prozessaufnahme mit Methoden der Prozessmodellierung statt. Nachfolgend soll eine Prozessanalyse die Schwachstellen im visualisierten Prozess aufzeigen. Im dritten Schritt, der

---

<sup>22</sup> Der Break Even Point beschreibt den Zeitpunkt, an dem die Ausbringungsmenge erstmals die Einsatzmenge überschreitet (Weber und Pape 2018).

Ist-Prozessbewertung, wird der zu untersuchende Prozess auf das Vorhandensein von Industrie 4.0 Elementen untersucht. Hierbei unterstützt ein Katalog, bestehend aus entwickelten Referenznutzenaspekten und Kriterien, den Anwender (Kirazli 2017, S. 107 ff.).

Prozessschritt vier ist die Ausarbeitung des zukünftigen Soll-Zustands. Hierbei werden Optimierungen im Vergleich zum Ist-Prozess berücksichtigt. Der nachfolgende Bewertungsprozess umfasst den Vergleich zwischen dem erfassten Ist-Zustand und dem entwickelten Soll-Prozess auf Basis der identifizierten Kriterien und Nutzelemente. Abschließend findet die Implementierung der entwickelten Lösung statt (Kirazli 2017, S. 126 ff.).

### **Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0 Methodeneinsatz nach Liebrecht (2020)**

Der Ansatz von Liebrecht aus 2020 beschreibt einen komplexen Prozess zur Auswahl, Bewertung und Implementierungsplanung von Industrie 4.0 Lösungen, wobei der Fokus im Gegensatz zu anderen vorgestellten Ansätzen nicht ausschließlich auf der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt, sondern vielmehr als ein integrierter Prozessbestandteil zu verstehen ist.

Hierzu steht eine Toolbox für Industrie 4.0 Methoden zur Verfügung, auf deren Basis eine nutzen- und aufwandsbasierte Bewertung sowie Implementierungsreihenfolgeplanung erfolgt. Als Unterstützungswerkzeug wird eine „System Dynamics Simulation“ verwendet (Liebrecht 2020, S. 4).

Phase eins im Modell umfasst die Auswahl der geeigneten Industrie 4.0 Methoden über einen morphologischen Kasten. Das Ergebnis sind Potenzialmethodenstränge der ausgewählten Produktionstypologien. Darauf aufbauend erfolgt in Phase zwei eine strategische und monetäre Bewertung sowie eine Priorisierung der Potenzialmethodenstränge. Für die strategische Bewertung wird ein paarweiser Vergleich herangezogen, deren Eingangsgrößen aus einem literaturbasierten Kriterienkatalog ausgewählt werden können (Liebrecht 2020, S. 78 ff.). Zur Ermittlung des monetären Nutzens steht dem Nutzer ein umfangreicher Kriterienkatalog zur Verfügung (Liebrecht 2020, S. 83 f.). Dadurch ist es möglich, unternehmensspezifische Einführungsszenarien zu erstellen. Abschließend findet in Phase drei die systemgestützte, parameterbasierte Implementierungsreihenfolgeplanung statt, an dessen Ende eine Use-Case spezifische Industrie 4.0 Roadmap steht (Liebrecht 2020, S. 52).

### **Vorgehensweise zur Evaluierung von Industrie 4.0 Use Cases nach Stocker et al. (2019)**

Der Ansatz von Stocker et al. aus 2019 basiert auf einem Konzeptpapier, welches die Evaluierung von Industrie 4.0 Lösungen beschreibt. Der Ansatz nutzt zur Anforderungs-

ableitung das „Tripple Bottom Line Modell“ zur unternehmerischen Nachhaltigkeit. Dabei werden ökonomische, ökologische und soziale Aspekte berücksichtigt (Stocker et al. 2019, S. 499).

Im ersten Schritt des Bewertungsansatzes erfolgt die Darstellung der Ausgangssituation und die Hervorhebung des Handlungsbedarfs. Im Folgeschritt gilt es den technologischen Ansatz detailliert zu beschreiben. Daraufhin können die Zielsituation sowie der konkrete Nutzen ermittelt werden. Parallel zum Use Case findet auf Basis der gewählten Technologie die Identifikation der technologischen Enabler statt. Das Gesamtergebnis wird im abschließenden Schritt auf den Impact bzgl. ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte hin untersucht (Stocker et al. 2019, S. 500).

Zur Unterstützung der Projektleiter umfasst der Ansatz einen „Self-Assessment“ Fragenkatalog, bestehend aus drei Teilen. Teil eins fokussiert die technologischen Aspekte der Industrie 4.0 Lösung, wohingegen Teil zwei die relevanten KPIs und den Nutzen in den Mittelpunkt stellt. Teil drei fasst die beiden vorherigen Teile zusammen (Stocker et al. 2019, S. 501).

### **Wirtschaftlichkeitsanalyse am Beispiel eines Assistenzsystems für den Fertigungsbereich nach Kirsch (2017)**

Im Juni 2017 veröffentlichte der Geschäftsbereich Value Factory der Maschinenfabrik Rheinhausen GmbH verfasst von Kirsch einen ex-ante Bewertungsansatz für Industrie 4.0 Lösungen am Beispiel eines Assistenzsystems für die Fertigung, dessen Aufbau stark an den Leitfaden von Obermeier et al. aus 2015 angelehnt ist. Analog dem Ansatz von Obermeier findet im ersten Schritt eine umfassende Prozessanalyse statt. Diese beinhaltet eine klare Abgrenzung des Untersuchungsbereichs, gefolgt von einer interviewbasierten Erfassung des Ist-Zustandes. Die Visualisierung des Ist-Zustandes kann bspw. mittels „Swimlane Diagramm“<sup>23</sup> erfolgen. Im folgenden Schritt werden die Anforderungen an den Soll-Prozess definiert und auf Basis der zu implementierenden Industrie 4.0 Technologie in einen Soll-Prozess überführt. Eine Gegenüberstellung von Ist- und Soll-Zustand ermöglicht via „Gap-Analyse“<sup>24</sup> die Ermittlung der Nutzenpotenziale (Kirsch 2017, S. 6 f.).

---

<sup>23</sup> „Swimlane-Grafiken, die eine Kombination von Zuständigkeitsdiagrammen und klassischen Flussdiagrammen darstellen, können Geschäftsprozesse am deutlichsten darstellen, weil sie ihren Schwerpunkt in der Beschreibung von bereichsübergreifenden Prozessabfolgen mit den auftretenden Schnittstellen haben.“ (Swimlane.info 2020)

<sup>24</sup> Gap-Analysen oder auch Lückenanalysen umfassen die „Darstellung von Abweichungen zwischen auf unterschiedlichen Annahmen basierenden, zukünftigen Entwicklungsverläufen des Geschäfts.“ (Gabler Wirtschaftslexikon 2018)

Der zweite Schritt des Bewertungsansatzes beschäftigt sich mit der Frage nach der quantifizierbaren Wirtschaftlichkeitsermittlung der zu implementierenden Industrie 4.0 Technologie. Dabei werden zum einen quantifizierbare Nutzenaspekte ermittelt und stets über Stundensätze und somit Mitarbeiterereinsatzzeit berechnet. Zum anderen werden qualitative Nutzenaspekte im Rahmen eines „Scoring Modell Ansatzes“<sup>25</sup> bzw. einer Nutzwertanalyse miteinander verglichen. Durch die abschließende Betrachtung von Kosten- und Nutzenaspekten ist es möglich ein gesamtheitliches Bewertungsergebnis zu erreichen (Kirsch 2017, S. 8 ff.).

### **Roadmap Industrie 4.0 nach Seiter et al. (2016)**

Seiter et al. (2016) entwickelten zur Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen ein Vorgehensmodell, bestehend aus fünf Phasen. Die Phasen sind: Bestandsaufnahme, Potenziale identifizieren, Potenziale auswählen, Potenziale bewerten und Roadmap erstellen (Seiter et al. 2016, S. 11). In der Phase der Bestandsaufnahme empfiehlt der Ansatz die Nutzung von „SWOT“<sup>-26</sup>, „PESTEL“<sup>27</sup>-Analysen“ und „Business Model Canvas“ Untersuchungen. Die Identifikation der Potenziale erfolgt in einer RAMI 4.0 Schichtmodelllogik. Für die Phasen drei und vier werden ein Bewertungskatalog für Potenziale, eine Potenzialmatrix zur Zuordnung der Potenziale und die Auswahl von Industrie 4.0 Enablern verwendet. Abschließend fließen die Ergebnisse in einer Investitionsrechnung zusammen. Diese wird um eine „Extended Performance Analyse“ methodisch erweitert (Seiter et al. 2016, S. 12 f.).

Dabei findet die Monetarisierung von nicht monetären, aber quantifizierbaren und nicht direkt quantifizierbaren Potenzialen mittels Ursache-/Wirkungszusammenhängen statt, sodass nur monetäre Aspekte in die Investitionsrechnung einfließen. Für die angemessene Berücksichtigung der unsicheren Nutzeneffekte verwendet der Ansatz eine Verteilungsfunktion, die jedoch selber mit Unsicherheit behaftet ist (Seiter et al. 2016, S. 78 ff.). Eine Potenzial-Matrix, bestehend aus den Achsen Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit und soll sicherstellen, dass nur ökonomisch sinnvolle Projekte umgesetzt werden (Seiter et al. 2016, S. 54). Zum Abschluss des Ansatzes wird die eigentliche Implementierungsroadmap der bewerteten Industrie 4.0 Lösung erstellt.

---

<sup>25</sup> Scoring Modelle sind „Verfahren zur Alternativenbewertung bei mehreren Zielgrößen, wobei Alternativen auch an solchen Bewertungskriterien gemessen werden, die nicht in Geldeinheiten ausdrückbar sind.“ (Wübbenhorst et al. 2018)

<sup>26</sup> SWOT steht für Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threads und stellt eine Positionierungsanalyse der eigenen Aktivitäten gegenüber dem Wettbewerb dar (Fleig 2020).

<sup>27</sup> PESTEL steht für Political, Economic, Social-cultural, Technological, Environmental, Legal und stellt eine Analysemethode der Umfeldfaktoren und Rahmenbedingungen eines Unternehmens dar (Fleig 2021).

## **Wirtschaftlichkeit von Industrie 4.0 Anwendungen der Plattform Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum Chemnitz nach Unger (2020)**

Die von Unger (2020) beschriebene Vorgehensweise zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen basiert im Kern auf der Frage, welchen Wert Daten haben und wie dieser ermittelt werden kann. Für Unger stellen Daten stets die Grundlage einer Kosten-/Nutzenkalkulation von Industrie 4.0 Anwendungen dar. Die schrittweise Vorgehensweise umfasst eine um datenspezifische Anforderungen erweiterte Kosten-/Nutzenanalyse und einer abschließenden Investitionsbewertung. Für die Ermittlung von Kosten und Nutzen nutzt Unger die systematische Bewertung der relevanten Daten nach den Kriterien Zugänglichkeit, Qualität und Unternehmenskontext. Die Kosten entstehen zum Großteil durch die Verarbeitungsaufwände der Daten, bis daraus eine Verbesserung des eigenen Geschäftsprozesses entsteht. Der verbesserte Geschäftsprozess auf Basis der generierten Daten wiederum ermöglicht die Ermittlung der Nutzenseite, jedoch stets in Abhängigkeit des Marktpreises der Information selbst (Unger 2020).

Für die Investitionsbewertung werden klassische Verfahren der Investitionsrechnung herangezogen, sofern Zahlungsreihen über die Projektlaufzeit vorliegen. Hierbei handelt es sich um die Kapitalwert-, Endwert- und Annuitätenmethode. Für die Bewertung qualitativer Nutzenaspekte wird eine Nutzwertanalyse mit gewichteten Kriterien durchgeführt. Die Gegenüberstellung der bspw. Kapitalwerte und der Nutzwerte unterschiedlicher Handlungsalternativen in einem Diagramm ermöglicht einen abschließenden Vergleich, auf deren Basis die Investitionsentscheidung erfolgt (Unger 2020).

## **Investitionsbewertung von MRK-Lösungen nach Deuse et al. (2019 a)**

Die von Deuse et al. (2019 a) im Rahmen des KoMPI Projektes erarbeitete Bewertungssystematik für MRK-Lösungen, die im Zusammenspiel aus Mensch, Organisation und Technik als Kerntechnologie der Industrie 4.0 angesehen werden können (Hees 2019, S. 6), basiert auf dem Simulationswerkzeug „Editor menschlicher Arbeit“ (ema) und umfasst vier arbeitswissenschaftliche Kriterien. Diese sind Ergonomie, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Organisation. Ergonomisch negative und sicherheitskritische Planungsszenarien stellen in der Bewertung ein K.o.-Kriterium dar.

Im ersten Schritt erfolgt in Anlehnung an das „Ergonomic Assessment Worksheet“ eine detaillierte ergonomische Bewertung des Planungsszenarios, welche zwingend positiv ausfallen muss, um im zweiten Bewertungsschritt eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchführen zu

können. Hierbei sind die zu bewertenden Kosten- und Nutzenaspekte sowie deren Quantifizierung durch die Simulation bereits zu großen Teilen im ema hinterlegt und müssen nur teilweise durch individuelle Angaben ergänzt werden. Die Wirtschaftlichkeitsbewertung basiert schlussendlich auf den Investitionskennzahlen Amortisationszeit und Kapitalwert (Deuse et al. 2019 a, S. 222).

Im dritten Schritt erfolgt eine Sicherheitsbewertung mithilfe der ema-basierten Sensorbibliotheken. Dadurch werden die Betriebsarten und Sicherheitsbereiche des Planungsszenarios vollautomatisch identifiziert und wichtige sicherheitsrelevante Zusatzinformationen generiert. Abschließend gehen organisatorische Aspekte in die Bewertung der MRK-Lösung ein. Dabei handelt es sich um Laufwegs- und Auslastungsanalysen der Mitarbeiter sowie Anforderungen an die Materialver- und -entsorgung (Deuse et al. 2019 a, S. 222 f.).

### **Beitrag zur digitalen Transformation von Planungs- und Steuerungsprozessen unter Einsatz von Cyber-Physischen Systemen nach Hettterscheid (2020)**

Der Ansatz von Hettterscheid aus dem Jahr 2020 beschreibt ein Vorgehensmodell in vier Phasen. In der ersten Phase erfolgt die Vorbereitung der digitalen Transformation durch eine Eingrenzung des Betrachtungsbereiches und der Erstellung eines funktionsübergreifenden Prozessmodells (Hettterscheid 2020, S. 131 f.).

Phase zwei umfasst die Analyse des Ist-Zustands sowie die Erstellung eines Ziel-Zustands des zu bewertenden Prozesses. Dabei wird ein Reifegradmodell angewendet, welches auf sechs Integrationsstufen von Industrie 4.0 Lösungen basiert. Es wird darauf basierend der Ist-Reifegrad als auch der Ziel-Reifegrad festgelegt (Hettterscheid 2020, S. 133 f.).

Die anschließende Phase drei des Vorgehensmodells fokussiert die Entwicklung, Überprüfung und Auswahl geeigneter Cyber-Physischer Systeme um den Ziel-Reifegrad erreichen zu können. Hierzu werden schwerpunktmäßig Expertenworkshops durchgeführt, um prozessabschnittbezogenen Lösungen zu entwickeln und Interdependenzen aufzuzeigen. Das Ergebnis von Phase drei stellt ein Steckbrief dar, welcher die ausgewählte Lösung in Form eines morphologischen Kastens je Prozessabschnitt beschreibt (Hettterscheid 2020, S. 135 f.).

Die abschließende vierte Phase umfasst eine ex-ante Nutzenbewertung des ausgewählten Cyber-Physischen Systems. Hierbei wird mittels Wirkungskettenanalyse<sup>28</sup> zuerst eine

---

<sup>28</sup> Die zentrale Idee der Wirkungs- oder Nutzeffektkettenanalyse besteht darin, ein Modell der mit einem IT-System verbundenen Wirkungen zu erstellen, welches insbesondere Wirkungszusammenhänge berücksichtigt (Schumann 1990, S. 307 f.; Schumann 1993, S. 167 f.).

Quantifizierung von Nutzeneffekten und Anschließend eine Monetarisierung von Nutzeneffekten erwirkt (Hetterscheid 2020, S. 139 f.). Eine Kostenbewertung findet im Rahmen der ex-ante Nutzenbewertung nicht statt, sodass keine vollständige Kosten-/Nutzenanalyse erfolgt.

### 3.3 Nationale Bewertungsansätze für Digitalisierungs- und IT-Investitionen

Durch die steigende Bedeutung der Vernetzung von Daten nimmt auch die IT in Zukunft einen zentralen Stellenwert ein und wird nach Dorst (2016) von der Bitkom sogar zum Wertschöpfungsfaktor (Bitkom 2016, S. 7). Da Industrie 4.0 Lösungen stets einen starken Datenverarbeitungsanteil aufweisen (Kagermann et al. 2016, S. 5) und somit zwangsläufig unter die Rubrik der IT-Lösungen fallen, werden im Folgenden Bewertungsansätze zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von Digitalisierungs- und IT-Lösungen vorgestellt, die somit Eingang in den Stand der Wissenschaft zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen finden. Da nahezu alle Industrie 4.0 Anwendungen einen IT-Bezug aufweisen, stellt sich ferner die Frage, inwiefern geeignete Bewertungsansätze für IT-Projekte direkt auf das Industrie 4.0 Umfeld übertragbar sind (Bitkom 2016, S. 6 ff.).

#### **Business Case Kalkulator des Fraunhofer IML (2020)**

Das Bedürfnis zur zielgerichteten Bewertung von Investitionen für Digitalisierungsprojekte stammt in erster Linie aus der Praxis und stellt somit eine unmittelbar praxisrelevante Problemstellung dar (Schulte 2020). Das Fraunhofer IML entwickelte diesbezüglich ein Vorgehensmodell, welches dem Anwender diejenigen Prozessschritte chronologisch und applikationsbasiert aufzeigt, die zur zielgerichteten Bewertung von Investitionen für Industrie 4.0 Projekte notwendig sind (Henke 2017, S. 19).

Schritt eins umfasst die Spezifizierung des Investitionsvorhabens. Dieser Prozessschritt erfolgt noch außerhalb des eigentlichen Business Case Kalkulators durch den jeweiligen Anwender. Schritt zwei beinhaltet die Identifikation der Kostengrößen. In diesem Schritt müssen klassische Sachgemeinkosten für die Investition identifiziert und detailliert hinterlegt werden.

Die Identifikation der Nutzengrößen ist Bestandteil von Schritt drei. Hier wird die Nutzenseite der Investition erfasst und kumulativ quantifiziert. An dieser Stelle werden quantitative Einsparungen wie bspw. Umsatzsteigerung, Ressourcenreduzierung oder Produktivitätssteigerungen hinterlegt, die mit einem monetären Wert hinterlegbar sind. Als logische Schlussfolgerung aus Schritt zwei und drei werden nun die Kosten und Einsparungen in Schritt

vier gegenübergestellt und mittels Verfahren der Investitionsrechnung bewertet. Zur Anwendung kommen die ROI-Methode, die Amortisationsrechnung sowie die Barwertmethode (Schulte 2020).

Neben den quantifizierbaren Bewertungskriterien weisen innovative Industrie 4.0 Lösung eine Vielzahl an qualitativen Nutzenaspekten auf. Diese Nutzenaspekte werden in Schritt fünf erfasst. Schritt sechs umfasst die Bewertung der Projektrisiken. Im vorletzten Prozessschritt besteht die Möglichkeit im Freitextformat Projektrisiken zu hinterlegen, sodass eine grobe Risikobetrachtung der Investition erfolgen kann. Zur Bewertung der Risiken wird eine Vier-Feld-Matrix verwendet, welche die Achsenbezeichnungen Auswirkungen und Eintrittswahrscheinlichkeit aufweist. Der letzte Prozessschritt ermöglicht dem Anwender, durch die Hinterlegung von Hinweisen, die strategische Relevanz oder betriebliche Notwendigkeit seiner Investition zu verdeutlichen (Schulte 2020).

Die abschließende Auswertung des Business Case Kalkulators besteht aus einer Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsanalyse im Bereich Financials, einer Auflistung der qualitativen Nutzenaspekte im Bereich Non-Financials sowie einer Visualisierung der Risikofaktoren im Rahmen einer Risikoanalyse (Schulte 2020).

### **Leitfaden Investitionskonzepte der Plattform Mittelstand 4.0 (2017)**

Im Zeitalter der Digitalisierung verändern sich die Prozesse und die Technologien im gewerblichen Umfeld schneller als je zuvor (Neugebauer 2018, S. 3). So führte die Ausrufung des Megatrends Digitalisierung bei den Automobilkonzernen zu einer starken Fokussierung auf die Hebung der Nutzenpotenziale von Digitalisierungsvorhaben (Schiller 2015, S. 2). Aus diesem Grund befasst sich der Investitionsleitfaden der Plattform Mittelstand 4.0 (2017) mit der Frage, welche Schritte von einer Idee bis hin zu einer vergleichenden Bewertung von Investitionen durchlaufen werden müssen, um das Nutzenpotenzial nachweisen zu können. Hierzu erarbeitete das Fraunhofer IML im Jahr 2017 in Zusammenarbeit mit Praxispartner aus Industrie und Handel im Rahmen einer Focus Group einen fünf stufigen Investitionsleitfaden, welcher die Beschreibung von Use Cases sowie die Erstellung und vergleichende Bewertung von Digitalisierungslösungen unterstützt (Brosa-Abut und Parlings 2017, S. 2).

Der erste Schritt Definieren setzt die intensive Auseinandersetzung mit dem Vorhaben voraus. Eine grobe Idee für ein Projekt in eine standardisierte Form mit der Formulierung des Projektziels, Projektteams, fachlichen Scopes, Zeitrahmens und des notwendigen Budgets zu bringen, ist daher der erste Schritt des Bewertungsleitfadens (Brosa-Abut und Parlings 2017, S. 3).

In Prozessschritt zwei werden alle qualitativen Nutzenaspekte des Vorhabens erfasst und in Form eines Spinnennetzdiagramms gemäß einer Skala von eins bis fünf qualitativ bewertet. Eine Besonderheit hierbei stellt die Bewertung auf Basis von drei Zuständen dar. Der Zustand Entwicklungspotenzial eines Vorhabens oder einer Technologie ermöglicht eine neue Sichtweise und integriert somit den Faktor Zeit in die Bewertung.

Nach der Betrachtung der qualitativen Nutzenaspekte erfolgt in Schritt drei die Gegenüberstellung der quantitativen Nutzenaspekte und der Kosten im Rahmen einer Kosten-/Nutzenanalyse. Hierbei wird in projektspezifische Kosten/Nutzen und projektresultierende Kosten/Nutzen unterteilt. Das Ergebnis dieses Schrittes sind zwei Diagramme, jeweils bestehend aus einer Kosten-, Nutzen- und Cash-Flow-Kurve (Brosa-Abut und Parlings 2017, S. 4 f.).

Vergleichbar zum Business Case Kalkulator umfasst Schritt vier eine Risikoanalyse. Hierzu müssen Kriterien definiert sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen geschätzt werden. Auf Basis der Ergebnisse lassen sich Auswirkungen ermitteln, mögliche Gegenmaßnahmen identifizieren und diese präventiv oder reaktiv einplanen.

Im abschließenden Auswerten Schritt erfolgt die Zusammenführung der einzelnen Teilergebnisse aus qualitativer Bewertung, quantitativer Bewertung und Risikoanalyse. Zudem wird eine Verbindung zu den Zielparametern hergestellt, die in Schritt eins festgelegt wurden (Brosa-Abut und Parlings 2017, S. 6 f.).

### **Wirtschaftlichkeitsbewertung von Digitalisierungsprojekten der Plattform Mittelstand 4.0 (2016)**

In einem Mikroprojekt beleuchtete das Stuttgarter Kompetenzzentrum für Industrie 4.0 im Mittelstand in Zusammenarbeit mit Praxispartnern die Bewertung von Digitalisierungsprojekten (bwcon/FSTI 2016).

Das Ergebnis ist ein Vorgehensmodell in drei Schritten. Dabei umfasst der erste Schritt die quantitative Erfassung des Ist-Zustandes sowie die Entwicklung eines Soll-Zustandes im Rahmen einer klassischen Prozessanalyse. In einem zweiten Schritt erfolgt die Bewertung der Investition sowohl kosten- als auch nutzenseitig. Hierbei wird darauf hingewiesen, dass die Nutzenaspekte bei Digitalisierungs-lösungen nicht immer auf der Hand liegen bzw. erst über das Zusammenspielen mehrerer Faktoren erkennbar sein können. In Bezug auf die qualitativen Nutzenaspekte weist der Leitfaden auf die Nutzung von „Scoring Modellen“ wie bspw. einer Nutzwertanalyse hin. Die abschließende Gegenüberstellung der Kosten und qualitativen sowie quantitativen Nutzenaspekte ermöglicht die Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer

Investition. Als separater, jedoch parallel begleitender Prozess, findet eine umfangreiche Erfassung und Verarbeitung von relevanten Daten im Unternehmen Einzug in den Bewertungsansatz (bwcon/FSTI 2016).

### **Nutzenbewertung von IT-Investitionen nach Kesten und Schröder (2006 und 2009)**

Zur ex-ante Nutzenbewertung von IT-Projekten haben Kesten und Schröder bereits 2006 bzw. 2009 einen Bewertungsansatz formuliert, der auf vier Prozessschritten basiert und eine detaillierte, strukturierte Bewertung von IT-Projekten entwickelt. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 14 dargestellt (Kesten et al. 2006, S. 33; Kesten und Schröder 2009, S. 18).

In Schritt eins erfolgt eine detaillierte Investitionsbeschreibung mit unternehmensspezifischen Inhalten zum Use Case und der Investition selbst. Hierbei ist es wichtig, dass der Ist-Zustand präzise analysiert wird, um daraufhin Schwachstellen bzw. Handlungsbedarf ableiten zu können, aus denen wiederum die Ziele des Use Cases ableitbar sind. Nur so ist es möglich, die relevanten Wirkungskategorien zu identifizieren. Weiterhin wird die Notwendigkeit beschrieben, die Voraussetzungen einer Implementierung und der damit verbundenen tatsächlichen Realisierung des Nutzens zu formulieren, da diese schlussendlich in die Risikobetrachtung eingehen. Die Ergebnisse der Investitionsbeschreibung sollten parallel in einer IT-Investitionsdatenbank gespeichert werden (Kesten et al. 2006, S. 33 f.). Dadurch können bspw. Nutzenbibliotheken aufgebaut oder Voraussetzungen für die Umsetzung von IT-Projekten gespeichert und kategorisiert aufbereitet werden, um diese Folgenutzern zur Verfügung zu stellen (Kesten et al. 2006, S. 28).

Die identifizierten Wirkungskategorien aus Schritt eins sind die Eingangsgrößen für Schritt zwei der Bewertung. Hier erfolgt durch die Nutzung von Wirkungskettenanalysen die Detaillierung der Wirkungen durch die Ermittlung von typischen Folgewirkungen, die monetär bewertbare Nutzenaspekte ergeben. Laut Kesten und Schröder gibt es stets direkte Wirkungen eines IT-Systems, die logisch abgeleitete Folgewirkungen aufweisen. Diese Folgewirkungen lassen sich zumeist bis auf eine monetäre Wirkung detaillieren und demzufolge auch quantifizieren. Es wird auch davon ausgegangen, dass die Wirkungen in Einsparungen und Erlöse sowohl für den Fachbereich als auch für die IT-Abteilungen gegliedert werden können (Kesten und Schröder 2009, S. 7). Analog Schritt eins, empfiehlt der Ansatz den Aufbau einer Datenbank zu den Ergebnissen aus Schritt zwei um bspw. eine Wirkungskettendatenbank oder Monetarisierungsdatenbank spezifischer Use Cases aufbauen zu können (Kesten et al. 2006, S. 33 f.).

Aus der Validierung des Bewertungsansatzes in Praxisprojekten konnte eine Kategorisierung der Nutzeneffekte erstellt werden. Demnach lassen sich Nutzeneffekte in vier Kategorien unterteilen: prozessbezogene, ressourcenbezogene, kunden- und marktbezogene sowie IT-bezogene Wirkungen (Kesten und Schröder 2009, S. 8).

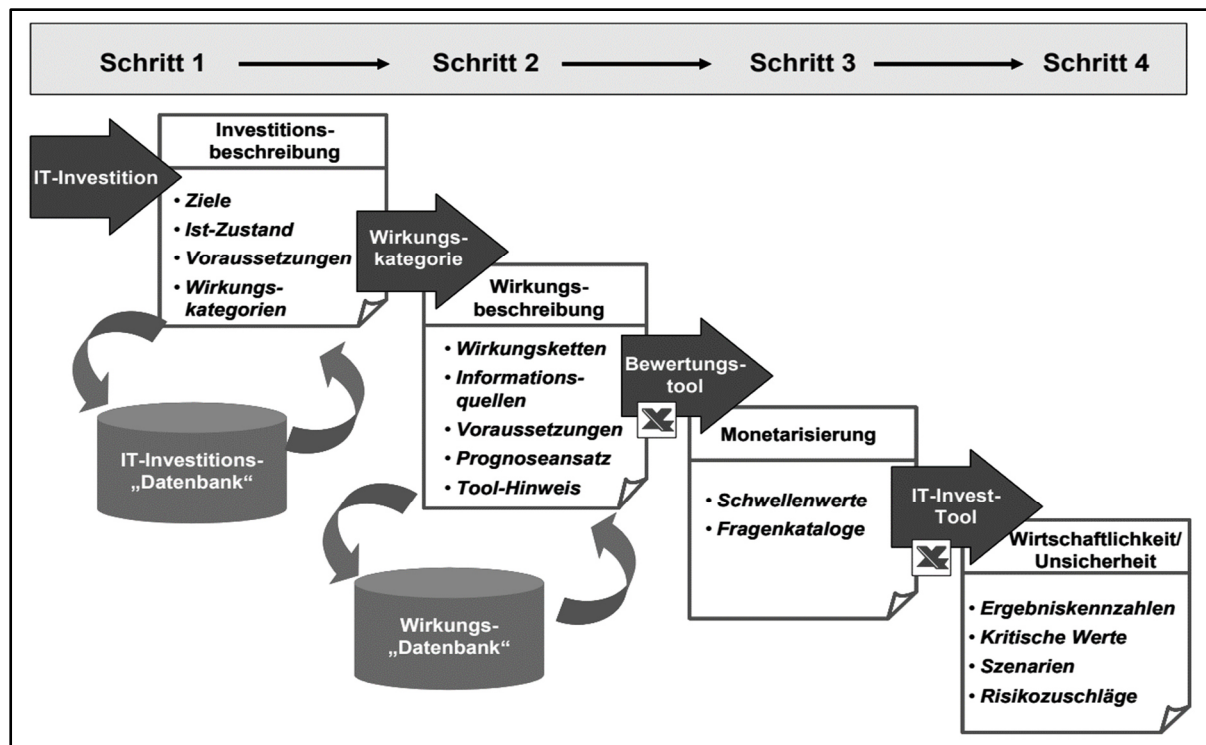


Abbildung 14: Vorgehensmodell zur Nutzenbewertung von IT-Projekten nach Kesten et al. (Kesten et al. 2006, S. 33)

Die Monetarisierung der Nutzeneffekte kann als Grundlage für die finanzielle Bewertbarkeit herangezogen werden. Zur Unterstützung bei der Nutzenermittlung steht dem Nutzer jeweils ein Excel-Tool zur Verfügung (Kesten und Schröder 2009, S. 10 ff.). Eine abschließende Zusammenführung der identifizierten und kalkulierten Einsparungen auf der Nutzenseite mit denen der Kostenseite führen zu einer direkten Vergleichbarkeit von Kosten und Nutzen und ermöglichen eine direkte Bewertung der Investition (Kesten und Schröder 2009, S. 13 f.)

Da bei IT-Projekten stets eine Unsicherheit bzgl. der kalkulierten monetären Einsparungen zu verzeichnen ist, müssen Verfahren zur Berücksichtigung der Risiken und Unsicherheiten mit einbezogen werden (Schuh et al. 2018, S. 41). Diesbezüglich verweist der Ansatz auf drei Methoden (Kesten und Schröder 2009 S.15 ff.). Eine hohe Praxisakzeptanz weisen zwar die Risikozuschlagsmethode, Sensitivitätsanalyse und die Szenarienanalyse gleichermaßen auf (Kesten et al. 2006, S. 23), jedoch findet final lediglich die Szenarienanalyse im Ansatz Anwendung (Kesten und Schröder 2009, S. 29 ff.).

## **Vorschlag eines Analyse- und Berechnungsmodells zur Investitionsbewertung für ein unternehmensweites Datenqualitätsmanagement (ALADDIN) nach Schäffer et al. (2018)**

Das von Schäffer et al. (2018) veröffentlichte Modell zur Investitionsbewertung für ein unternehmensweites Datenqualitätsmanagement ist in erster Linie nicht zur Bewertung von spezifischen Industrie 4.0 Lösungen entwickelt worden. Da allerdings das Datenqualitätsmanagement eine essenzielle Grundvoraussetzung für effiziente Industrie 4.0 und IT-Lösungen darstellt (Schäffer et al. 2018, S. 370) und das entwickelte Vorgehensmodell einen allgemeingültigen Charakter aufweist, findet es Eingang in die Literaturanalyse.

Im ersten Schritt erfolgt die Eingabe von primären und sekundären Parametern für das Geschäftsszenario. Auf Basis der erfassten Parameter wie bspw. der Anzahl der Kunden oder der maximalen Nutzungsdauer erfolgt die abschließende Bewertung hinsichtlich Vorteilhaftigkeit der Investition.

Der Investitionsleitfaden berücksichtigt im zweiten Schritt die Kostenstrukturen einer Investition. Hierbei wird in Investitionskosten und Betriebskosten unterschieden. Wie bei anderen Ansätzen auch, erfolgt eine weitere Untergliederung in externe Kosten sowie interne Kosten sowohl in der IT als auch im Fachbereich. Als Ergebnis des Kostenmodells werden diese Kosten in das Wirtschaftlichkeitsmodell übergeben (Schäffer et al. 2018, S. 375 f.). Neben der Kostenseite erfolgt ebenfalls die Betrachtung des Nutzenmodells. Hierbei wird in direkten Nutzen und in indirekten Nutzen unterschieden. Als Ergebnis des Nutzenmodells werden die Einsparungen in das Wirtschaftlichkeitsmodell übergeben (Schäffer et al. 2018, S. 376).

Das Wirtschaftlichkeitsmodell umfasst mehrere Schritte. Nachdem ein interner Zinsfuß gesetzt wurde, folgt im Prozessschritt der Investitionsrechnung die Bewertung der Vorteilhaftigkeit der Investition auf Basis der klassischen Verfahren der dynamischen Rechnungsverfahren.

Eine anschließende Risikobewertung soll die Unsicherheiten im Bewertungsprozess minimieren und „Wert-Erzeuger“ von „Wert-Zerstörern“ trennen. Die abschließende Investitionsbewertung und Bewertungsübersicht erfolgt stets auf Basis der in Schritt eins erfassten primären und sekundären Prämissen sowie den individuell definierbaren Kriterien zur Investitionsbewertung (Schäffer et al. 2018, S. 375 ff.). Ein elektronischer Workflow soll den Nutzer durch die relevanten Bewertungsschritte leiten und gezielte Unterstützung bieten.

## **Modell zur Wirtschaftlichkeitsbewertung des Einsatzes von Virtual Reality für Aufgaben in der Digitalen Fabrik nach Westkämper et al. (2006)**

Der Ansatz von Westkämper et al. (2006) beinhaltet die Vorgehensweise einer Wirtschaftlichkeitsbewertung von Virtual Reality (VR) Lösungen im Fertigungsumfeld. Dabei wurde ein Ansatz entwickelt, bei dem sowohl harte, monetär messbare als auch weiche, bspw. strategisch relevante Nutzenaspekte Berücksichtigung finden (Westkämper et al. 2006 a, S. 104 f.).

Im ersten Schritt müssen die relevanten Nutzenaspekte aus den vorhandenen Nutzenkategorien direkter Nutzen, indirekter Nutzen oder strategischer Nutzen ausgewählt werden. Da kein Verfahren zur gesamtheitlichen Kosten- und Nutzenbewertung existiert, stellen Westkämper et al. passende Verfahren zur Quantifizierung und Bewertung der einzelnen Nutzenkategorien bereit (Westkämper et al. 2006 a, S. 108), was dazu führt, dass die Investitionsentscheidung auf Basis eines Kombinationsmodells unterschiedlicher Verfahren erfolgt (Westkämper et al. 2006 a, S. 106).

Grundsätzlich können die klassischen Methoden der Investitionsrechnung zur Bewertung des direkten Nutzens verwendet werden. Zur Berücksichtigung der indirekten Nutzenaspekte empfehlen Westkämper et al. die Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse<sup>29</sup> (FMEA), Nutzwertanalyse (NWA) oder Prozesskostenrechnung. Um strategische Nutzengrößen berücksichtigen zu können findet eine BSC Anwendung (Westkämper et al. 2006 a, S. 107 f.). Neben der Erfassung der Nutzenaspekte findet eine Auswahl der Kostenaspekte statt. Auch hierzu existieren Kostenkategorien, die in einmalige und laufende Kosten unterteilt sind. Zur Bewertung der Kosten wird die Methode der „Total Cost of Ownership“<sup>30</sup> (TCO) empfohlen (Westkämper et al. 2006 a, S. 107).

Begleitend zur Erfassung der Kosten- und Nutzenkategorien bzw. -aspekte findet durch die Visualisierung des Ist-Zustands des zu betrachtenden Prozesses eine Prozessanalyse statt. Der finanzielle Einfluss der Kosten- und Nutzenpotenziale leitet sich jedoch erst aus der Soll-Prozesskonzeptionierung ab (Westkämper et al. 2006 a, S. 105).

---

<sup>29</sup> Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) wird im Rahmen des Qualitätsmanagements zur präventiven Fehlervermeidung eingesetzt. Es handelt sich um eine „formalisierte (qualitative) Methode, um mögliche Probleme sowie deren Risiken und Folgen bereits vor ihrer Entstehung systematisch und vollständig zu erfassen.“ (Syska 2006, S. 46)

<sup>30</sup> Der Total Cost of Ownership Ansatz beschreibt die „Summe aller für die Anschaffung eines Vermögensgegenstandes [...], seine Nutzung und ggf. für die Entsorgung anfallenden Kosten.“ (Weber 2018 c)

## **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von PLM-Systemen nach Eigner und Stelzer (2009)**

Eigner und Stelzer (2009) beschreiben eine Vorgehensweise aus fünf Schritten, wodurch der wirtschaftliche Nutzen von PLM-Systemen im Rahmen einer Investitionsrechnung erfasst und eine Investitionsentscheidung herbeigeführt werden soll (Eigner und Stelzer 2009, S. 356). Schritt eins umfasst die Ermittlung des Ist-Zustands auf Basis von allgemeinen betriebswirtschaftlichen Statistiken und zeitlich bewerteten Informationsflüssen zur „Bestimmung der effektiven Kosten zur Deckung des betrieblichen Informationsbedarfs und der vorhandenen Schwachstellen“ (Eigner und Stelzer 2009, S. 356 f.).

In Schritt zwei werden die Auswirkungen auf das Unternehmen durch eine PLM-Einführung möglichst detailliert ermittelt und anschließend in monetär quantifizierbare und schwer monetär quantifizierbare Größen eingeteilt. Dabei findet eine weitere Unterteilung in direkte und indirekte Nutzengrößen statt (Eigner und Stelzer 2009, S. 361 f.). Im Anschluss müssen die schwer monetär quantifizierbaren Größen durch die Ermittlung der jeweiligen indirekt ableitbaren monetären Nutzenkomponenten in monetäre Größen transformiert werden (Eigner und Stelzer 2009, S. 362 f.).

Nachdem alle relevanten Kosten- und Nutzengrößen in quantifizierter Form vorliegen, wird ein Kosten-Nutzen-Erfassungsmodell erstellt. Dabei ist eine Unterteilung in einmalige und laufende Kosten vorzunehmen. Diese sind danach zur zeitbezogenen Betrachtung der Investitionsbelastung auf Planperioden zu verteilen (Eigner und Stelzer 2009, S. 364). Die Nutzengrößen werden zunächst in direkte Nutzen, Produktivitätssteigerungen und Durchlaufzeitverkürzungen eingeteilt. Zusätzlich ermöglicht eine Feineinteilung in Umsatzerlössteigerungen und kostenartenbezogene Kosteneinsparungen das Erkennen des Ertragschwerpunkts. Auch die Nutzengrößen sind anschließend auf die Planperioden aufzuteilen. Die Festlegung von minimalen, maximalen und durchschnittlichen Realisierungswahrscheinlichkeiten je Kosten- und Nutzengröße ermöglicht die mehrfache Berechnung und somit eine Risikoabschätzung (Eigner und Stelzer 2009, S. 365).

Schritt vier beinhaltet die Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit Hilfe von statischen und dynamischen Investitionsrechnungsverfahren auf Grundlage des erstellten Kosten-Nutzen-Erfassungsmodells (Eigner und Stelzer 2009, S. 365 ff.).

Der abschließende Schritt der Investitionsanalyse fasst alle relevanten Ergebnisse der vorangegangenen Schritte in einer Übersicht zusammen, die wiederum als Entscheidungsgrundlage für das Management verwendet werden kann. In diesen Schritt können strategische Überlegungen einfließen und Investitionsentscheidungen trotz geringer Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen (Eigner und Stelzer 2009, S. 372).

### 3.4 Internationale Bewertungsansätze für IT-Investitionen

Neben den deutschsprachigen Veröffentlichungen zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Digitalisierungs- und IT-Lösungen werden im Folgenden drei weitere renommierte Ansätze aus dem internationalen, englischsprachigen Umfeld vorgestellt.

#### **Total Economic Impact (TEI) nach Forrester Research Inc. (2003)**

Die Methode des „Total Economic Impact“ (TEI) stellt eine Weiterentwicklung der TCO und der „Cost/Benefit Rechnung“ dar. Das von Forrester Research Inc. entwickelte Framework bietet eine gesamtheitliche Bewertung von IT-Investition unter der Einbeziehung von Kosten, Nutzen, Risiken und der Opportunität, die als Flexibilität oder „Strategic Impact“ geführt wird (Gliedmann 2003, S. 3).

Im ersten Schritt werden die Kosten einer IT-Investition über Laufzeit gesammelt und systematisiert. Parallel dazu erfolgt eine Auflistung des monetär messbaren Nutzens der IT-Soft- oder Hardware in Bezug auf den Geschäftsprozess. Im Schritt der Flexibilitätsanalyse wird begutachtet, ob die Investition für das IT-Vorhaben zukünftige Optionen oder weiterführende Geschäftsfähigkeiten ermöglicht oder nicht. Hierbei steht die Frage nach dem Folgenutzen durch die Bereitstellung von Enabler-Technologien<sup>31</sup> im Mittelpunkt. Sofern finanziell messbare Ergebnisse aus der Analyse der Flexibilität resultieren, werden diese in die Nutzenkalkulation mit aufgenommen (Lipsitz und Breslin 2014, S. 30). Eine abschließende Risikoanalyse reduziert die Nutzen- und erhöht die Kostenseite um prozentuale Schätzwerte, um schwer planbare Einflussgrößen geeignet abbilden zu können (CioWiki 2018).

#### **Total Value of Opportunity Methodology (TVO) nach dem Gartner Business Performance Framework (2003)**

Die von Gartner (2003) entwickelte Methode der „Total Value of Opportunity“ (TVO) hat zum Ziel, den Geschäftswert einer IT-Investition gesamtheitlich über die Projektlaufzeit hinweg zu ermitteln. Bei der TVO Methode werden klassische, projektbezogene Kosten-/Nutzenanalysen erstellt, Nutzenrealisierungswahrscheinlichkeiten ermittelt und künftige Unsicherheiten sowie Nutzenpotenzial berücksichtigt. Dadurch stellt der TVO eine umfassende Entscheidungsgrundlage bzgl. der Vorteilhaftigkeit einer Investition dar (Apfel und Smith 2003, S. 1 ff.).

---

<sup>31</sup> Enabler-Technologien sind technologische Entwicklungen, die benötigt werden, um die eigentliche Wertschöpfung zu erzielen (Proff et al. 2016, S. 10).

Im ersten Schritt des Frameworks erfolgen die Erstellung der Projektbeschreibung sowie die Dokumentation der Projektprämissen. Im Folgeschritt ist es notwendig, aus einer Vielfeldmatrix den geeigneten IT-Projekttyp zu ermitteln. Auf Basis der Achsen Ziele und Technologie ergeben sich folgende Projekttypen: Prozessverbesserer, Experimente, Erneuerer, Transformer (Apfel und Smith 2003, S. 5 f.).

Im Vorfeld der Kosten- und Nutzenanalyse findet eine Auswahl der relevanten Capabilities der IT-Lösung statt. Die eigentliche Bewertungslogik basiert auf dem „Gartner Business Performance Framework“ und somit auf der Verwendung von „Business Metrics“. Hierbei stehen dem Anwender eine Bibliothek an Nutzen- und Kostenaspekten sowie Indizes zur Verfügung, die zur Ermittlung der Vorteilhaftigkeit genutzt werden können (Smith 2010, S. 9). Für die Kostenkalkulation wird der bewährte Ansatz der TCO herangezogen und auf Framework interne bzw. Framework externe Kosten angewendet. Die Untergliederung der Kostenkalkulation erfolgt zudem in die drei Kategorien Technology, Personal, Betrieb und Prozess. Eine Gewichtung der Capabilities ermöglicht die individuelle Anpassung des Kalkulationsergebnisses (Apfel und Smith, 2003, S. 7 ff.).

Im vorletzten Bewertungsschritt des TVO wird die Business Capability qualitativ bewertet. Dabei gilt es die wirtschaftlichen bzw. geschäftsbezogenen Nutzen der IT-Investition zu ermitteln. Diese Einschätzung basiert auf fünf Säulen und wird als „Dynamic Benefit Realization“ (DBR) bezeichnet: Konformität mit der Strategie, Einfluss auf den Geschäftsprozess, IT-Architektur, Geldrückfluss, Risikobewertung (Apfel und Smith, 2003, S. 14 f.).

Der letzte Bewertungsschritt beinhaltet die Erfassung der geschäftlichen, technologischen und kulturellen Risiken sowie eine quantitative Ermittlung des zukünftigen Nutzens der IT-Investition, sofern dieser als Grundlage für andere, weiterführende Projekte oder Technologien dient (Apfel und Smith 2003, S. 15 f.). Die umfangreiche Analyse der IT-Investition ermöglicht die Erstellung einer Vielzahl an Berichten und Auswertungen. Hierzu gehören Kennzahlenberichte für diverse Finanzkennzahlen wie bspw. den ROI und die Analyse der Nutzenrealisierungswahrscheinlichkeit (Apfel und Smith 2003, S. 30).

### **Rapid Economic Justification (REJ) nach Mascarella et al. (2013)**

Der von Mascarella et al. (2013) entwickelte Leitfaden zur Optimierung von IT-Investitionen, bietet einen strukturierten, aus fünf Schritten bestehenden Ansatz zur Bewertung von

Investitionsvorhaben. Das fünf-stufige Modell besteht aus „Business Assessment“, „Solution“, „Cost and Benefit“, „Risk“ und „Financial Metrics“ Analysen (Mascarella 2005, S. 2 ff.).

Im Schritt des „Business Assessment Requirements“ wird das Vorhaben möglichst detailliert beschrieben. Zur Unterstützung dienen bspw. eine Stakeholderanalyse oder die Identifikation der Projektprämissen bzw. kritischen Erfolgsfaktoren inklusive messbarer KPIs. Darüber hinaus beinhaltet dieser Schritt eine Verknüpfung der zu bewertenden IT-Investition mit der dadurch beeinflussten IT- sowie Unternehmensstrategie (Mascarella 2005, S. 21 ff.). Im Prozessschritt des „Solution Mappings“ geht es hauptsächlich um die Durchführung einer Prozessanalyse, bestehend aus der Erstellung eines Ist-Prozesses, der Definition von Optimierungen, basierend auf identifizierten Schwachstellen, sowie der Entwicklung eines anzustrebenden Soll-Zustandes (Mascarella 2005, S. 56).

Die „Benefit Analyse“ basiert auf den Fragen, ob Kosten reduziert, respektive vermieden oder ob Gewinne gesteigert, respektive gesichert werden können. Wie bereits aus anderen Bewertungsansätzen bekannt, erfolgt auch beim REJ die Beantwortung der Nutzenfragen getrennt aus Sicht der IT sowie des Fachbereiches (Mascarella 2005, S. 70). Die Zusammenstellung der Kosten basiert auf der Nutzung einer Kostenbibliothek für direkte und indirekte sowie laufende und einmalige Kosten. Die Kosten und Nutzen werden anschließend im Jahresvergleich über die gesamte Projektlaufzeit gegenübergestellt, um den wirtschaftlichen Überschuss ermitteln zu können (Mascarella 2005, S. 83 ff.).

Im Rahmen einer Risikoanalyse wird eine Vielzahl an Projektrisiken analysiert. Hierzu zählen „Alignment“, „Solution“, „Financial“, „Organizational“, „Operational“ und „Technological Risks“. Auf Basis der ermittelten Risiken findet eine Bewertung nach Auswirkung und Eintrittswahrscheinlichkeit statt. Die Ergebnisse der Vier-Feld-Matrix werden im „Risk Statements“ zusammengefasst (Mascarella 2005, S. 95 ff.).

Im letzten Schritt „Financial Metrics and Value Proposition“ erfolgt zunächst eine Zusammenstellung der finanziellen Kalkulationsergebnisse. Dabei nutzt der REJ Ansatz den ROI, Net Cashflow<sup>32</sup> und die Break-Even-Analyse (Mascarella 2005, S. 101 ff.). Die Strukturierung und Erstellung einer Managementpräsentation zu den Kalkulationsergebnissen, basierend auf den Prozessschritten des REJ Ansatzes, schließt den Leitfaden ab (Mascarella 2005, S. 115 ff.).

---

<sup>32</sup> Der Cashflow ist eine „Finanzielle Stromgröße, die den in einer Periode erfolgswirksam erwirtschafteten Zahlungsmittelüberschuss angeben soll. [...] Der Cashflow ist Ausdruck [...] der Innenfinanzierungskraft eines Unternehmens.“ (Breuer und Breuer 2018 b)

### 3.5 Zwischenergebnis: Literaturbewertung und Ableitung des Forschungsbedarfs

Die aggregierten Analyseergebnisse der relevanten Literatur zur ökonomischen Bewertung von Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Investitionen sind in Form einer Forschungsmatrix in Tabelle 4 dargestellt.

Literaturquellen zur Investitionsbewertung	Anforderungskriterien											
	AK 1: Gültigkeit für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik	AK 2: Praxistaugliches, strukturiertes Vorgehensmodell	AK 3: Berücksichtigung von Kosten- und Nutzenaspekten	AK 4: Systematisierungslogik für Kosten- und Nutzenaspekte	AK 5: Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten	AK 6: Bibliotheken mit Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten	AK 7: Anforderungen aus direkten und indirekten Bereichen an Kosten/-Nutzenanalyse	AK 8: Beitrag zur Schaffung synchroner IT-Systemlandschaften inklusive Technologieauswahl	AK 9: Berücksichtigung von Unsicherheiten und Risiken	AK 10: Methoden zur Prozessvisualisierung und -optimierung	AK 11: Gobbeschreibung des Investitionsvorhabens	AK 12: Abschließende Investitionsbewertung mittelrelevanter Investitionsrechnungsverfahren
Obermeier et al. (2018)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●
Günther et al. (2018)	●	●	●	●	●	○	○	○	○	●	○	●
Schuh et al. (2018)	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	●	●
Volkman et al. (2014)	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	●	●
Schiffer & Autenrieth (2019)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	●	●	●
Kirazli (2017)	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	○	●
Liebrecht (2020)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	●
Stocker et al. (2019)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	●	●
Kirsch (2017)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●
Plattform Mittelstand 4.0 (2016)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●
Seiter et al. (2016)	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	○	●
Plattform Mittelstand 4.0 (2020)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	●	●
Barthelmey et al. (2019)	●	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●
Hetterscheid (2020)	●	●	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○
Fraunhofer IML (2018)	○	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●
Plattform Mittelstand 4.0 (2017)	○	●	●	○	○	○	○	○	○	●	●	●
Kesten & Schröder (2006 & 2009)	○	●	●	●	○	○	○	○	○	●	●	●
Schäffer et al. (2018)	○	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●
Westkämper et al. (2006)	○	●	●	●	○	○	○	○	○	●	○	●
Eigner & Stelzer (2009)	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Forrester Research Inc. (2003)	○	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●
Gartner Framework (2003)	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Mascarella et al. (2005)	○	●	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●
Geßner (2023)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● = vorhanden      ○ = teilweise vorhanden      ○ = nicht vorhanden

Tabelle 4: Konzeptvergleich der relevanten wissenschaftlichen Bewertungsansätze für Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Investitionen auf Basis der Anforderungskriterien

Insgesamt konnten dreiundzwanzig relevante Ansätze zur Investitionsbewertung von Industrie 4.0, Digitalisierungs- oder IT-Lösungen identifiziert werden. Die Bewertung basiert auf dem Vorhandensein von insgesamt zwölf spezifischen Anforderungskriterien, die aus der relevanten Literatur abgeleitet wurden. Dabei wird je Bewertungsansatz und Kriterium ein schwarzer Kreis für Anforderungskriterium vorhanden und ein grauer Kreis für Anforderungskriterium teilweise vorhanden vergeben. Ein weißer Kreis visualisiert, dass ein Anforderungskriterium nicht erfüllt wurde. Die maximal erreichbare Punktzahl je Ansatz liegt demnach bei zwölf Punkten. Der mit acht Punkten am höchsten bewertete Ansatz stammt von Kesten und Schröder aus dem Jahr 2006 bzw. 2009.

Das erste Anforderungskriterium nach der Gültigkeit der Bewertungssystematiken für Industrie 4.0 Investitionen im Bereich der Produktion und Logistik erfüllen insgesamt vierzehn von dreiundzwanzig Ansätze. Die restlichen neun Ansätze sind nicht mit dem Schwerpunkt Industrie 4.0 entwickelt worden. Wie insbesondere die Bewertung des Ansatzes von Kesten und Schröder (2006 und 2009) zeigt, haben diese dennoch eine hohe Relevanz für das zu entwickelnde Vorgehensmodell.

Alle Ansätze erfüllen das zweite Anforderungskriterium vollständig, welches ein praxistaugliches, strukturiertes Vorgehensmodell fordert. Daraus wird ersichtlich, dass ein Vorgehensmodell zur Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Investitionen mehrere Schritte zur gesamtheitlichen Analyse der zu bewertenden Investition umfassen muss und nicht nur aus einer Kosten-/Nutzenanalyse bestehen kann.

Dreiundzwanzig Ansätze berücksichtigen sowohl Kosten- als auch Nutzenaspekte bei der Investitionsbewertung vollständig. Allerdings zeigt die Analyse des Standes der Wissenschaft auch, dass aktuell eine Vielzahl an Kosten- und Nutzenaspekten im Rahmen wissenschaftlicher Veröffentlichungen existieren (Smith 2010, S. 4; Schuh et al. 2018, S. 45 f.; Stocker et al. 2019, S. 8), die es operativen Endanwendern schwer macht, den Überblick zu behalten und die tatsächlich relevanten Kosten- und Nutzenaspekte für die zu bewertende Investition zu identifizieren. Erschwerend kommt hinzu, dass es zu Überschneidungen bei den Kosten- und Nutzenaspekten kommt, die einen expliziten Industrie 4.0 Bezug aufweisen und denjenigen, die zur Bewertung von Digitalisierungs- und IT-Lösungen entwickelt wurden. Daher ist durch die Erkenntnisse, dass Industrie 4.0 Projekte stets IT-Umfänge beinhalten (Kagermann et al. 2013, S. 45) sowie gleiche Bezeichnungen von Nutzenaspekten sowohl bei Bewertungsansätzen mit und ohne direkten Industrie 4.0 Bezug vorherrschen (Kesten und Schröder 2009, S. 8; Schuh et al. 2018, S. 45 f.), eine explizite Untersuchung nach relevanten Kosten- und Nutzenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen sowie deren relativer Bedeutung vorzunehmen. Das Ziel bei der

Beantwortung dieser Forschungsfrage besteht darin, die in der Literatur genannten Kosten- und Nutzenaspekte auf Basis von qualitativen Experteninterviews mit Projektleitern von Industrie 4.0 Projekten aus den Bereichen Produktion und Logistik zu validieren. Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage:

***Forschungsfrage 1: Welche Kosten- und Nutzenaspekte sowie deren Bedeutung können für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik identifiziert und validiert werden?***

Neun von dreiundzwanzig Ansätzen liefern vollständige Ansätze zur Systematisierung der Kosten- und Nutzenaspekte. Weitere vier Ansätze bieten diesbezüglich teilweise Lösungen an. Dabei ist festzuhalten, dass die Systematisierungslogiken sehr unterschiedlich sind und keinem einheitlichen Vorgehen entsprechen. Nachdem in Forschungsfrage 1 der Aufbau von Kosten- und Nutzenaspekteübersichten erfolgt ist, schließt sich daher die Frage nach einem Ordnungssystem für die identifizierten Aspekte an. Schwerpunktmäßig wird hierbei die Systematisierung der Nutzenaspekte beleuchtet, da die maximale Anzahl an genannten Nutzenaspekten der analysierten Literaturbeiträge bei einundvierzig liegt (Smith 2010, S. 4) und damit eine praxisorientierte und effiziente Nutzung nicht möglich ist. Ziel bei der Beantwortung der Forschungsfrage ist die möglichst einfache, jedoch allgemeingültige Formulierung und Visualisierung von Abhängigkeiten der Nutzenaspekte untereinander. Dabei steht die Vereinfachung der Bewertungslogik für den Endnutzer und somit die Steigerung der Praxistauglichkeit im Mittelpunkt. Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage:

***Forschungsfrage 2: Wie muss ein geeigneter Ordnungsrahmen zur Systematisierung der Nutzenaspekte aufgebaut sein, um zur Komplexitätsreduzierung bei der Kosten- und Nutzensauswahl beizutragen?***

Vier Ansätze berücksichtigen teilweise eine Quantifizierung und/oder Monetarisierung von qualitativen Nutzenaspekten oder beschreiben konzeptionelle Vorgehensweisen. In keinem der Ansätze konnte eine vollständige Umsetzung dieser Anforderung auf Nutzenaspektenebene nachgewiesen werden. Entgegen der Fachliteratur, aus der häufig zu entnehmen ist, dass die Monetarisierung von qualitativen Aspekten fehleranfällig und nicht zielführend sei (Colbe und Witte 2018, S. 309), ist es aus praktischen Gründen nicht nur sinnvoll sondern auch absolut notwendig, sich mit der gesamtheitlichen Monetarisierung von qualitativen Nutzenaspekten zu beschäftigen (Stocker et al. 2019, S. 499), um das Dilemma der fehlenden Vergleichbarkeit von monetären und nicht-monetären Nutzenaspekten zu überwinden (Kruschwitz und Lorenz 2019,

S. 10; Schulte 2007, S. 123; Günter et al. 2021, S. 1). Zudem kann nur dadurch verhindert werden, dass die qualitativen Nutzenaspekte bei der Investitionsbewertung „unter den Tisch fallen“ (Kofner 2016, S. 163). In einem Großteil der analysierten Bewertungsansätze erfolgt zudem eine Unterteilung in qualitative und quantitative Nutzenaspekte, was dazu führt, dass die Ansätze häufig einen monetär messbaren Teil und einen nicht-monetär bewertbaren Teil aufweisen. Die Ergebnisse beider Bewertungsbestandteile sind demzufolge nicht direkt miteinander vergleichbar und müssen daher stets über eine zusätzliche Operation zusammengeführt werden (Schuh et al. 2018, S. 48 f.).

Die alleinige Bereitstellung eines wissenschaftlichen Vorgehensmodells zur Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten ist aus operativer Sicht nicht zielführend. Operativen Endanwender fehlt häufig die Zeit oder das Know-how, um diese Modelle in der Praxis anzuwenden. Um der Praxistauglichkeit dieser Arbeit Rechnung zu tragen, gilt es daher Nutzenbibliotheken aufzubauen, die sowohl Quantifizierungs- als auch Monetarisierungsmöglichkeiten zu den einzelnen Nutzenaspekten aufzeigen. Operativen Endanwendern wird dadurch eine Möglichkeit geboten, die Nutzenaspekte gezielt auswählen und effizient eine Kosten-/Nutzenanalyse erstellen zu können. In fünf der dreiundzwanzig untersuchten Ansätze sind hierzu teilweise Lösungen enthalten. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse ergibt sich folgende Forschungsfrage:

***Forschungsfrage 3: Wie lassen sich die identifizierten Nutzenaspekte quantifizieren, monetär messbar machen und anwendergerecht sowie praxistauglich aufbereiten?***

Das siebte Anforderungskriterium nach einer Unterscheidung im Bewertungsprozess zwischen direkten und indirekten Unternehmensbereichen in Bezug auf die Kosten-/Nutzenanalyse erfüllt keiner der Ansätze. Da ganzheitliche Industrie 4.0 Lösungen wie bspw. „System Lifecycle Management Systeme“ als Weiterentwicklung klassischer PLM-Systeme den gesamten Produktlebenszyklus von Engineering über „Start of Production“ bis „End of Production“ im Sinne einer gesamtheitlichen Vernetzung gezielt mit Informationen versorgen, sind zwangsläufig unterschiedliche direkte wie indirekte Unternehmensbereiche betroffen (Eigner 2016, S. 144; Stark et al. 2016, S. 177). Die Anforderung an die Interdisziplinarität solcher Industrie 4.0 Lösungen im Produktlebenszyklus (Eigner 2016, S. 145) in Verbindung mit der Erkenntnis, dass starke strukturelle Unterschiede zwischen operativen und administrativen Unternehmensbereichen existieren (Hillmer 2016, S. 66), wirft die Frage nach den möglichen Kosten- und Nutzenstrukturen in den unterschiedlichen Bereichen auf (Eigner 2016, S. 145 f.). Daher gilt es zu untersuchen, ob abweichende Kosten- und Nutzen-

aspektstrukturen in direkten und indirekten Bereichen zu abweichenden Anforderungen an eine Kosten-/Nutzenanalyse für Industrie 4.0 Investitionen führen und somit die Entwicklung einer separaten Vorgehensweise erfordern. Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage:

***Forschungsfrage 4: Stellen Industrie 4.0 Lösungen in direkten und indirekten Unternehmensbereichen in Produktion und Logistik unterschiedliche Anforderungen an eine Kosten-/Nutzenanalyse?***

Anforderungskriterium acht nach dem Beitrag zur Schaffung synchroner IT-Systemlandschaften inklusive Technologieauswahl im Unternehmen erfüllen neun der dreiundzwanzig Ansätze teilweise. Das Anforderungskriterium wird zwar von einigen Beiträgen mehrfach erwähnt, jedoch werden keine konkreten Methoden oder Vorgehensmodelle aufgezeigt (Schuh et al. 2018, S. 42 f.; Stocker et al. 2019, S. 500). Da diese Anforderung für die Bewertung einer Industrie 4.0 Investition als zwingend notwendig anzusehen ist (Seiter et al. 2017, S. VII; Kagermann et al. 2013, S. 6), besteht hier Untersuchungsbedarf, um einen geeigneten Bewertungsschritt zu entwickeln und in den zu entwickelnden Ansatz aufnehmen zu können.

Das elf von dreiundzwanzig Ansätzen eine partielle oder vollständige Risiko- und Unsicherheitsanalyse im Rahmen der Bewertungssystematik nutzen, zeigt die Bedeutung des Anforderungskriteriums für die Investitionsbewertung. Die Vorgehensmodelle sind hierbei sehr vielfältig und folgen keiner einheitlichen Logik. Daher gilt es auch hier die Integration eines solchen Bewertungsschritts in das zu entwickelnde Vorgehensmodell zu untersuchen und im Sinne einer möglichst hohen betrieblichen Praktikabilität zu überarbeiten und entsprechende Methoden auszuwählen.

Das Anforderungskriterium zehn nach den Methoden zur Prozessvisualisierung und -optimierung ist bei vierzehn der dreiundzwanzig analysierten Ansätze zu finden. Aufgrund der hohen Häufigkeit kann die Validität des Anforderungskriteriums nachgewiesen werden. Somit ist auch ein solcher Bewertungsschritt in einen ex-ante Bewertungsansatz zu integrieren.

Das elfte Anforderungskriterium nach einer Projektgrobbeschreibung im Bewertungsprozess erfüllen zwölf Ansätze vollständig und drei teilweise. Auch hier weist die Heterogenität der identifizierten Ansätze die Notwendigkeit nach, einen geeigneten Bewertungsschritt in einen ex-ante Bewertungsansatz für Industrie 4.0 Investitionen aufzunehmen. Das zwölfte Anforderungskriterium nach der abschließenden Investitionsbewertung wird von allen Ansätzen vollständig oder teilweise berücksichtigt. Daher stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit eines solchen finalen Bewertungsschrittes nicht. Als Herausforderung bei der

methodischen Ausgestaltung ist jedoch die Wahl der relevanten und praxistauglichen Investitionsrechenverfahren zu betrachten.

Nach der Analyse der Bewertungsansätze in Tabelle 4 und unter Einbeziehung der Fachliteratur zur Investitionsrechnung und Industrie 4.0 lässt sich festhalten, dass ein einziger Bewertungsschritt, welcher lediglich die isolierte Kosten-/Nutzenbewertung umfasst, bei der hohen Komplexität der Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen nicht ausreichend ist.

Keiner der vorgestellten Ansätze erfüllt alle zwölf Anforderungskriterien. Weiterhin liefern vergangenheitsorientierte statistische Verfahren nur teilweise valide Ergebnisse für ex-post Analysen, da die Basisdaten in Ermangelung durchgeführter Industrie 4.0 Projekte nicht ausreichend sind (Schulte 2020). Aus diesen Gründen gilt es einen möglichst umfassenden ex-ante Bewertungsansatz zu entwickeln, der alle Anforderungskriterien erfüllt.

Das Ziel bei der Beantwortung der Forschungsfrage besteht also darin, ein geeignetes Vorgehensmodell zu entwickeln, welches die gewonnenen Erkenntnisse der Literaturanalyse in einem mehrstufigen Ansatz zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik berücksichtigt. Dabei liegt der Fokus auf der Integration aller relevanten Bewertungsschritte zur Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Investition sowie der endnutzeroptimierten Strukturierung, sodass die Investitionsbewertung praxistauglich und effizient erfolgen kann (Mascarella 2005, S. VI). Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage:

***Forschungsfrage 5: Welche Bewertungsschritte muss eine ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik umfassen, um den unterschiedlichen Anforderungskriterien gerecht zu werden?***

Der entwickelte Ansatz wird abschließend anhand von Praxisprojekten validiert, sodass die Praxistauglichkeit beschieden werden kann. Der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde ex-ante Bewertungsansatz für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik soll durch die konsequente Eliminierung der vorgestellten Forschungslücken alle Anforderungen erfüllen. Dieser ist in Tabelle 4 als separate Zeile am Ende der Tabelle aufgeführt.

## 4 Forschungskonzeptionierung und Entwicklung des Vorgehensmodells zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen

Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit in Bezug auf die Beantwortung der in Kapitel 3.5 definierten Forschungsfragen. Hierzu werden zuerst die gewählte Forschungssystematik sowie die Methodenauswahl bzgl. der Datenerhebung erläutert. Im Anschluss werden sowohl die Vorgehensweise als auch die Ergebnisse der Experteninterviews und internen Focus Group vorgestellt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung eines Modellrahmes inklusive Auswahl der relevanten Bewertungsschritte und Verfahren für die zu entwickelnde ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik ein. Kapitel 4.5 umfasst abschließend die Detailvorstellung des entwickelten Vorgehensmodells.

### 4.1 Forschungssystematik und Methodenauswahl

Zur Sicherstellung von Intersubjektivität ist die Darstellung der gewählten Forschungssystematik als zentrales Merkmal von Wissenschaftlichem Arbeiten anzusehen (Regelmann 2019, S. 155). Daher beinhaltet dieses Kapitel die Vorstellung der Forschungssystematik zur Beantwortung der Forschungsfragen. Regelmann (2019) formuliert die gewählte Gesamtforschungssystematik dieser Arbeit treffend mit: „Insgesamt zeichnet sich der [...] Gang der Untersuchung durch die Verknüpfung einer induktiv angelegten [qualitativen] Literaturanalyse mit einer induktiv qualitativ-empirischen Untersuchung aus. Nach BECKER (1990) eignet sich ein solches Gegenstromverfahren aus Theorie und Praxis insbesondere, um dem anwendungsorientierten Gedanken der Betriebswirtschaftslehre Rechnung zu tragen. Gerade im Kontext des Projektmanagements [und der Wirtschaftlichkeitsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen], welches eben nicht nur eine wissenschaftliche Disziplin, sondern vor allem auch ein Element der Wirtschaftspraxis ist, ist die gewählte Vorgehensweise fast unumgänglich“ (Regelmann 2019, S. 14). Die Forschungssystematik dieser Arbeit ist in Abbildung 15 dargestellt.

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 1, 3 und 4 nach den relevanten Kosten- und Nutzenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen für direkte und indirekte Unternehmensbereiche sowie deren Quantifizierbarkeit und Monetarisierbarkeit bietet sich eine solche Vorgehensweise im speziellen an. Die möglichen Kosten- und Nutzenaspekte sowie die relevanten

Quantifizierungs- und Monetarisierungsverfahren werden aus Literaturbeiträgen extrahiert, ohne, dass daraus die eigentliche Relevanz oder die konkrete Messbarkeit in Bezug auf Industrie 4.0 Lösungen abgeleitet werden kann. Als Gegenstück hierzu liefern Experteninterviews mit Projektleitern von ausgewählten Praxisprojekten aus direkten und indirekten Unternehmensbereichen gezielte, unabhängige Einzeleinschätzungen auf Basis der jeweiligen Industrie 4.0 Lösung zu Relevanz, Bedeutung und Messbarkeit. Hierbei ist zwangsläufig gemäß qualitativer Forschungslogiken vorzugehen, da alleine die Analyse der Vielzahl an Literaturbeiträgen zu den möglichen Kosten- und Nutzenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen den Rahmen der Arbeit überschreiten würde.

Für die Beantwortung von Forschungsfrage 2 wird ein vergleichbarer Ansatz gewählt, welcher aus einer qualitativen Literaturanalyse zu den relevanten Systematisierungslogiken für Nutzenaspekte und einem Focus Group Ansatzes zur praktischen Einordnung und Ausgestaltung besteht. Die geringe Anzahl relevanter Systematisierungslogiken in der Fachliteratur zur Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen lässt an dieser Stelle eine quantitative Literaturanalyse nicht zu. Die Wahl der Focus Group Methodik ist auf die möglichst breitgefächerte Diskussion einer praxisrelevanten Fragestellung durch Fachexperten in einem effizienten Forschungsformat zurückzuführen. Zudem führt die Diskussion in der Gruppe zu mehr Gesamtheitlichkeit (Carey und Asbury 2016, S. 17) und Rationalität sowie einer gesteigerten Nachvollziehbarkeit und Praktikabilität der Ergebnisse durch eine bessere Gesamtlogik (Hennink 2014, S. 3).

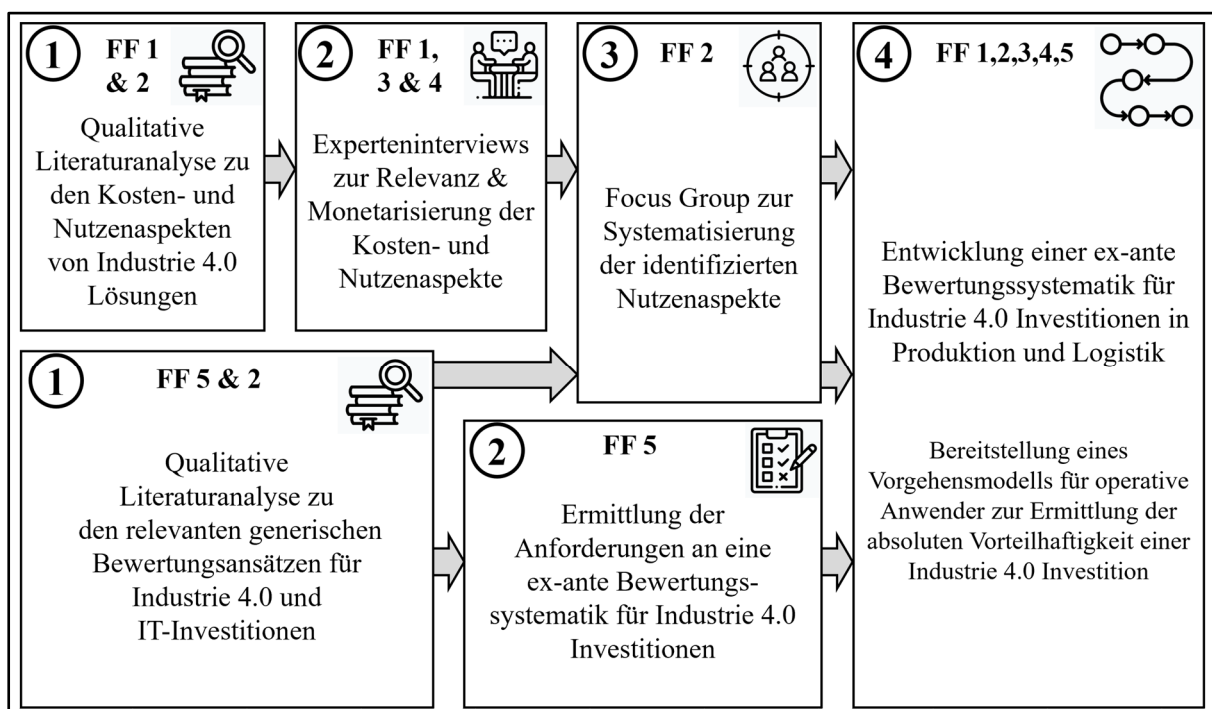


Abbildung 15: Forschungssystematik der vorliegenden Arbeit

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 nach dem Aufbau eines Vorgehensmodells zur Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik wird ausschließlich eine qualitative Literaturanalyse relevanter Bewertungsansätze als Untersuchungsmethodik gewählt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Analyse generischer Bewertungsansätze, die im Großteil mit praktischem Bezug und unter Mitwirkung von aus der Praxis stammenden Projektteams entwickelt wurden. Der Grund für die Wahl einer Methode der Sekundärforschung liegt in der Tatsache begründet, dass Methoden der Primärforschung aufgrund der Neuheit des Themas Industrie 4.0 falsche, irrelevante oder unvollständige Informationen liefern (Schuh et al. 2018, S. 41; Schumacher et al. 2020, S. 25). Es ist nicht davon auszugehen, dass Projektleiter oder Finanzcontroller aus dem praktischen Umfeld aufgrund unklarer Definition und Abgrenzung die Komplexität einer Investitionsbewertung für Industrie 4.0 in Gänze umreißen (Regelmann 2019, S. 261 f.) und somit auf Basis von qualitativen Experteninterviews ein geeigneter ex-ante Bewertungsansatz entwickelt werden kann. Daher wird auf die Analyse bestehender Ansätze aus der Literatur zurückgegriffen.

Die Ergebnisse aller Forschungsfragen werden abschließend in ein Vorgehensmodell zur ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen überführt, welches im weiteren Verlauf der Arbeit methodisch ausdetailliert, strukturiert erläutert und auf Grundlage zweier Praxisprojekte validiert wird.

#### 4.1.1 Durchführung der Experteninterviews

Für die möglichst effiziente Durchführung der neununddreißig Experteninterviews, deren Industrie 4.0 Anwendungsfälle in Tabelle 5 visualisiert sind, wurde der in Anhang 1 dokumentierte Interviewleitfaden mit siebenunddreißig Leitfragen entwickelt. Der Leitfaden umfasst die systematische Abfrage der aus der Fachliteratur abgeleiteten sechsunddreißig relevanten Nutzenaspekte für Industrie 4.0 Lösungen sowie deren Kostenaspekte. Zu Beginn wird der Projektleiter auf Grundlage der von Hillmer (2016) erarbeiteten Unterschiede zwischen Anwendungsfällen in direkten und indirekten Bereichen gebeten, eine Einordnung seines Projektes in den direkten oder indirekten Bereich vorzunehmen. Insgesamt wurden zwanzig Industrie 4.0 Lösungen aus indirekten und neunzehn aus direkten Unternehmensbereichen betrachtet.

Der nachfolgende Interviewmodus beginnt stets mit der Frage, ob ein Nutzenaspekt für das Projekt des interviewten Projektleiters relevant ist oder nicht. Wenn dies der Fall ist, wird im Dialog besprochen, wodurch der Nutzenaspekt entsteht und wie dieser quantitativ zu messen ist. Hierbei wird im Rahmen der Diskussion die Methode der Wirkungskettenanalyse

angewendet, um Quantifizierungsmöglichkeiten zu identifizieren. Wenn ein Nutzenaspekt nicht relevant für das jeweilige Projekt ist, wird dieser übersprungen und geht nicht in die Auswertung ein.

Nr.	Industrie 4.0 Lösung	Gewerk	Bereich
1	Digitale Montageplanungsapplikation	Montage	indirekt
2	Digitale Logistikplanungsapplikation	Logistik	indirekt
3	Digitales Kennzahlen und Zielemanagementsystem	Diverse	indirekt
4	Cloud basierte Gebrauchtmachinesapplikation	Diverse	indirekt
5	Intelligente Investitionsplanungsapplikation	Diverse	indirekt
6	Teilautomatisierte Lastenhefterstellung	Diverse	indirekt
7	Datenbasierte Bewertung von Fügeverfahren	Karosseriebau	indirekt
8	Digitaler Zwilling	Montage	indirekt
9	Umbaukoordinierungsapplikation	Montage	indirekt
10	Autonome Gebäudeenergiesteuerungsapplikation	Diverse	indirekt
11	Autonome Datenerfassung und Verarbeitung via QR Codes	Montage	indirekt
12	Robotersimulationsapplikation	Karosseriebau	indirekt
13	Assistenzsystem zur Bewertung von CKD Prozessen	Logistik	indirekt
14	Cloud basierte Schulungsplattform	Diverse	indirekt
15	Planungs- und Steuerungsapplikation für Trainings	Diverse	indirekt
16	Transportverkehrssimulationsapplikation	Logistik	indirekt
17	Workflowbasierte Steuerungssoftware im Brandfall	Diverse	indirekt
18	PLM-System	Diverse	indirekt
19	VR gestützte Montageplanungsapplikation	Montage	indirekt
20	VR gestützte Supermarktplanungsapplikation	Logistik	indirekt
21	Schwarmintelligentes, autonomes AGV	Logistik	direkt
22	KI gestützte, kamerabasierte Verbauprüfung	Montage	direkt
23	Schwarmintelligentes, autonomes AGV	Logistik	direkt
24	Pick by Scan Werkerführungssystem	Logistik	direkt
25	RFID gestütztes Behältertracking	Presswerk	direkt
26	Montagesupermarkt mit Ware zum Mann Prinzip	Logistik	direkt
27	Predictive Maintenance Lösung	Karosseriebau	direkt
28	Flurungebundenes Transportsystem	Logistik	direkt
29	Kommunikationsschnittstelle OPC UA	Karosseriebau	direkt
30	Predictive Maintenance Lösung	Karosseriebau	direkt
31	Predictive Maintenance Lösung	Montage	direkt
32	Teilautonomes Fabriksteuerungssystem	Logistik	direkt
33	Autonome, kamerabasierte Innenraumprüfung	Montage	direkt
34	Modulares Fertigungssystem	Montage	direkt
35	Autonome Routenzugplanung & -steuerung	Logistik	direkt
36	Autonome, sensorgestützte Klebezelle	Karosseriebau	direkt
37	Autonome, sensorgestützte Schweißzelle	Karosseriebau	direkt
38	AR basierte Werkerführung via Datenbrillen	Montage	direkt
39	Flexibles, teilautonomes Kommissioniersystem	Logistik	direkt

Tabelle 5: Überblick zu den Industrie 4.0 Anwendungsfällen der durchgeführten Experteninterviews

In einem ersten Schritt der Interviewauswertung war es möglich, konkrete Beispiele aus dem betrieblichen Umfeld für die jeweiligen Nutzenaspekte zu identifizieren und diese über alle neununddreißig Interviews strukturiert zusammenzutragen. Somit konnte eine Beispielsbibliothek aufgebaut werden, welche Projektleitern die teilweise abstrakten Nutzenaspekte anhand von konkreten Praxisbeispielen verdeutlicht. Dies erleichtert den operativen Anwendern die Entscheidung, ob ein Nutzenaspekt für das Industrie 4.0 Projekt Relevanz besitzt.

Weiterhin wurden die unterschiedlichen Quantifizierungsmöglichkeiten je Nutzenaspekt und Interview identifiziert und gekennzeichnet. Anschließend erfolgte die Überprüfung der übrigen Interviews, um die Häufigkeiten der jeweiligen Quantifizierungsmöglichkeiten je Nutzenaspekt ermitteln zu können. Dadurch war es möglich, die Relevanz und Bedeutung der einzelnen Quantifizierungsmöglichkeiten je Nutzenaspekt über alle neununddreißig Interviews nachzuweisen.

Zudem dienen die identifizierten Quantifizierungsmöglichkeiten dem Aufbau eines Ordnungssystems zwischen den Nutzenaspekten in Kapitel 4.3.2 mit dem Ziel, insbesondere die Praktikabilität der Kosten-/Nutzenanalyse zu erhöhen. Die Identifikation von Mustern zwischen den Interviewaussagen in Bezug auf den Kernnutzen der jeweiligen Nutzenaspekte ermöglicht ferner die Definition des Nutzensäuersers im Kontext Industrie 4.0. Für die systematische Strukturierung der Auswertungsergebnisse wurden Steckbriefe je Nutzenaspekt entwickelt, die alle relevanten Erkenntnisse beinhalten.

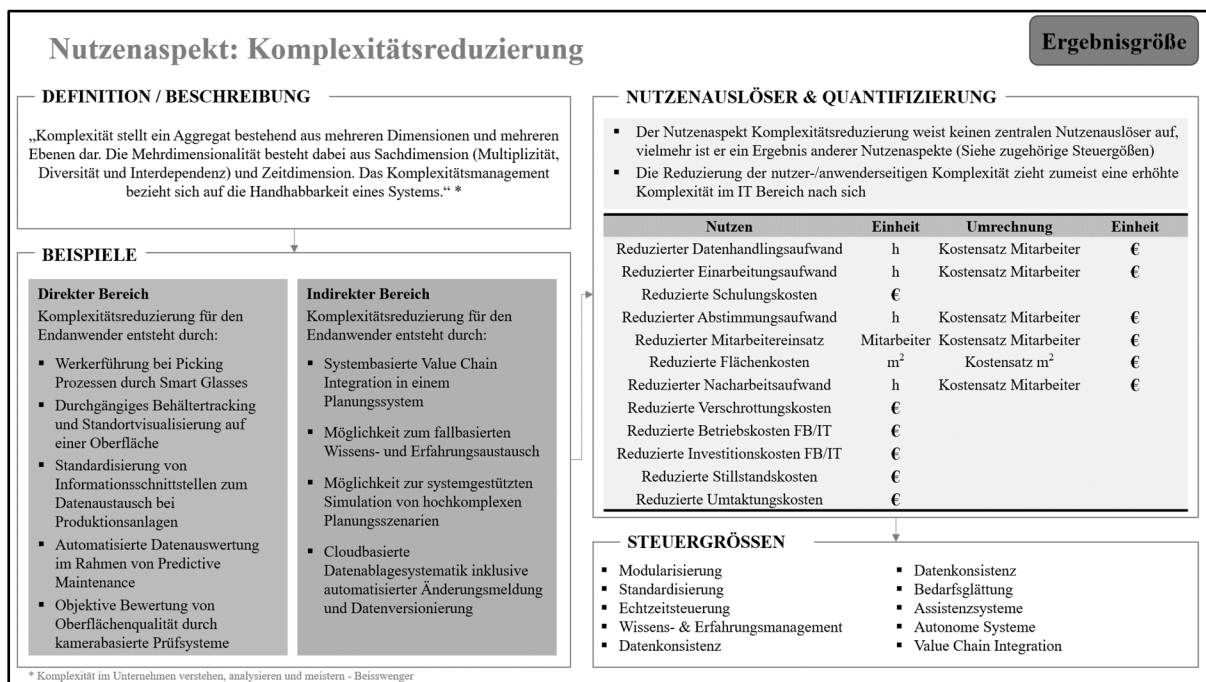


Abbildung 16: Steckbrief der Ergebnisgröße Komplexitätsreduzierung

Ein exemplarischer Steckbrief für die Ergebnisgröße Komplexitätsreduzierung ist in Abbildung 16 dargestellt. Die übrigen Steckbriefe sind vollständig in Anhang 4 aufgeführt. Der Steckbrief beinhaltet eine literaturbasierte Definition des jeweiligen Nutzenaspektes. Nachfolgend sind Nutzenbeispiele auf Basis der analysierten Industrie 4.0 Projekte aufgeführt. Hierbei sind zumeist Beispiele für Projekte aus direkten und indirekten Bereichen aufgelistet.

Die linke Seite des Steckbriefs soll dem operativen Anwender dabei helfen, ein besseres Verständnis in Bezug auf den Nutzenaspekt im Kontext Industrie 4.0 zu erlangen und somit die Frage nach der Relevanz gezielt beantworten zu können. Auf der rechten Seite des Steckbriefs erhält der Projektleiter Details zu den im Kontext Industrie 4.0 relevanten Nutzenkategorien sowie den Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten. Auf dieser Basis kann im Rahmen der Kosten-/Nutzenanalyse die effiziente und praxistaugliche Auswahl zutreffender quantitativer Nutzensausprägungen erfolgen. Der letzte Abschnitt auf dem Steckbrief zeigt die Verbindung zu den jeweiligen Steuer- oder Ergebnisgrößen. Eine Vorstellung dieser Systematisierungslogik erfolgt in Kapitel 4.3.2.

#### 4.1.2 Durchführung der Focus Group

Die initialen Ergebnisse zu den relevanten Nutzenaspekten aus dem vorherigen Kapitel wurden als Eingangsgröße für eine Focus Group mit dem Schwerpunkt der weiterführenden Analyse und Optimierung der Nutzenaspekte sowie deren Systematisierung verwendet. Der Auslöser für die Focus Group basierte auf der Erkenntnis, dass eine Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen mit zweiunddreißig Nutzenaspekten keine pragmatische und operativ effizient einsetzbare Unterstützungslogik für operative Anwender sein kann. Zudem wurde im Rahmen der Experteninterviews in Bezug auf einige Nutzenaspekte erwähnt, dass keine wirklichen Unterschiede untereinander bestehen und somit eine Redundanzprüfung erforderlich ist.

„Ist eigentlich häufig das Gleiche, bloß anders interpretiert oder bezeichnet.“ (I6T2 00:08:31)

Hierzu fanden vier moderierte Ganztagesworkshops mit einer Gruppe von acht Experten aus den Fachbereichen Projektleitung Prozessdigitalisierung, Virtuelle Montage, Technologieentwicklung, Digitale Fabrik, Facharchitektur, Portfoliomanagement und Controlling statt, um auf Basis der erarbeiteten Steckbriefe die Redundanzen innerhalb der Nutzenaspekte zu eliminieren und eine geeignete Systematisierungslogik aufzubauen. Die Experten wurden bewusst aus unterschiedlichen Fachbereichen zusammengestellt, um eine möglichst breite Diskussion und Einschätzung zu den einzelnen Nutzenaspekten zu erhalten.

Der Aufbau einer praxistauglichen Systematisierungslogik fand im selben Teilnehmerkreis mit demselben Hintergrund statt, um auch hierbei das Ergebnis durch unterschiedliche Sichtweisen fundiert absichern zu können. Die Gemeinsamkeit aller Teilnehmer in Bezug auf die grundlegenden Fragestellungen dieses Kapitels bestand darin, dass jede Fachdisziplin in die gesamtheitliche Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik im betrieblichen Umfeld eingebunden ist und somit relevanten Input liefern konnte. Die methodische Vorgehensweise innerhalb der Focus Group verdeutlicht Abbildung 17.

Im ersten Schritt wurden die einzelnen Steckbriefe der Nutzenaspekte im Team durchgearbeitet und auf Redundanzen überprüft. Nur eine einstimmige Entscheidung führte dazu, Nutzenaspekte zu eliminieren. Zur Systematisierung der Nutzenaspekte wurden im zweiten Schritt die im Rahmen der qualitativen Literaturanalyse zu den relevanten Bewertungsansätzen für Industrie 4.0 und Digitalisierungsinvestitionen identifizierten Systematisierungslogiken vorgestellt und auf deren Praxistauglichkeit für operative Anwender hin analysiert. Auf dieser Basis fand im dritten Schritt die Zuordnung der Nutzenaspekte per Definition in die ausgewählte Systematisierungslogik statt. Darauf aufbauend konnten die quantitativen Abhängigkeiten der jeweiligen Nutzenaspekte festgelegt werden. Mit der Überarbeitung der Steckbriefe der einzelnen Nutzenaspekte endete die Arbeit der Focus Group.

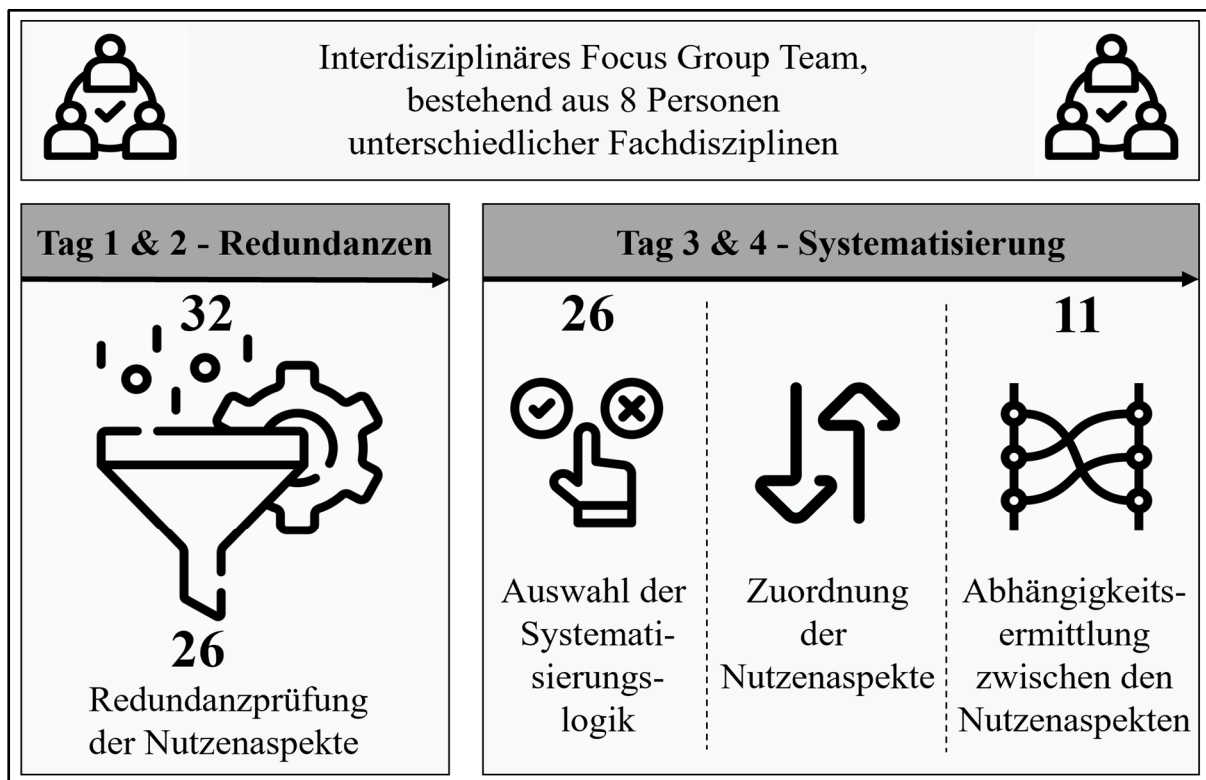


Abbildung 17: Vorgehensweise der Focus Group zur Systematisierung der Nutzenaspekte

### 4.1.3 Durchführung der Literaturanalyse

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 wird eine qualitative Literaturanalyse herangezogen, um die notwendigen Schritte für eine ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik zu entwickeln. In erster Linie werden vierzehn generische Bewertungsansätze für Investitionen aus der praxisorientierten Fachliteratur mit dem Fokus Industrie 4.0 analysiert, um dem Schwerpunkt dieser Arbeit gerecht zu werden und die Validität der Erkenntnisse bezüglich einer ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik sicherzustellen.

Da Industrie 4.0 Lösungen auch immer einen IT-Anteil aufweisen (Kagermann et al. 2013, S. 45) und sowohl in Praxis als auch Wissenschaft selten eine klare Abgrenzung der Begriffe Industrie 4.0, Digitalisierung und IT-Projekt existiert (vgl. Kapitel 2.1.2), wird der Untersuchungsrahmen sowohl um sechs nationale und drei internationale Bewertungsansätze für IT- sowie Digitalisierungslösungen erweitert, um ein möglichst breites Spektrum an relevanten Literaturbeiträgen zur Auswertung heranziehen zu können. Somit ist es möglich, den zu entwickelnden Ansatz auf eine solide wissenschaftliche Basis zu stellen. Die insgesamt dreiundzwanzig relevanten Bewertungsansätze wurden bereits in Kapitel 3 detailliert beschrieben.

Durch einen Abgleich der Ansätze lassen sich die relevanten Bewertungsschritte sowie deren Bezeichnung und die Position im Vorgehensmodell ableiten. Zudem können übereinstimmende Verfahren und methodische Vorgehensweisen identifiziert werden, die bspw. aufgrund der Verwendungshäufigkeit in einen neuen Bewertungsansatz zu überführen sind. Im Abgleich mit den Anforderungskriterien an eine ex-ante Bewertungssystematik ist es ebenfalls möglich fehlende oder wenig ausgeprägte Bewertungsschritte zu identifizieren und methodisch auszugestalten.

## 4.2 Ermittlung relevanter Kosten- und Nutzenaspekte sowie deren Quantifizierung

In diesem Kapitel erfolgt die Vorstellung ausgewählter Ergebnisse der neununddreißig Experteninterviews in Bezug auf die Quantifizierung und Monetarisierung von relevanten Kosten- und Nutzenaspekten für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik. Die Inhalte des Kapitels beantworten die Forschungsfragen 1, 3 sowie 4 und sind Eingangsgrößen zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 und 5.

#### 4.2.1 Bedeutung und Quantifizierbarkeit von Nutzenaspekten

Das nachfolgende Kapitel beinhaltet die Beantwortung von Forschungsfrage 1 und 4 nach der Relevanz der identifizierten Kosten- und Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik sowie der Bedeutung unterschiedlicher Kosten- und Nutzenaspekte für Projekte aus direkten und indirekten Unternehmensbereichen. Danach folgt die Beantwortung von Forschungsfrage 3 nach der Quantifizierung und Monetarisierung von insbesondere Nutzenaspekten. Hierbei wird auf die Erkenntnisse zu den einzelnen Nutzenaspekten auf Basis der Interviewergebnisse im Abgleich zur aktuellen Literatur eingegangen.

#### **Relevanz der Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen in direkten und indirekten Unternehmensbereichen**

Im ersten Schritt der Interviewauswertungen wurden die Häufigkeiten der Nutzenaspekte je analysiertem Projekt, getrennt nach direkten und indirekten Bereichen, zusammengetragen und analysiert. Die Übersicht zu den Ergebnissen der Häufigkeiten je Nutzenaspekt ist in Tabelle 6 dargestellt, was gleichzeitig die Bedeutung der einzelnen Nutzenaspekte im Kontext Industrie 4.0 widerspiegelt. Auf Basis der Übersicht lassen sich bereits Forschungsfrage 1 und 4 nach der Relevanz der identifizierten Nutzenaspekte sowie Unterschieden zwischen Projekten aus dem direkten und indirekten Bereich beantworten.

Bei Forschungsfrage 4 gilt es dabei herauszuarbeiten, ob durch die unterschiedliche Relevanz der Nutzenaspekte eine separate Kosten-/Nutzenanalyse zu entwickeln ist. Wie Tabelle 6 verdeutlicht, existieren signifikante Unterschiede zwischen Projekten aus dem direkten und indirekten Bereich. Bei den indirekten Projekten konnte bei zehn Nutzenaspekten ein Anteil von  $\geq 90$  Prozent erreicht werden, was deren hohe Relevanz aufzeigt. Den niedrigsten Wert mit einem Anteil von 15 Prozent erreichen gleich zwei Nutzenaspekte. Dem gegenüber stehen vier Nutzenaspekte mit einem Prozentsatz von  $\geq 90$  Prozent bei den indirekten Industrie 4.0 Projekten, sowie zwei Aspekte, die lediglich einmal genannt wurden und somit einen Anteil von lediglich 5 Prozent aufweisen. Der einzige Nutzenaspekt mit einer kumulierten Häufigkeit von 100 Prozent ist die Ressourceneffizienz. Im Folgenden werden die Abweichungen innerhalb eines Nutzenaspektes zwischen direkten und indirekten Industrie 4.0 Lösungen von  $\geq 25$  Prozent detailliert vorgestellt. Weitere Details zu den Nutzenaspekten je untersuchtem Industrie 4.0 Projekt sind in Anhang 5 aufgelistet.

Nr.	Nutzenaspekte	indirekt	% Anteil	direkt	% Anteil	gesamt	% Anteil
1	Mitarbeitereinsatzflexibilität	12	60	15	79	27	69
2	Variantenflexibilität	10	50	12	63	22	56
3	Volumenflexibilität	7	35	8	42	15	38
4	Komplexitätsreduzierung	13	65	16	84	29	74
5	Reaktionsfähigkeit	20	100	15	79	35	90
6	Individualisierung der Bedienoberfläche	11	55	5	26	16	41
7	Value-Chain Integration	12	60	10	53	22	56
8	Modularisierung	13	65	14	74	27	69
9	Standardisierung	19	95	16	84	35	90
10	Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen	13	65	8	42	21	54
11	Vernetzung von Systemen	19	95	19	100	38	97
12	Echtzeitsteuerung	7	35	12	63	19	49
13	Autonome Systeme	3	15	14	74	17	44
14	Mitarbeitervernetzung	12	60	1	5	13	33
15	Erfahrungs- und Wissensmanagement	15	75	11	58	26	67
16	Assistenzsysteme	16	80	15	79	31	79
17	Mitarbeiterakzeptanz	20	100	14	74	34	87
18	Durchlaufzeitreduzierung	20	100	17	89	37	95
19	Verbesserung der Prozessqualität	20	100	17	89	37	95
20	Verbesserung der Produktqualität	10	50	8	42	18	46
21	Automatisierung	14	70	18	95	32	82
22	Virtuelle Absicherung	10	50	6	32	16	41
23	Ressourceneffizienz	20	100	19	100	39	100
24	Prozesseffektivität	15	75	12	63	27	69
25	Ausfallsicherheit	6	30	12	63	18	46
26	Informationsverfügbarkeit	18	90	15	79	33	85
27	Nutzerfreundlichkeit	11	55	8	42	19	49
28	Lernfähigkeit von Systemen	6	30	13	68	19	49
29	Arbeitsergonomie	12	60	10	53	22	56
30	Datenkonsistenz	17	85	13	68	30	77
31	Anforderungs- bzw. Fertigungsgerechtigkeit	13	65	12	63	25	64
32	Bedarfsglättung	3	15	3	16	6	15
33	Skalierbarkeit	18	90	18	95	36	92
34	Termintreue	7	35	1	5	8	21
35	Engpasserkennung	7	35	5	26	12	31
36	Prozesstransparenz	20	100	17	89	37	95

Tabelle 6: Ergebnisse der Experteninterviews zu den Häufigkeiten der ausgewählten Nutzenaspekte

Der Nutzen durch eine Individualisierung einer Bedienoberfläche ist mit 55 Prozent im indirekten Bereich um 29 Prozentpunkte höher als im direkten Bereich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Industrie 4.0 Lösungen im direkten Bereich eher eine standardisierte Bedienoberfläche aufweisen, um den wechselnden Mitarbeitern im Schichtsystem stets gleiche Informationen über den zumeist hoch repetitiven Prozess zur Verfügung zu stellen. Dahingegen arbeiten Mitarbeiter im indirekten Bereich zwar häufig im selben System, benötigen jedoch unterschiedliche Informationen und können durch eine Individualisierung der Bedienoberfläche schneller und effizienter arbeiten.

„[...] also letztendlich ist es ja so, dass die verschiedenen Nutzer hier verschiedene Ansprüche haben, der eine will es größer haben, die Alarme, der andere will die Alarme kleiner haben. Ich persönlich bin halt so, dass ich gern mein Cockpit selber zusammenstelle. Wenn ich sage, okay, für mich sind das die wichtigsten Alarme, also verschiedene Kennzahlen, die muss ich immer im Blick haben.“ (I9 00:11:35)

Der Nutzenaspekt Echtzeitsteuerung weist einen Unterschied von 28 Prozentpunkten auf und zeigt damit, dass dieser Aspekt im direkten Bereich relevanter ist. Der größte Unterschied von 55 Prozentpunkten ist beim Nutzenaspekt Mitarbeitervernetzung zu finden. In indirekten Bereichen hat dieser Nutzenaspekt, insbesondere bei komplexen Planungsprozessen, an denen mehrere Prozesspartner beteiligt sind, eine große Bedeutung. Im direkten Bereich sind häufiger Einzelarbeitsplätze implementiert, was eine Mitarbeitervernetzung nicht zwingend erforderlich macht. Dieser Trend wird durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen im direkten Bereich noch verstärkt.

„Nee, wir bringen sie eher auseinander. Also sorry, das sehe ich eher so, weil die Mitarbeiter noch autarker an ihrem Arbeitsplatz arbeiten, vielleicht weniger in Kontakt mit dem Staplerfahrer und Materialbereitsteller sind [...].“ (I6 00:22:55)

Mit einem Unterschied von 25 Prozentpunkten liegt auch der Nutzenaspekt Automatisierung in dem relevanten Bereich. Jedoch sind hier die Absolutwerte bei 70 und 95 Prozent überdurchschnittlich hoch, sodass trotzdem von einer hohen Relevanz gesprochen werden kann.

Der Unterschied von 33 Prozentpunkten zeigt, dass die Ausfallsicherheit im direkten Bereich eine deutlich höhere Relevanz als im indirekten Bereich aufweist. Die Ursache dafür liegt darin begründet, dass der Ausfall von Industrie 4.0 Lösungen im direkten Bereich gleichbedeutend mit Verfügbarkeitsreduzierungen bzw. verspäteten Anlieferungen ist, die wiederum Output kosten.

„[...] aber wenn die Software ausfällt, dann wars das. Dann ist weniger Termintreue als wenn ein Stapler ausfällt.“ (I6 00:25:12)

Im indirekten Bereich besteht zumeist keine zeitliche Restriktion, sodass selbst ein längerer Ausfall durch manuelle Tätigkeiten überbrückbar ist.

Weitere signifikante Unterschiede konnten mit 30 Prozentpunkten beim Nutzenaspekt Termintreue identifiziert werden. Im direkten Bereich weist die Termintreue eine höhere Bedeutung auf, da im Worst Case immer ein Bandstillstand die direkte Folge sein kann.

„Wir hatten das mit einem Automobilisten sogar mal durchgerechnet. Die Anlieferung von einem Standard Dringteil an der Linie liegt heute irgendwo bei 10 bis 15 Minuten und mit einer Drohne liegt man bei 5 Minuten. Das heißt, diese Prozesse verbessern wir. Die 5 bzw. 10 Minuten können entscheidend sein, da entweder ein Bandstillstand droht oder eine Nacharbeit [...].“ (I2 00:34:05)

In Bezug auf die Frage der Relevanz der Nutzenaspekte ergab die Auswertung der Interviews, dass die Aspekte Vernetzung von Systemen, Mitarbeiterakzeptanz, Lernfähigkeit von Systemen und Ausfallsicherheit nicht als Nutzen, sondern vielmehr als Grundvoraussetzungen zu sehen sind, sodass ein Nutzen durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen entstehen kann. Details hierzu werden im Folgenden bei der Vorstellung der jeweiligen Nutzenaspekte erläutert. Die Ausfallsicherheit wird sogar als Nachteil bzw. als Herausforderung von digitalen Lösungen gesehen.

„Du hast halt in dem Kontext die viel größere Ausfallwahrscheinlichkeit, weil du digitalisiert bist. Punkt.“ (I6 00:24:55)

Dadurch reduziert sich die Anzahl der relevanten Nutzenaspekte von sechsunddreißig auf zweiunddreißig. In Bezug auf die beiden zu beantwortenden Forschungsfragen nach der Relevanz der ausgewählten Nutzenaspekte für Industrie 4.0 Lösung in Produktion und Logistik sowie der Identifikation von signifikanten Unterschieden zwischen Projekten aus dem direkten und indirekten Bereich, die auf eine abweichende Kosten-/Nutzenanalysemethodik hinweisen, konnten klare Ergebnisse abgeleitet werden.

Alle Nutzenaspekte sind in mindestens eine projektbezogene Nutzenbewertung eingeflossen, sodass grundsätzlich alle ausgewählten Nutzenaspekte, ausgenommen der vier Grundlagenaspekte, in einen ganzheitlichen Bewertungsansatz integriert sein müssen. Ebenso verhält es sich mit der differenzierten Betrachtung der direkten und indirekten Projekte. Jeder Nutzenaspekt ist mindestens einmal ausgewählt worden, sodass lediglich prozentuale Abweichungen bestehen aber keine absoluten. Als Ergebnis zu diesem Punkt der Auswertung lässt sich festhalten, dass eine einheitliche Kosten-/Nutzenanalyse im Rahmen einer ex-ante Bewertungssystematik für direkte und indirekte Projekte mit zweiunddreißig identifizierten Nutzenaspekten zu entwickeln ist.

Neben den steckbriefbasierten Detailauswertungen der betrachteten Nutzenaspekte in Anhang 4 sowie der Häufigkeiten der Quantifizierungsmöglichkeiten in Anhang 5 umfasst dieses Kapitel eine Zusammenstellung der Kernaussagen aus den Experteninterviews zu den einzelnen Nutzenaspekten. Hierzu werden prägnante und repräsentative Zitate aus den Experteninterviews als Grundlage genutzt. Zudem erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse in die aktuellen Stand der Literatur. Es ist zu erwähnen, dass die hier vorgestellten Nutzenaspekte noch ungefiltert, also vor der Restrukturierungs- und Systematisierungsphase vorgestellt werden.

## **Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten**

Die initiierte Fragestellung für diese Arbeit bestand in der Identifikation von praxistauglichen Möglichkeiten zur Quantifizierung und Monetarisierung von qualitativen Nutzenaspekten sowie dem Aufbau von Bibliotheken zu den relevanten Nutzenaspekten für Industrie 4.0 Lösungen, da diese in der Praxis zwar dokumentiert, jedoch in der klassischen Kosten-/Nutzenrechnung nicht berücksichtigt werden (Kofner 2016, S. 163). Daher zielt Forschungsfrage 3 auf die Beantwortung dieser Fragestellung ab.

Die zentrale Erkenntnis, die zur Beantwortung der Frage nach der Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten notwendig ist, besteht darin, das Thema fundamental neu zu betrachten. Bei neunzehn von dreiundzwanzig betrachteten Bewertungsansätzen aus Kapitel 3.5 ist festzuhalten, dass schlussendlich eine fehlende direkte Vergleichbarkeit von qualitativen und quantitativen Aspekten eine gesamtheitliche Bewertung verhindert. Die überwiegende wissenschaftliche Methodik der Einteilung in qualitative und quantitative Nutzenaspekte führt zu einer eingeschränkten Denkweise und lässt die Zusammenführung und somit gleichwertige Berücksichtigung für Kosten-/Nutzenanalysen nicht zu. Daher wird diese Logik im Rahmen des zu entwickelnden Vorgehensmodells nicht verwendet. Wie in Kapitel 3 vorgestellt, existieren in der Literatur Ansätze, die Möglichkeiten zur Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten aufzeigen, dies jedoch stets im Rahmen der bestehenden Methodengrenzen beschreiben.

Die Ansätze von Hettterscheid (2020), Kesten und Schröder (2006 und 2009) und Seiter et al. (2016) beschreiben eine systematische Vorgehensweise zur Monetarisierung von qualitativen und quantitativen Nutzenaspekten. Eine konkrete Erarbeitung der Messbarkeit der einzelnen Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen findet jedoch nur exemplarisch statt. Die übereinstimmende methodische Vorgehensweise der drei Ansätze kann demzufolge Anwendung finden, um im Rahmen dieser Arbeit konkrete Messbarkeiten der identifizierten sechsundzwanzig Nutzenaspekte zu erarbeiten und in Form von Steckbriefen zusammenzufassen.

Neben der Analyse der Bewertungsansätze findet zusätzlich eine Analyse der Verfahren zur Nutzenerfassung aus Kapitel 2.4.3 statt. Wie in Abbildung 18 dargestellt zeigt sich, dass von den insgesamt fünf vorgestellten Verfahren drei geeignet sind, um Forschungsfrage 3 zu beantworten. Hierbei handelt es sich um zwei Identifikationsverfahren und ein prozessbezogenes Verfahren. Die Wirkungskettenanalyse ermöglicht durch die Erfassung von Folgewirkungen einzelner Nutzeneffekte die Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten. Die beiden Identifikationsverfahren der Wirkungskettenanalyse und der

„Extended Performance Analysis“ basieren auf demselben Prinzip, sodass beide Begrifflichkeiten im Grunde für ein einziges Verfahren stehen und auch als solches zu betrachten sind. Sofern im Rahmen der Wirkungskettenanalyse keine monetär messbaren Effekte ermittelt werden konnten, dient das Monetarisierungsverfahren zur finanziellen Bewertung quantitativer Nutzeneffekte. Grundsätzlich lässt sich schlussfolgern, dass die Kombination aus Wirkungskettenanalyse und Monetarisierungsverfahren die Möglichkeit bietet, sämtliche Nutzenaspekte messbar zu machen und einer Monetarisierung zuzuführen. (Hetterscheid 2020, S. 129).

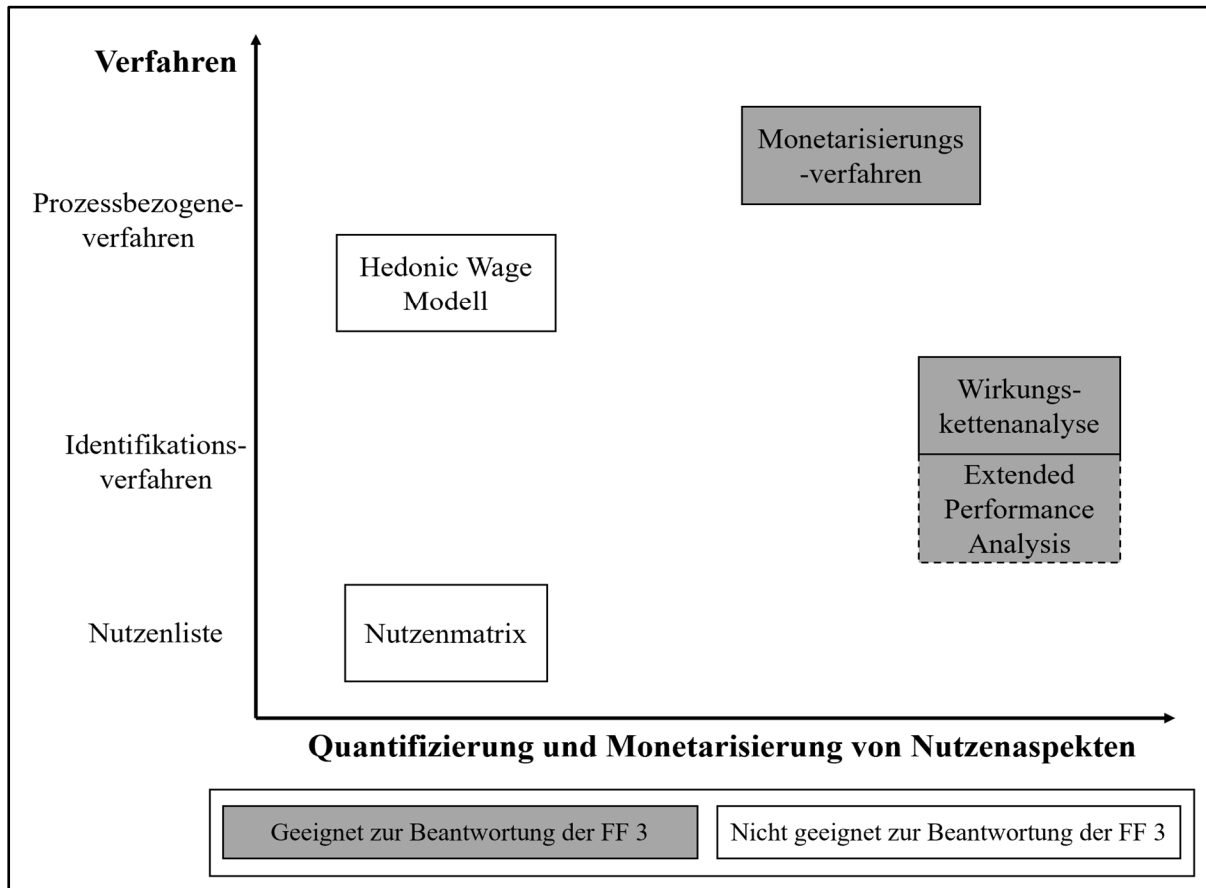


Abbildung 18: Nutzbarkeit der Verfahren zur Nutzenerfassung zur Beantwortung von FF 3

Das „Hedonic Wage Modell“ unterliegt einer stark subjektiven Bewertungslogik und vermisch qualitative und quantitative Nutzenaspekte, ähnlich der Nutzwertanalyse, sodass das Verfahren als ungeeignet einzustufen ist. Die Nutzenmatrix stellt lediglich eine Systematisierungslogik für Nutzenaspekte dar und kann durch die Einordnung der Aspekte in die Matrix zusätzlich als Abgrenzungswerkzeug verwendet werden. Forschungsfrage 3 kann mit diesem Verfahren nicht beantwortet werden.

Zur Ermittlung der Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten der einzelnen Nutzenaspekte wurde demzufolge in den Interviews die Wirkkettenanalyse verwendet, die davon ausgeht, dass es stets eine direkte Wirkung gibt, die jedoch nicht immer messbar ist.

Durch die Analyse der Folgewirkungen innerhalb der Wirkkette kann schlussendlich immer ein monetärer Nutzen identifiziert werden (Kesten und Schröder 2009, S. 7 ff.). Sofern erforderlich, dient das Monetarisierungsverfahren als Ergänzung, sodass über Umrechnungsäquivalente eine Monetarisierung sichergestellt werden kann. Es kann zudem die hohe Praxisakzeptanz der Wirkungskettenanalyse sowie des Monetarisierungsverfahrens nachgewiesen werden. Diese Methoden sind als zielführend für die Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten (Müller et al. 2003, S. 61) von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik zu betrachten.

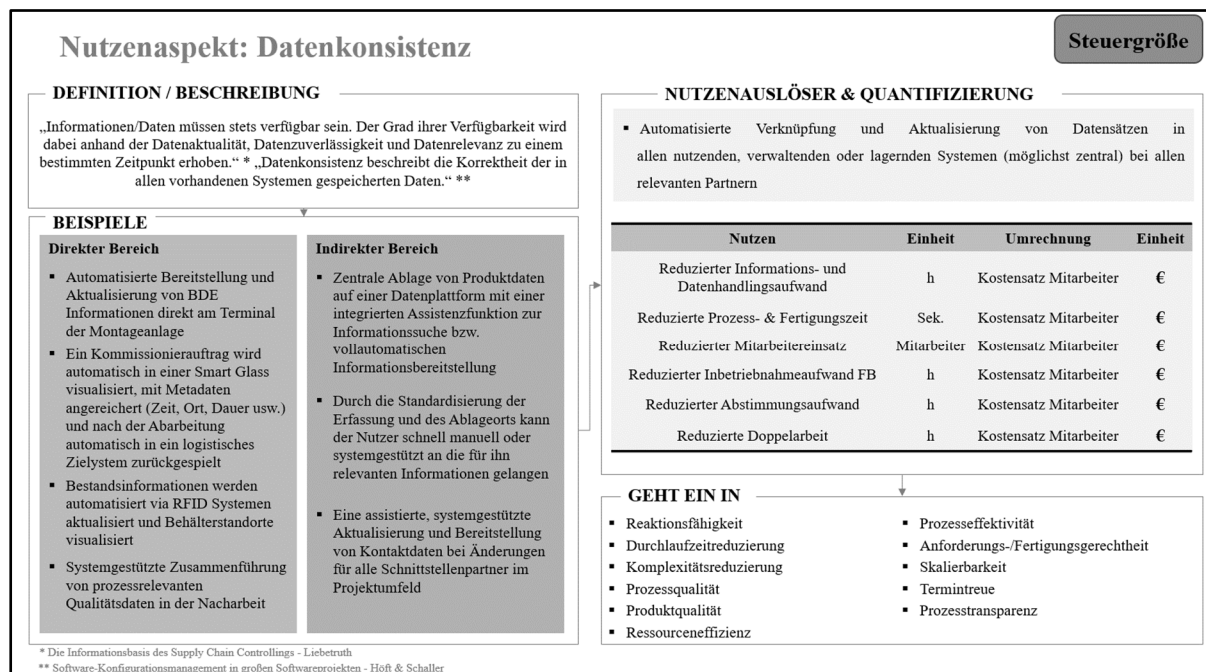


Abbildung 19: Quantifizierungsmöglichkeiten von Nutzenaspekten am Beispiel der Steuergröße Datenkonsistenz

Die Auswertung der Experteninterviews ergab eine Vielzahl an Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten der einzelnen Nutzenaspekte, die in Form eines Steckbriefs je Nutzenaspekt zusammengefasst sind. Wichtig zu erwähnen ist, dass ein Nutzenaspekt mehrere Quantifizierungsmöglichkeiten aufweisen kann. Ein Beispiel für die Quantifizierungsmöglichkeiten der Steuergröße Datenkonsistenz ist in Form eines Steckbriefs in Abbildung 19 dargestellt. Alle anderen Steckbriefe der übrigen Nutzenaspekte inklusive der Quantifizierungsmöglichkeiten sind in Anhang 4 nachzuschlagen.

Bei der Betrachtung der Steckbriefe ist zu erkennen, dass es gemäß Monetarisierungsverfahren eines Umrechnungsäquivalentes bedarf, um die Quantifizierungsmöglichkeiten in einen monetär ausweisbaren Wert zu überführen. Beispielsweise lässt sich der monetäre Wert der Reduzierung des Abstimmungsaufwands, der in Stunden errechnet wird, über einen

Mitarbeiterkostensatz pro Stunde ermitteln. Andere Nutzenaspekte, wie bspw. die Reduzierung von Lizenzkosten können direkt monetär ausgewiesen werden.

Mit einer Häufigkeit von 18,55 Prozent wurde die Quantifizierungsmöglichkeit der Reduzierung des Informations- und Datenhandlungsaufwands unter allen Quantifizierungsmöglichkeiten am häufigsten genannt. Dies lässt darauf schließen, dass Industrie 4.0 Lösungen in erster Linie zum Ziel haben, manuelle Datenhandlungstätigkeiten durch automatisierte, algorithmengestützte Prozesse abzulösen um dadurch Produktivitätssteigerungen zu erzeugen. Insgesamt konnten zweiunddreißig Quantifizierungsmöglichkeiten aus den Experteninterviews extrahiert werden. Die entsprechende Übersicht inklusive Kategorisierung ist in Tabelle 7 dargestellt.

Abgeleitet von der Kategorisierungslogik der mehrdimensionalen Bewertungsverfahren lassen sich Nutzenaspekte in vier Kategorien einteilen. Direkter Nutzen, der wiederum in budgetwirksamen und kapazitätswirksamen Nutzen unterteilbar ist, sowie indirekter oder relativer Nutzen, der in vermiedene Kosten und „Umsatzsteigerungen untergliedert werden kann (Aichele 2006, S. 68; Biethahn und Mucksch, 2004, S. 365). Die im Rahmen der Arbeit identifizierten Quantifizierungsmöglichkeiten lassen sich in die Kategorien direkter und indirekter Nutzen und deren Untergliederungen einteilen. Weiterführende Auswertungen zu der Häufigkeitsverteilung der einzelnen Quantifizierungsmöglichkeiten je Nutzenaspekt sind in Anhang 5 nachzulesen.

## **1. Direkter Nutzen**

Direkter Nutzen bezieht sich stets auf die Einsparung gegenwärtiger Kosten (Biethahn und Mucksch 2004, S. 365)

### **1.1 Budgetwirksamer Nutzen**

Diese Kategorie beinhaltet alle Anschaffungskosten oder laufenden Ausgaben bzw. deren Reduzierungen durch die Implementierung der Industrie 4.0 Lösung (Heuer 2013, S. 18 f.).

### **1.2 Kapazitätswirksamer Nutzen**

Kapazitätswirksame Nutzenaspekte haben einen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Potenzialfaktors. Potenzialfaktoren können Maschinen und Anlagen aber auch menschliche Ressourcen sein (Voigt 2018 b).

## **2. Indirekter Nutzen**

Indirekter Nutzen bezieht sich stets auf die Einsparung zukünftiger Kosten (Biethahn und Mucksch 2004, S. 365).

## 2.1 Vermiedene Kosten

Wenn ohne die Implementierung der Industrie 4.0 Lösungen weitergearbeitet wird, entstehen in der Folge Kosten, die durch eine Implementierung hätten vermieden werden können (Kesten und Schröder 2009, S. 9).

## 2.2 Umsatzsteigerungen

Diese Kategorie beschreibt die Erhöhung der in einer Periode zu einem bestimmten Preis verkauften Leistungen einer Unternehmung (Simon et al. 2018).

Kategorien	Nr.	Quantifizierungsmöglichkeiten
<b>Budgetwirksamer Nutzen</b>	1	Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand Fachbereich/IT
	2	Reduzierte Sonderfahrtkosten
	3	Reduzierte Reisekosten
	4	Reduzierte Investitionskosten Fachbereich/IT
	5	Reduzierte Materialeinsatzkosten
	6	Reduzierter Aufwand für Sonderprozesse
	7	Reduzierte Betriebskosten Fachbereich/IT
	8	Reduzierter Materialbestand
	9	Reduzierte Verschrottungskosten
	10	Reduzierter Personaleinsatz Fachbereich/IT
	11	Reduzierte Lizenzkosten
	12	Reduzierte Kosten für Gesundheitsmaßnahmen
	13	Reduzierte Stillstandskosten
	14	Reduzierter Flächenbedarf
	15	Reduzierte Schulungskosten
	16	Reduzierte Fehllieferungskosten
<b>Kapazitätswirksamer Nutzen</b>	17	Reduzierte Rüstzeiten
	18	Reduzierter Datenhandlungsaufwand
	19	Reduzierung von Nacharbeitsaufwand
	20	Reduzierte Bedienzeiten
	21	Reduzierter Informations- und Datenhandlungsaufwand
	22	Reduzierte Krankenquote
	23	Reduzierter Abstimmungsaufwand
	24	Reduzierte Doppelarbeit
	25	Reduzierter Einarbeitungsaufwand
<b>Vermiedene Kosten</b>	26	Reduzierter Umtaktungsaufwand
	27	Reduzierte Änderungskosten
	28	Reduzierte Strafzahlungen
	29	Reduzierte Fehlerkosten durch Fehlentwicklungen
	30	Reduzierte Vertragsstrafen
	31	Reduzierte Fluktuationsquote
<b>Umsatzsteigerungen</b>	32	Erhöhter Produktabsatz

Tabelle 7: Kategorisierung der Quantifizierungsmöglichkeiten der Nutzenaspekte

## **Detailergebnisse zu den Nutzenaspekten**

Weiterhin umfasst dieses Kapitel eine Zusammenstellung der Kernaussagen aus den Experteninterviews zu den einzelnen Nutzenaspekten. Hierzu werden prägnante und repräsentative Zitate aus den Experteninterviews als Grundlage genutzt. Zudem erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse in die aktuellen Erkenntnisse der Literatur. Es ist zu erwähnen, dass die hier vorgestellten Nutzenaspekte noch ungefiltert, also vor der Re-Strukturierungs- und Systematisierungsphase vorgestellt werden.

### ***1. Komplexitätsreduzierung***

In der Literatur wird Industrie 4.0 Anwendungen die Fähigkeit zugeschrieben, Komplexität zu managen und dadurch zu reduzieren (Kagermann et al. 2013, S. 25). Gemäß den Interviewpartnern wird Komplexität durch den Einsatz von Industrie 4.0 Anwendungen jedoch insbesondere für den Endanwender reduziert. Hierbei erzeugen die prozessbezogenen Daten und Informationen, die im optimalen Fall auch noch vollautomatisch in Form von intuitiven Oberflächen oder Assistenzsystemen zur Verfügung gestellt werden, eine deutliche Komplexitätsreduzierung. Standardisierung bspw. von Schnittstellen kann zudem zu einer Komplexitätsreduzierung beitragen. Mit einer Häufigkeit von 84 Prozent zählt die Komplexitätsreduzierung zu den Kernaspekten bei direkten Industrie 4.0 Use Cases.

„Für den Mitarbeiter, der den Innenraum prüfen muss, reduziere ich natürlich die Komplexität [...]“ (I7 00:04:59)

„Für den Mitarbeiter ja, wenn er nicht mehr dieses hyper super Expertenwissen braucht und auch ein bisschen mehr Transparenz im Prozess hat.“ (I12 00:06:03)

Die Komplexitätsreduzierung auf der Endnutzerseite bedeutet jedoch gleichzeitig eine Erhöhung der Komplexität auf der Seite der IT. Die Einführung, Wartung sowie der Betrieb von neuen IT-Systemen führt laut den Interviewexperten stets zu einer Komplexitätssteigerung in der IT selbst.

„Glaubst du, dass auf der IT-Seite eine Komplexitätssteigerung erst nötig ist? [...] Davon bin ich sogar überzeugt.“ (I4 00:01:14)

„Ich überlege gerade, nehmen wir Komplexität raus? Ich hätte fast gesagt, wir bauen sogar noch mehr ein. Ja. Durch die Systeme, die da mitspielen. [...] Okay, also auf der IT-Seite entsteht mehr Komplexität? Ja.“ (I10 00:00:16)

Die Messbarkeit der Komplexität von Systemen basiert auf der Summe der Anzahl Entscheidungen eines Individuums, plus der Anzahl Beziehungen innerhalb dieser Entscheidung (Flückinger und Rautenberger 1995, S. 15 f.).

Die Ergebnisse der Experteninterviews zeigen jedoch ein komplett anderes Bild. Die Messbarkeit von Komplexitätsreduzierung für den Endanwender nimmt bei Industrie 4.0 Lösungen vielfältige Zustände an. Von der Reduzierung von manuellem Aufwand für bspw. Datenhandling, über die Reduzierung von Fehlern im Prozess, reduzierten Investitionskosten durch Standardisierung bis hin zu vermindertem Schulungsaufwand sind Quantifizierungsmöglichkeiten von den Interviewpartnern genannt worden.

„[...] im Endeffekt können wir den Aufwand abschätzen, wie viel der Mitarbeiter dafür braucht. Ja, genau. Wie lange ein Mitarbeiter braucht, um die Informationen für sich übersichtlich darzustellen bzw. zu sammeln.“ (I3 00:03:23)

„Das kann man auch messen. Und zwar im Prinzip durch die Fehlerquote, weil wenn ich diese PPM Raten nehme, dann haben wir beim Scannen Fehlerraten von null.“ (I14 00:05:55)

„Vielleicht mit irgendwelchen Arbeitsstunden oder Investments, die wir treiben durch individuelle Systemanbindungen oder Anlagenverbindungen.“ (I13 00:02:20)

„[...] also im Kopf denke ich gerade an so was wie Schulungsbedarf. Also wie oft muss jemand geschult werden.“ (I12 00:06:48)

## **2. Verbesserung der Reaktionsfähigkeit**

Mit einer Häufigkeit von 90 Prozent bei den Experteninterviews stellt die Verbesserung der Reaktionsfähigkeit einen zentralen Nutzenaspekt von Industrie 4.0 Lösungen dar. Eine verbesserte Reaktionsfähigkeit im Prozess unterstützen Industrie 4.0 Lösungen durch sensorgestützte, automatisierte Datenverarbeitung und Informationsbereitstellung, wodurch eine erhöhte Prozesstransparenz entsteht. Automatisierte Datenaufnahme, -verarbeitung, -auswertung und -bereitstellung ermöglicht einen schnelleren Zugang zu entscheidungsrelevanten Informationen sowohl im direkten wie auch im indirekten Bereich. Ferner entsteht dadurch die Basis für vollautomatische Prozessanpassungen in Echtzeit.

„Das ist bei uns ja extrem hoch, weil wir einfach immer diese Sensorik haben, die in Echtzeit misst und Toleranzen erkennt und so direkt reagieren kann.“ (I10 00:05:40)

„Weil ich zuverlässig weiß, wie meine Ausgangslage ist. Und wenn ich weiß, ich habe jetzt hier ein Vorserienteil oder ein anderes Teil, dann weiß ich, ich hab hier die Differenz zwischen der Stückliste und dem, was ich vor Ort verfügbar habe. Und im Zweifelsfall ist die Regel dann, er geht zum Gruppensprecher und der Gruppensprecher klärt in der Zwischenzeit was passiert. Also die Reaktionsfähigkeit wird in dem Fall dadurch besser, dass er datenbasiert zuverlässig und schnell erkennt, wie die Sachlage ist.“ (I14 00:08:06)

Die Messbarkeit der Reaktionsfähigkeit gestaltet sich ähnlich vielfältig wie beim Nutzenaspekt Komplexitätsreduzierung. Die Interviewpartner erwähnen hauptsächlich Quantifizierungsmöglichkeiten wie reduzierte Fehlerraten, die zu reduziertem Ausschuss und Nacharbeit führen. Zusätzlich können erhöhte Anlagenverfügbarkeiten durch die Reduzierung von Anlagenstillständen erreicht werden. Die im Rahmen der Experteninterviews ermittelten

Quantifizierungen decken sich im Wesentlichen mit den bekannten Messbarkeitsansätzen in der Literatur, ohne dabei die in der Literatur vorhandene Fülle abzudecken (Müller und Bandl 2021, S. 30). Lediglich die Reduzierung von manuellen Datenhandlungsaufwänden durch automatische Datenaufbereitung kann als neue Erkenntnis eingestuft werden.

„Reaktionsfähigkeit, wenn irgendwo ein Fehler herrscht und ich erst mal ewig gucken müsste, wo der Hase im Pfeffer liegt, habe ich sicherlich ein Problem. Wenn mir so ein System hilft, weil es alle Daten zur Verfügung und gekoppelt hat, weiß ich schneller wo ich suchen muss.“ (I15T1 00:07:32)

### **3. Standardisierung**

Grundsätzlich ist die Standardisierung kein neuartiger Nutzenaspekt von Industrie 4.0 Lösungen. Nichtsdestotrotz weist die Standardisierung eine 90-prozentige Häufigkeit bei den Experteninterviews auf. Vielmehr ist Standardisierung als ein Grundpfeiler von schlanken Materialflüssen anzusehen (Dickmann 2015, S. 311). Auch in der 5S Methodik, die als Grundlage des Lean Managements dient, ist Standardisierung ein elementarer Bestandteil (Dickmann 2015, S. 28). Im Kontext Industrie 4.0 liegen die Nutzensauslöser in der Vereinheitlichung von Systemen, Schnittstellen, Software wie Anlagenkomponenten bzw. -elementen, welche dann auf andere Anwendungsfälle oder Unternehmensbereiche übertragbar sind.

„Ja, klar, Standardisierung von Datenschnittstellen, Standardisierung der Datenanalyse, Standardisierung der Systemkomponenten [...] (I15T1 00:14:07)

„Definitiv Ja. Gleiche, genau gleiche Systeme über die Werke zentral gesteuert ausrollbar.“ (I1 00:12:20)

In der Literatur wird der messbare Nutzen von Standardisierung oftmals in Form von generischen Aussagen oder Zielsetzungen beschrieben. So sind häufig Formulierungen zu finden wie: „Die Zielsetzung der Standardisierung ist es, Prozessergebnisse von Personen unabhängig zu machen und damit stabile Prozesse zu erreichen. Dadurch verbessern sich die Zusammenarbeit mit anderen Prozessen bzw. die Schnittstellen zu anderen Organisationseinheiten. Standards bilden ein einheitliches Verständnis von Prozessabweichungen, Fehlern und Problemen. Zudem entsteht dadurch eine Basis zur systematischen Problemlösung und für den kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Des Weiteren unterstützen Standards den Gedanken zur Reduzierung von Komplexität.“ (Bertagnolli 2020, S. 137).

Die Erkenntnisse der Experteninterviews lassen einen detaillierteren, weil konkreteren Einblick in die Quantifizierungsmöglichkeiten zu. Ähnlich dem Nutzenaspekt Modularisierung, lässt sich auch die Messbarkeit der Standardisierung in die Reduzierung von Betriebskosten und Entwicklungskosten unterteilen. Betriebskosten umfassen klassische Servicekosten im Einsatz

sowohl für den Fachbereich als auch für die IT. Qualifizierungsaufwand und Einarbeitungszeit von Mitarbeitern aber auch Fehlerquoten wurden von den Interviewpartnern genannt. Zudem können Aufwände für die Inbetriebnahme verringert werden. Bei den Entwicklungskosten erzeugt die Standardisierung eine Reduzierung von Entwicklungskosten für Folge- oder Parallelprojekte.

„Betriebskosten beispielsweise. Also insbesondere Servicekosten für die Systeme weil jedes Mal neu programmiert werden muss. Zwei verschiedene Systeme wollen das gleiche Add-On haben, dann muss ich das nur einmal programmieren statt zweimal. Man profitiert untereinander, wenn der eine was entwickelt und andere kann es direkt nutzen.“ (I1 00:12:44)

„Okay. Das heißt, für den Mitarbeiter ist der Prozess immer gleich. Du brauchst auch weniger Anlernzeit, weniger Qualifizierungsaufwand, oder? Genau. [...] Das heißt, der Schulungsaufwand verringert sich deutlich. [...] Glaubst du, dass sich auch Fehlerquoten reduzieren durch eine Standardisierung? Ja, davon bin überzeugt.“ (I4 00:22:18)

„Eine einheitliche Software und ein einheitlicher Betrieb für den Fachbereich und für die IT. Laufende Kosten im Betrieb, Kosten für die Betreuung, das sind genau diese. Das erreicht man ja nur durch einen Standard.“ (I6T1 00:14:51)

„[...] dass die Zuverlässigkeit in der Bereitstellung besser ist und das lässt sich im Endeffekt über die Fehlerrate oder PPM Rate messen.“ (I14 00:17:07)

„Reduzierte Schulungskosten für Systeme. Wenn wir Standardsysteme und standardisierte Herangehensweisen haben, generieren wir weniger Kosten bei der Inbetriebnahme und bei der Anwendbarkeit auf weitere Bereiche, Werk und Gewerke. [...] Das merken wir jeden Tag, wenn wir verschiedene SPS Standards haben, muss man immer dreimal schulen.“ (I16T1 00:11:13)

#### **4. Modularisierung**

Grundsätzlich zeigt sich der Nutzen der Modularisierung im Kontext von Industrie 4.0 nicht abweichend zu der allgemeinen Definition. Daher überrascht es nicht, dass der Nutzen durch die generische Entwicklung von logisch trennbaren, standardisierten Systembestandteilen wie Anlagen- oder Softwarekomponenten zur wiederholten Verwendung in Folgeprodukten entsteht oder zur Steigerung der Einsatzflexibilität beiträgt.

„Ja. Indem man modulare weitere Systembausteine anbieten kann. [...] Also nur für Sie zum Verständnis wir sind in der Lage, weiter z.B. Modulbausteine zu integrieren, zu erweitern, weil das wieder eine eigens programmierte Software ist. Wo wir dann in der Lage sind, weitere Module zu entwickeln, anzubinden, kommunizieren zu lassen. Haben wir halt in der Hand. In unserer Hand. Ist eine Frage von Ressourcen.“ (I1 00:11:55)

„Wenn ich von Hallengegebenheiten von 6,5 Metern Deckenhöhe in eine Halle mit 8,5 Metern Deckenhöhe umziehe kann ich einfach durch ein weiteres Modul in Höhe von 2 Metern die Anlage erhöhen.“ (I4 00:18:14)

„Ja, also wir können relativ schnell sagen, wir schalten jetzt ein Modul dazu oder aus. Also Module in Form von den Supermarkt kleiner machen oder einfach mal eine Pickstationen ausschalten. [...] Oder AGVs einfach rausnehmen und woanders einsetzen.“ (I9 00:14:06)

„Ja, also diese einzelnen Module, die ich eben erwähnt hatte, könnte man theoretisch auch für andere Dinge nutzen. Also gerade das Thema Bauteilidentifikation haben wir herausgelöst als einzelnes Projekt. Das könnte auch jeder andere Fügeprozess für sich verwenden.“ (I10 00:09:52)

Die Messbarkeit der Modularisierung von Industrie 4.0 Lösungen lässt sich in zwei Teilbereiche untergliedern. Zum einen erwähnen die Interviewpartner die Reduzierung von Betriebskosten in Form von Datenhandlungsaufwand, Mitarbeiterereinsatzzeit, Änderungskosten sowie Hard- und Softwarekosten. Gemäß den Interviewpartnern liegt der zweite ausschlaggebende Quantifizierungsblock der Modularisierung in der Reduktion von Entwicklungskosten für Folge- oder Parallelprojekte. Die aus den Interviews extrahierten Quantifizierungsmöglichkeiten decken sich mit den Ansätzen der Fachliteratur zur Verwendung von modularen Elementen im betrieblichen Umfeld (Bertagnolli 2020, S. 250 ff.).

### **5. Value Chain Integration**

Value Chain Integration manifestiert sich bei Industrie 4.0 Lösungen in der Zentralisierung von Datenablagen und -quellen für alle Prozesspartner bspw. in einer Cloud, sowie das prozessbezogene, automatisierte Versenden von Datenmanipulationsmeldungen bspw. bei Anpassungen von Datensätzen zur Erreichung von Datenkonsistenz. Zudem in der einheitlichen Nutzung von EDV-Systemen über alle Prozesspartner hinweg.

In der Fachliteratur wird die Messbarkeit von Value Chain Integration als Herausforderung gesehen. Aktuelle Publikationen verweisen zumeist auf die Produktivitätssteigerungen derer Firmen, die in ein aktiv gemanagtes Wertschöpfungsnetzwerk integriert sind (Kilicaslan et al. 2021, S. 154 f.). Die Ergebnisse der Experteninterviews belegen dies und bieten darüber hinaus einen detaillierteren Einblick in die Quantifizierungsmöglichkeiten. Die Messbarkeit der Value Chain Integration zeigt sich für die Interviewpartner bspw. in der Reduzierung von Prozesszeiten und manuellem Datenhandling, was im Endeffekt reduziertes Personal und somit eine Produktivitätssteigerung bedeutet. Zudem können Betriebskosten eine starke Reduktion erfahren. Hierbei reicht das Spektrum von der Reduzierung von komplexen Anlagenschnittstellen bis hin zur Minimierung von Betriebsaufwänden in Form von Druckkosten.

„Reduzierung von Prozesszeiten in dem Fall und damit am Ende von Personal.“ (I2 00:06:59)

„Geht’s auch in Richtung Datenhandling, dass sich dadurch Datenhandling verbessert? Ja, auf jeden Fall. Weil aktuell muss ich die Daten ja per Netzwerkzugriff, per remote Zugriff abziehen und dann noch mal bearbeiten und das verbessert sich alles.“ (I1 00:12:29)

„Das du halt einmal Infrastrukturkosten reduzierst. Das heißt, nicht jeder braucht ein Schnittstellensystem. Komplexität wird reduziert und auch wie viele Schnittstellen du brauchst und wahrscheinlich ist das IT-Architektur technisch einfacher. Wenn man das vereinheitlicht und auf zentrale Datenbanken schreibt. [...] Weil da sind dann solche Sachen wie Service Level Agreement 24/7 zu erwähnen. Das muss ich nicht für jede Schnittstelle wieder separat abschließen sondern kann das alles über eine Schnittstelle und ein Agreement laufen lassen. Da stecken schon Kosten drin.“ (I16T1 00:09:21)

„Ja, wenn man es vergleicht mit dem bestehenden Prozess dann ja. Weil wir aktuell viel auf Papier drucken und dafür Ressourcen benötigen. [...] Für den Umstieg auf die elektronische Ladeliste wurde ein Business Case gerechnet, wo signifikante Einsparungen an Betriebsmitteln in Form von Druckausrüstung erreicht wurden.“ (I14 00:11:46)

## **6. Usability / Nutzerfreundlichkeit**

Der Nutzen guter Usability oder Nutzerfreundlichkeit entsteht durch intuitiv gestaltete Systemoberflächen sowie Bedien- oder Prozessabfolgevisualisierungslogiken. Das Ziel hierbei besteht in der effizienten sowie effektiven Nutzerführung sodass eine Reduzierung von nicht wertschöpfenden Prozessen erfolgen kann. Zusätzlich führen die Interviewpartner an, dass die nutzergerechte und situative Aufbereitung und Visualisierung von Informationen ebenfalls unter Nutzerfreundlichkeit beim Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen verstanden werden kann. In der Literatur wird die Messbarkeit von Usability mit Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit der User beschrieben. Insbesondere Effizienz fasst dabei vielfältige Quantifizierungsmöglichkeiten vor dem Hintergrund des möglichst geringen Ressourceneinsatzes zur Zielerreichung zusammen (Gizycki 2002, S. 2 ff.). Diese decken sich mit den Ergebnissen der Experteninterviews. Quantifizierungsmöglichkeiten guter Usability lassen sich gemäß den Interviewpartner bspw. durch die Reduzierung von manuellen Informations- und Datenhandlungsprozessen, zumeist in Form von Suchaufwänden, darstellen. Schlussendlich hat dies wiederum Auswirkungen auf den Mitarbeitereinsatz. Zudem können Einarbeitungsaufwände reduziert und Anlagenstillstände durch erhöhte Reaktionszeiten minimiert werden.

## **7. Autonome Systeme**

Der Nutzenschwerpunkt von autonomen Systemen im Kontext Industrie 4.0 liegt mit einer Häufigkeit von 74 Prozent klar im direkten Bereich. In indirekten Bereichen liegt die Häufigkeit lediglich bei 15 Prozent und bildet somit den geringsten Wert aller Nutzenaspekte. Der Nutzen entsteht hauptsächlich durch die Selbststeuerung der Prozesse. Dies können bspw. logistische Transport- oder Materialbereitstellungsprozesse sein. Autonome Systeme bilden in sich geschlossene Regelkreise, die automatisiert ablaufen und im Idealfall eigenständig, datenbasierte Optimierungen vornehmen.

Die am häufigsten von den Interviewpartnern genannte Quantifizierungsmöglichkeit von autonomen Systemen ist die Reduzierung von manuellen Tätigkeiten und somit Mitarbeitereinsatz sowie die Eliminierung von Prozessfehlern durch menschliche Eingriffe. Zudem sind reduzierte Flächennutzung und verminderte Anlagenstillstandszeiten durch verbesserte Reaktionszeiten genannt worden. Die von den Experten genannten Quantifizierungsmöglichkeiten bilden die bisherigen Erkenntnisse der Fachliteratur ab (Hirsch-Kreinsen und Karacic 2019, S. 11 f.).

## **8. Wissens- und Erfahrungsmanagement**

Der Nutzen von Industrie 4.0 Lösungen in Bezug auf das Wissens- und Erfahrungsmanagement besteht in der Bündelung und teil- oder vollautomatisierten Bereitstellung des in einer Organisation vorhandenen oder in einem Prozess generierten Wissens und Erfahrungen für künftige und andere Nutzer in Form von Assistenz- oder Hinweissystemen. Zudem können KI-basierte Systeme auf systematisch erfasste Wissens- und Erfahrungsdaten zurückgreifen und somit einen selbststeuernden Optimierungskreislauf aufbauen.

In der Fachliteratur als wirtschaftswissenschaftlicher Produktionsfaktor eingestuft, soll effizientes Wissens- und Erfahrungsmanagement in erster Linie die organisationale Überlebensfähigkeit sichern (Pawlowsky 2019, S. 21). Jedoch besteht seit jeher die Schwierigkeit der Messbarkeit immaterieller Vermögensgüter wie Wissen und Erfahrungen (Pawlowsky 2019, S. 24). Vorherrschende Bewertungsansätze versuchen den Marktwert eines Unternehmens in Relation zum Buchwert oder dem Wiederbeschaffungswert zu setzen und somit das im Unternehmen gebundene Know-how zu quantifizieren (Pawlowsky 2019, S. 122 ff.).

Durch die Anwendung der Wirkungskettenanalyse konnten konkrete Messbarkeiten des Nutzenaspekts Wissens- und Erfahrungsmanagement ermittelt werden. Gemäß den Interviewpartnern hat Wissens- und Erfahrungsmanagement bei Industrie 4.0 Lösungen einen großen Wirkungshorizont, was sich in der Vielzahl der identifizierten Quantifizierungsmöglichkeiten widerspiegelt. Beginnend bei reduzierten Trainingskosten und Einarbeitungszeiten für neue Mitarbeiter, über die Reduzierung von Investitions- und Bestands- bzw. Flächenkosten bis hin zur Fehlerreduzierung im Prozess. Zusätzlich lassen sich Datenhandlungsaufwände für das manuelle Verwalten von Wissen- und Erfahrungen stark vermindern.

„Indem ich weniger spezifisches Know-how der einzelnen Linien haben muss. Das heißt Trainingszeit. Das ist der messbare Punkt. Oder Einarbeitungszeit eines neuen Mitarbeiters.“ (I1 00:17:59)

„Da geht es z.B. darum, ich hab so und so viele Behälter hier und durch den Einsatz der Lösung kann ich vielleicht 5 Prozent reduzieren. [...] Bestandskosten, Investkosten, Flächenkosten, ist eigentlich auch alles Investkosten.“ (I3 00:14:09)

„Wenn du das hier, so wie wir es beschrieben haben mit einem autonomen System koppelst und dann eine gewisse Automation drin hast bringt das große Effizienzsteigerungen. Der Prozess ist aktuell extrem manuell getrieben. Du brauchst sehr sehr viele Ingenieure, die Daten in die Hand nehmen, handeln usw. und so fort.“ (I5 00:29:59)

„Ja das man Ursachen automatisiert erkennt und dann halt Ursachen abstellt und damit die Fehlerquote reduziert wird [...]“ (I14 00:22:54)

## **9. Assistenzsysteme**

Die Nutzensauslöser von Assistenzsystemen im Zusammenhang mit dem Einsatz von Industrie 4.0 Systemen sind für direkte und indirekte Bereiche differenziert zu betrachten. In indirekten Bereichen entsteht der Nutzen durch Informationssysteme, welche bei der Bewältigung administrativer Tätigkeiten in Form von workflowbasierten, standardisierten Prozessabläufen sowie bei Datensuche, -verarbeitung und -auswertung Hilfestellung geben. Im direkten Bereich hingegen entsteht der Nutzen durch den Einsatz von Fertigungssystemen, welche bei der Bewältigung anspruchsvoller operativer Tätigkeiten wie bspw. Bauteilhandling unterstützen oder Informationen bspw. in Form von Werkerführungslogiken aufbereiten und gezielt visualisieren. Mit einer durchschnittlichen Häufigkeit von 79 Prozent sind Assistenzsysteme als wichtiger Bestandteil von Industrie 4.0 Lösungen zu betrachten.

Da Assistenzsystemfunktionen beim Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten aufweisen, sind auch die von den Interviewpartnern genannten Quantifizierungsmöglichkeiten dementsprechend vielfältig. Der messbare Nutzen reicht von der Reduzierung von Fehlern im Prozess als Kernelement von Assistenzsystemen (Gerke 2015, S. 62), über die Reduzierung von Mitarbeitern durch die Übernahme vormals manueller Tätigkeiten bis hin zur Minimierung von Stillstandzeiten durch eine erhöhte Reaktionsfähigkeit bspw. bei Instandhaltungsmaßnahmen. Die ermittelten Quantifizierungsmöglichkeiten im Rahmen der Experteninterviews entsprechen dem aktuellen Erkenntnisstand in der Fachliteratur zum Nutzen von Assistenzsystemen im betrieblichen Umfeld (Gerke 2015, S. 7 ff.).

## **10. Durchlaufzeitreduzierung**

Mit einer Häufigkeit von 95 Prozent bei den Experteninterviews stellt die Durchlaufzeitreduzierung einen zentralen Nutzenaspekt von Industrie 4.0 Lösungen dar. Eine Durchlaufzeitreduzierung entsteht beim Einsatz von Industrie 4.0 Anwendungen hauptsächlich durch die Reduzierung des Zeitaufwands für die Planung, Steuerung und Durchführung von administrativen und operativen Prozessen durch teil- oder voll automatisierte Unterstützungssysteme.

In der Literatur werden Quantifizierungsmöglichkeiten einer Durchlaufzeitreduzierung in Form von gesteigerter Termintreue, höherer Flexibilität und reduziertem Ressourceneinsatz wie bspw. Beständen und Lagerfläche erwähnt, die schlussendlich zu wirtschaftlichem Erfolg führen (Lindner et al. 2019, S. 10). Die Interviewergebnisse zeigen weitere, detailliertere Quantifizierungsmöglichkeiten auf.

Da eine Durchlaufzeitreduzierung beim Einsatz von Industrie 4.0 Anwendungen in unterschiedlichsten Bereichen erzeugt werden kann, sind auch die Quantifizierungsmöglichkeiten dementsprechend vielfältig. Die Spanne reicht hier von der Reduzierung von Fertigungs- oder Prozesszeit, was sich letztendlich im Mitarbeiterereinsatz widerspiegelt, über die Reduzierung von Ausschuss und Nacharbeitsaufwänden im Prozess bis hin zu verminderten Inbetriebnahmezeiten und reduzierten Fehlerquoten, die sich in gestiegenen Anlagenverfügbarkeiten zusammenführen lassen.

„Nun ja gut, hier kann ich ja messen. Also ich kann Zeiten messen zwischen Problem tritt auf bis es abgestellt ist. Das heißt, hier kann ich eine klassische Prozesszeitrechnung machen.“ (I2 00:16:54)

„Wir sparen uns die Pickwege. Heute läuft er durch die Gasse. Stell dir vor, der hat 80 Varianten. Da läuft der Picker mehrere Kilometer am Tag. Zukünftig bewegt er sich ja nur noch wie ein Montagemitarbeiter in einem Werkerdreieck. [...] 25 Prozent Produktivitätssteigerung. [...] In Form von F-Zeit messbar.“ (I9 00:30:57)

„Durchlaufz ja, wir werden schneller. Wir werden auf jeden Fall besser, auch weil wir weniger Ausschuss in der Nacharbeit produzieren. Dadurch lässt sich die Durchlaufzeit reduzieren, weil heute halt x Bauteile, ich weiß nicht 10 Prozent der Teile müssen nachher noch manuell abgewischt werden, weil zu viel Klebstoff da ist. Und das ist das Ziel davon, genau das wegzukriegen.“ (I10 00:20:38)

„Ich brauche weniger Zeitaufwände, um eine saubere Analyse durchzuführen. [...] Das heißt, ich vermeide eine Fehleinschätzung der Störung und dadurch eine falsche Maßnahme.“ (I11 00:22:33)

„Na weil ich viel kürzere Reaktionszeiten habe, bis ich zum Schweißergebnis komme, bis ich eine Anlage angelernt habe. Es geht ja alles deutlich schneller bis ich iO Qualität rausfahre.“ (I15T1 00:25:50)

## ***11. Automatisierung***

Automatisierung kann als Kernaspekt von Industrie 4.0 Lösungen betrachtet werden. Dies bestätigt auch die durchschnittliche Häufigkeit von 83 Prozent, die bei den direkten Use Cases sogar bei 95 Prozent liegt. Automatisierung ist die Basis für umfangreiche Effizienzsteigerungen. Die aufgenommenen Beispiele reichen von einfachen Automatisierungen wie der zyklischen Versendung von Statusmeldungen bis hin zu autonomen Gesamtsystemen. Kern des Nutzenaspekts Automatisierung im Zusammenhang mit Industrie 4.0 stellt die algorithmenbasierte, rechnergestützte Verarbeitung von Prozessdaten dar. Zusätzlich ist hier die klassische Automatisierung in Form der maschinenbasierten Übernahme von hoch repetitiven, präzisen, langwierigen oder körperlich anstrengenden Tätigkeiten gemeint.

Die Messbarkeit der Automatisierung im Umfeld der Industrie 4.0 liegt hauptsächlich in der Reduzierung von manuellen Tätigkeiten und der damit verbundenen Reduzierung von Mitarbeiterereinsatzzeiten, die auch als Fertigungszeit bezeichnet wird. Im Wesentlichen spiegelt diese Erkenntnis den Stand der Literatur zur Quantifizierung von Automatisierungsbestrebungen im betrieblichen Umfeld wieder (Mubarak 2013, S. 228 f.). Darüber hinaus sind

vielfältige Quantifizierungsmöglichkeiten in Form von reduzierten Betriebskosten und Stillstandszeiten sowie Flächen- und Fehlerkosten von den Interviewpartnern erwähnt worden.

„Die Automatisierung mündet auch wieder in die MTTR bzw. in die Ausbringung, weil ich eben Störungen dadurch vermeiden oder schneller beheben kann [...]“ (I11 00:29:09)

„In Zeiten sicherlich, in Optimierungszeiten, Hochlaufzeiten, Zeiten bis quasi Fehler erkannt werden. [...]“ (I15T2 00:01:04)

## **12. Produktqualität**

Der Nutzenaspekt Verbesserung der Produktqualität wird vom Großteil der Interviewpartner mit dem Einsatzschwerpunkt von Industrie 4.0 Lösungen als gleichbedeutend mit der Prozessqualität angesehen, da ein verbessertes Produkt das Ergebnis gesteigerter Prozessqualität darstellt. Die Interviewergebnisse zur Verbesserung der Produktqualität sind demzufolge unter dem Nutzenaspekt Prozessqualität in Punkt 24 aufgeführt.

„Ist eigentlich das Gleiche, wenn ich jetzt sage das Produkt ist der Prozess oder das Produkt ist der Ablauf, dann ist es irgendwo klar.“ (I3 00:21:28)

„Siehst du da eine Produktqualitätsverbesserung oder ist dort der Prozess schon das Produkt? Das Produkt ist der Prozess.“ (I6T2 00:04:08)

„Ja das hängt da an der Stelle zusammen [...]“ (I7 00:16:28)

Diese Erkenntnis steht im Widerspruch zur aktuellen Literatur, die gemeinhin die Reduzierung von Ausschuss bzw. Fehlerraten durch die frühzeitige Erkennung und effiziente Abstimmung von Prozessfehlern durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen als Quantifizierungsmöglichkeit nennt (Hilt 2020, S. 97; Benzinger 2020, S. 9).

## **13. Variantenflexibilität**

Variante flexibility wird im Kontext von Industrie 4.0 Anwendungen im direkten Bereich durch die sensoren- oder algorithmengestützte Erfassung von Prozesselementen und -daten sowie deren vollautomatische Verarbeitung in Bezug auf die Anpassung des Fertigungsprozesses erreicht. Im indirekten Bereich bieten Industrie 4.0 Lösungen häufig die Möglichkeit, unterschiedliche Prozess- oder Produktvarianten in digitaler Form abzubilden und sogar zu simulieren. Dies ist jedoch im Rahmen von DES bereits seit längerer Zeit weit verbreitet und ist somit keine spezifische Neuerung der Industrie 4.0 (Kühn 2006, S. 2 f.).

Die Fachliteratur quantifiziert fehlende Variantenflexibilität bspw. durch hohe Aufwände beim Variantenwechsel. Hierzu zählen hauptsächlich Rüst- und Anlaufkostenkosten (Ungern-Sternberg und Erlach 2020, S. 245). Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass durch eine produktionsbedingte Steigerung der Variantenflexibilität in erster Linie Kosten und keine

Einsparungen entstehen, da zwischen Variantenflexibilität und Produktivität ein Zielkonflikt besteht (Lanza et al. 2009, S. 1039 ff.).

Die Ermittlung von Quantifizierungsmöglichkeiten mittels Wirkungskettenanalyse führt zu komplett anderen Ergebnissen. Die Messbarkeit der Variantenflexibilität wurde von den Interviewpartnern durch eine Vielzahl an KPIs und Parametern bestätigt. Beginnend bei der Anzahl Mitarbeiter im Prozess, welche auch in Form von Fertigungszeit gleichbedeutend verwendet wird, über Inbetriebnahme-, Betriebs- und Änderungskosten bis hin zu Flächeneinsparungen und ergonomischen Kennzahlen wie Krankenquote und Fluktuationsquote. Zudem können Investitionskosten für variantenbedingte Hardware eingespart werden.

„Ja, Fläche, Ergonomie sind die meisten, wobei Betriebsmittelkosten auch reduziert werden sowie die Regale die sind natürlich deutlich günstiger [...]“ (I4 00:10:04)

„[...] also Betriebskosten, F-Zeit, Auslastung. [...] Anzahl Mitarbeiter, wenn es um den Variantenmix geht und bei Variantenflexibilität sind es die Änderungskosten für einen Umbau.“ (I5 00:09:18)

Das heißt, was ist also die Messbarkeit hinter der Variantenflexibilität für dich an der Stelle? Die Fläche.“ (I9 00:04:54)

„Na gut, heute ist es so, dass für jede Klebstoffapplikation eine eigene Anlage dastehen muss mit eigener Bauteilaufnahme mit einer eigenen Vorrichtung und das fällt halt hier weg. Also die Kosteneinsparung durch Bauteilaufnahmen ist es auf der einen Seite [...]“ (I10 00:03:36)

„Ja, weil ich die Kosten pro Inbetriebnahme reduzieren kann. Extrem.“ (I16T1 00:03:09)

#### **14. Volumenflexibilität**

Volumenflexibilität kann bei Industrie 4.0 Lösungen hauptsächlich durch die Möglichkeit der teil- oder vollautomatischen Anpassung von Mengenkapazitäten bspw. im innerlogistischen Transport oder bei modularen Montagesystemen erreicht werden. Schwarmintelligente Transportsysteme bzw. Flurförderzeuge sind hierbei als Praxisbeispiel zu nennen. Analog der Variantenflexibilität sieht die Literatur in der Volumen- oder Stückzahlflexibilität keinen Nutzen- sondern einen Kostenaspekt (Lanza et al. 2009, S. 1039).

Auch hier liefert die Wirkungskettenanalyse neue Erkenntnisse zur Quantifizierung. Eine Messbarkeit der Volumenflexibilität wurde von den Interviewexperten in reduzierten Betriebskosten, resultierend aus dem stets optimierten, weil überwachten Verhältnis von Transportkapazitäten und Transportanfragen gesehen, was sich wiederum in der Anzahl der im Betrieb befindlichen Transporteinheiten widerspiegelt. Je nachdem wie hoch der Automatisierungsgrad im Prozess vorangeschritten ist, ist die Anzahl der Transporteinheiten im System mit der Anzahl an Mitarbeitern gleichzusetzen. Da die Anpassung von Angebot und Nachfrage automatisiert erfolgt, entfällt ein Großteil des Datenhandlings, welches im

manuellen Prozess notwendig ist, um die Flexibilität in Form von Kalkulationen und Einsatzszenarien inklusive Steuerung zu ermitteln.

„Anzahl der FTFs, die du einsetzt.“ (I8 00:04:02)

„Über die Anzahl Mitarbeiter, die wir einsetzen.“ (I5 00:10:32)

„Du müsstest viel mehr manuell die Daten anlegen, müsstest manuelle Datenpflege betreiben und wir automatisieren das Ganze. Das heißt, im Endeffekt wäre der messbare Nutzen aus der Flexibilität, dass du es von dem manuellen Aufwand in das automatisierte überführen kannst. Also du würdest manuellen Planungsaufwand reduzieren.“ (I6T1 00:06:12)

### **15. *Mitarbeitereinsatzflexibilität***

Den flexiblen Einsatz von Mitarbeitern im Prozess begünstigen Industrie 4.0 Lösungen in vielerlei Hinsicht. Die Bandbreite reicht hier von der einheitlichen, standardisierten Bedienoberfläche, über die Sammlung, Konsolidierung und Bereitstellung von Expertenwissen in Form von Assistenzsystemen bis hin zur modularen Fertigungsstruktur, welche die Königsdisziplin des flexiblen Mitarbeitereinsatzes darstellt. Mit einer Häufigkeit von 79 Prozent, zählt die Mitarbeitereinsatzflexibilität zu den Kernaspekten bei den direkten Use Cases. Der Nutzensauslöser von Industrie 4.0 Lösungen in Bezug auf die Mitarbeitereinsatzflexibilität ist eine systemgestützte Mitarbeiterführung, intuitive und automatische Informationsbereitstellung sowie Entscheidungsvorbereitung und Prozesssteuerung. Dies gilt sowohl für den direkten wie auch für den indirekten Bereich.

In der Literatur werden die Dimensionen der Personaleinsatzflexibilität in interne, externe und theoretische Rotation sowie berufliche Bildung und zusätzliche indirekte Tätigkeiten eingeteilt. Die Messbarkeit erfolgt im Wesentlichen über das Verhältnis von beherrschten zu benötigten Tätigkeiten eines Arbeitsplatzes (Dombrowski 2000, S. 66 f.).

Der messbare Nutzen der Personal- oder Mitarbeitereinsatzflexibilität kommt gemäß den Interviewpartnern im Kern über die Anzahl der Mitarbeiter im Fertigungssystem und somit die Mitarbeiterkosten zustande. Bei einer hohen Einsatzflexibilität muss weniger Personal vorgehalten werden. Zusätzlich sind eine schnellere Einarbeitungszeit und die Kosten sowie der Aufwand für Schulungen genannt worden. Daraus resultieren wiederum reduzierte Fehlerraten und somit geringere Nacharbeitskosten im Prozess.

„Naja, der Benefit im Vergleich zu heute ist, ich brauche heute eine fixe Anzahl Mitarbeiter. Und wenn ich mehr habe, weil keiner krank ist, dann habe ich eine schlechte Auslastung, weil welche herumstehen. Wenn ich weniger Mitarbeiter habe, das kommt schon vor, dann brauche ich aus anderen Bereichen Mitarbeiter. Das heißt, dieses Fixe, davon kommen wir weg [...] Okay, das heißt, die Messbarkeit würde ja über die Anzahl Mitarbeiter kommen? Genau.“ (I5 00:02:38)

„[...] der Schulungsaufwand wird natürlich deutlich geringer, weil wenn der gar nicht so tief absteigen muss, muss er weniger beherrschen [...] Der Qualifizierungsaufwand wird für ihn geringer. [...] Einarbeitszeit oder eben auch das Hochlernen oder das Einfahren von Prozessen bis zur Kammlinie wird ja dann auch verbessert, wenn das System schon relativ schnell alle Daten hat und der Mitarbeiter sich schnell einlernen kann.“ (I15T1 00:02:57)

„Also am Ende merkt man es schon an dem wie gut ist die Qualität der Schweißpunkte. Oder man könnte sagen wie oft stellt jemand so was um? Also nehmen wir den Fall der Experte, der geht einmal zur Anlage, stellt die richtigen Parameter ein, dann läuft es wieder. Dann mal der andere Experte, der halt nicht so viel Ahnung hat. Der muss halt dreimal etwas anpassen, bis es stabil läuft. Wie oft muss der Parameter angepasst werden, um von einem NIO Punkt in eine IO Qualität wieder zurück zu gelangen?“ (I12 00:01:30)

## **16. Engpasserkennung**

Der Nutzensauslöser im Kontext Industrie 4.0 entsteht in Bezug auf die Engpasserkennung durch die Kombination der Datenverfügbarkeit und automatisierten Verarbeitung und Visualisierung, sodass Engpässe entweder echtzeitnah erkannt und behoben oder bereits weit im Voraus identifiziert und somit frühzeitig vermieden werden können.

Die positiven Auswirkungen einer Engpasserkennung werden in der Literatur in vielfältigen Bereichen beschrieben. Es lassen sich dadurch sowohl in der Materialbeschaffung und -bereitstellung sowie in der Produktion und dem Versand erhebliche Mehraufwände vermeiden (Martin 2016, S. 369; Ostertag 2008, S. 81). Den oftmals beschriebenen „Worst Case“ stellen fehlende Bauteile dar, die zu Bandstillständen führen und somit erheblich Kosten verursachen (Ostertag 2008, S. 83). Insbesondere letztere Aussage wird von der Interviewpartnern bestätigt. Eine weitere Quantifizierung bei Industrie 4.0 Lösungen besteht in dem zeitnahen oder prädiktiven Prozesseingriff, welcher Stillstandzeiten und Nacharbeitsaufwände reduziert. Industrie 4.0 Anwendungen bewirken jedoch aufgrund der automatisierten Datenverarbeitung und Visualisierung eine weitere Quantifizierungsmöglichkeit, die sich in der Reduzierung von Informations- und Datenhandlungsaufwand manifestiert.

„[...] Aber manuell getriggert, sodass die es nur sehen, indem sie selbst nachschauen und täglich prüfen. So machen das die Leitstände auch heute und bei uns gibt es automatisierte Meldungen. Ja, Fehlermeldungen poppen dann im Leitstand automatisch auf.“ (I6T2 00:26:27)

## **17. Individualisierung der Bedienoberfläche**

Der Nutzensauslöser bei dem Nutzenaspekt Individualisierung der Bedienoberfläche liegt in der individuellen Konfigurierbarkeit von Oberflächen in IT-Systemen oder Anlagen. Dies gilt sowohl für den direkten wie auch für den indirekten Bereich. Im direkten Bereich werden häufiger vorgegebene Profile mit definierten Informationsinhalten vorgegeben, wohingegen im indirekten Bereich oftmals jeder Mitarbeiter seine eigene Oberflächenstruktur definieren kann. Der messbare Nutzen liegt hierbei in der sogenannten „Time to Information“, also der

Reduzierung von manuellen Suchaufwänden. Diese Kernerkenntnis entspricht dem aktuellen Erkenntnisstand in der Literatur, wobei der Nutzenaspekt auch unter Usability oder Nutzerfreundlichkeit subsumiert wird (Gizycki 2002, S. 2 ff.).

### **18. *Mitarbeitervernetzung***

Der Nutzensauslöser der Mitarbeitervernetzung kommt im Industrie 4.0 Umfeld hauptsächlich durch eine Reduzierung von manuellen Benachrichtigungs- oder Informationsprozessen zustande. Laut den Aussagen der Interviewpartner treten automatisierte, elektronische Informationsprozesse an deren Stelle, die insbesondere bei Problemen oder Fehlern im Prozess angestoßen werden. Die Messbarkeit liegt hierbei bspw. in der Reduzierung von Datenhandlungsaufwänden sowie reduzierten Anlagenstillständen durch eine schnellere Reaktionszeit. Dies entspricht den Erkenntnissen aus der Literatur (Sander 2014, S. 20).

### **19. *Mitarbeiterakzeptanz***

In Übereinstimmung mit den bestehenden Literaturquellen berichten die Interviewpartner, dass die Mitarbeiterakzeptanz keinen direkten Nutzenaspekt darstellt. Es besteht große Einigkeit darüber, dass die Mitarbeiterakzeptanz eine der großen Herausforderungen bei der Umsetzung von Industrie 4.0 Lösungen darstellt und als Grundvoraussetzung angesehen werden muss, um überhaupt einen Nutzen erzeugen zu können (Matuschek et al. 2018, S. 103 ff.). Insbesondere die Sorge um den eigenen Arbeitsplatz bzw. die individuelle Kompetenz der Mitarbeiter führt zu einer Vielzahl an Ängsten und Vorbehalten gegenüber Industrie 4.0 Anwendungen. Hierbei reicht die Spanne sogar bis hin zum aktiven Boykott solcher Systeme.

„Naja, weil dadurch das eben Mitarbeiter reduziert wurden, war das natürlich sichtbar. Und die haben das wirklich boykottiert das System. [...] Die sind in die Anlage rein gesprungen, dass es stehen geblieben ist und dann hat keiner was gesagt. Und dann hat er eben nicht seinen Umsatz geschafft, also solche Sachen.“ (I8 00:18:47)

### **20. *Arbeitsergonomie***

Der Nutzensauslöser für die Verbesserung von Arbeitsergonomie zeigt sich beim Einsatz von Industrie 4.0 Anwendungen in zwei Ausprägungen. Die klassische Arbeitsergonomieverbesserung im direkten Bereich entsteht durch eine maschinelle Unterstützung von Mitarbeitern bei der Bewältigung körperlich anstrengenderer, hoch repetitiver oder unergonomischer Arbeit durch bspw. MRK-Anwendungen. Im indirekten Bereich hingegen wird die Übernahme von nicht wertschöpfenden und aufwendigen manuellen Tätigkeiten durch automatisierte Prozesse innerhalb von IT-Systeme als Verbesserung der Arbeitsergonomie betrachtet. Auch die intuitive Oberflächengestaltung von IT-Systemen wird von den Interviewpartnern als Beitrag zu einer verbesserten Arbeitsergonomie angeführt.

„Also sagen wir mal so er muss sich nicht mehr bücken. Beispiel in einer achtundsiebzig Zentimeter Höhe kommt der Behälter an und man muss nur noch reingreifen. Das heißt er muss sich nicht bücken und muss sich nicht strecken. Also er muss nicht über Kopf fassen oder so. Und er sieht vor allen Dingen auch was drin ist im Behälter.“ (I4 00:10:53)

„Wir haben bessere Zugänglichkeit zu den Produkten. Wir können uns bezüglich Arbeitshöhen, bezüglich Stationsgestaltungen besser an den einzelnen Mitarbeitern ausrichten.“ (I5 00:52:24)

„Das waren einfach Arbeitsplätze, die sehr unergonomisch waren. Weite Laufwege, keine Ahnung, Mitarbeiter mussten über viele Huckel fahren und so was. Also genau, die Ergonomie der Mitarbeiter hat sich verbessert, weil sie das einfach nicht mehr machen mussten.“ (I8 00:31:01)

„Also hauptsächlich weniger laufen? Ja weniger laufen. [...] Also du schiebst den Sequenzwagen vor dir her und der hat ja mehrere Kilos und ich muss sagen, ich hab auch schon viele Sequenzwagen durch die Halle geschoben und das merkst du.“ (I9 00:49:24)

„Ist für mich auch das Thema Usability. [...] darf einfach nicht stressen, wenn ich mit der Oberfläche arbeite [...] Wenn man aktuell zur Anlage geht und Analyse betreiben muss, dann ist das Ding so langsam, dass man gefrustet vom System wieder wegläuft.“ (I11 00:38:30)

Die Folgen unergonomischer Prozesse und somit deren Messbarkeit lassen sich laut den Interviewpartnern über Krankheitsquoten, Unfallquoten und Krankheitszeiten von Mitarbeitern messen. Diese zeigen wiederum messbare Auswirkungen auf den Umplanungsaufwand im Rahmen der Mitarbeiterereinsatzplanung. Zudem sind auch Anlagenstillstände in Folge von kurzfristigen Krankheitsfällen sowie Kosten für Gesundheitsmaßnahmen genannt worden. Diese Ergebnisse entsprechen den aktuellen Erkenntnissen aus der Literatur (Krieger und Müller 2015, S. 41 f.).

Eine Erweiterung der bisherigen Erkenntnisse stellt die Reduzierung von manuellen Datenhandlungsaufwänden in indirekten Bereichen durch bspw. „Robotic Process Automation“<sup>33</sup> sowie eine verbesserte Usability in Form von reduzierten Suchaufwänden und applikationsbedingten Wartezeiten für den Nutzer dar, die zu einer Verbesserung der Arbeitsergonomie führen.

„Ist für mich auch das Thema Usability. [...] Darf einfach nicht stressen, wenn ich mit der Oberfläche arbeite. Das ist gerade das Problem an unseren Stanznietsystemen aktuell. Wenn man dort hinget und Analyse betreiben muss, dann ist das Ding so langsam, dass man gefrustet vom System wieder wegläuft.“ (I11 00:38:30)

## **21. Virtuelle Absicherung**

Der Nutzen einer virtuellen Prozessabsicherung entsteht im Kern durch die Simulation komplexer und langwieriger operativer oder administrativer Prozesse, um Engpässe erkennen, Ressourcenbedarfe ermitteln oder Auswirkungen verschiedenster Parameter analysieren zu können. Industrie 4.0 Lösungen sind dabei in der Lage, hoch komplexe Prozessabläufe zu

---

<sup>33</sup> Robotic Process Automation beschreibt spezifische Softwarelösungen, die manuelle, menschliche Interaktionen mit einem Informationssystem simulieren und automatisiert ausführen können (Ketkar und Gawada 2021, S. 864).

simulieren, welche die menschliche Kalkulationsleistung übersteigt. Idealerweise bieten Industrie 4.0 Lösungen Simulationsumgebungen, um vor dem eigentlichen operativen Einsatz grundlegende Machbarkeits- oder optimierende Performancetests durchzuführen.

Der grundsätzlich messbare Nutzen von Simulationen zeigt sich in der Prozessabsicherung und somit in der Reduzierung von Fehlern im Serienprozess, die dann zur Vermeidung von Fehlerbehebungs-, Nacharbeits- oder Rückbauaufwänden beitragen, die im schlimmsten Fall zu Anlagenstillständen und somit Produktionsausfällen führen. Zudem lassen sich erhebliche Planungsaufwände und manuelle Kalkulationsprozesse durch automatisierte Prozesssimulation einsparen. Im Vergleich zu physischen Erprobungen von bspw. Prozessvarianten, tragen virtuelle Simulation dazu bei, Entwicklungszeiten und Erprobungskosten bspw. in Form von Prototypen zu reduzieren. Die im Rahmen der Experteninterviews gewonnen Erkenntnisse entsprechen dem in der Literatur vorhandenen Erkenntnisstand (Halm und Aehnelt 2017, S. 280; Rodriguez Flick 2010, S. 13).

## **22. Ausfallsicherheit**

Im Gegensatz zu einigen Literaturquellen (Siller 2021) sehen 92 Prozent der Interviewpartner die Ausfallsicherheit von Industrie 4.0 Lösungen als Grundvoraussetzung bzw. als Herausforderung und noch nicht als Nutzenaspekt an. Wiederum andere Quellen bestätigen diese Erkenntnis (VDMA 2016, S. 5). Die technische Komplexität und Neuheit der Systeme führt aktuell noch zu verminderten Verfügbarkeiten. Oftmals müssen manuelle Backup Lösungen oder redundante Infrastrukturen vorgehalten werden, die wiederum negative Auswirkungen auf die Kostenstruktur haben.

„Da ist meine Meinung allgemein zu Industrie 4.0 Anwendungen. Das ist ja eigentlich so die Krux an den ganzen Sachen, weil wenn das System ausfällt, ist es immer die Frage, ob du ein Backup hast und was das Backup ist. Und sind es Mitarbeiter, die hast du nicht zur Verfügung und dann musst du ab einem bestimmten Punkt sagen okay, wenn das System ausfällt, dann können wir eben gar nix. Darum ist es für mich eigentlich kein Nutzen, es ist [...] ein Risiko [...].“ (I8 00:28:27)

## **23. Ressourceneffizienz**

Die Häufigkeit von 100 Prozent bei den Experteninterviews stellt den höchsten Wert aller sechszwanzig Nutzenaspekte dar und zeigt die Bedeutung der Ressourceneffizienz im Kontext Industrie 4.0 auf. Ressourceneffizienz ist ein generischer Begriff, dem eine Vielzahl an Verbesserungen zugeordnet werden können (VDI ZRE 2016, S. 6 ff.). Ressourceneffizienz stellt zudem eine Aggregation unterschiedlicher Nutzenaspekte dar. Dementsprechend zeigt sich ein breites Spektrum an Quantifizierungsmöglichkeiten durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen.

Dies zeigt sich bei den Zitaten aus den Experteninterviews sowie den Inhalten der aktuellen Literatur gleichermaßen, sodass davon auszugehen ist, dass die Erkenntnisse aus den Interviews im Rahmen der aktuellen wissenschaftlichen Ergebnisse zu verorten sind.

Vergleichbar zur Automatisierung, wo manuelle Prozesse algorithmengestützt ausgeführt werden, besteht die zentrale Quantifizierungsmöglichkeit gemäß den Interviewpartnern in der Reduzierung von Fertigungszeit bzw. Mitarbeitern im Prozess. Zusätzlich können die Reduzierung oder der gezieltere Einsatz von Betriebsmitteln oder auch Investitionen und Betriebskosten in bzw. von Soft- und Hardware als Messbarkeit herangezogen werden.

#### ***24. Prozessqualität***

Da die Prozessqualität ein allgemeiner und wenig spezifischer Begriff ist, verwundert es nicht, dass der Nutzenaspekt im Kontext von Industrie 4.0 Lösungen im Vergleich zu den anderen fünfunddreißig Nutzenaspekten die breiteste Streuung sowohl an Beispielen als auch an Quantifizierungsmöglichkeiten aufweist. Im Endeffekt stellt die Prozessqualität eine Aggregation aus verschiedenen anderen Nutzenaspekten dar (Kneuper 2011, S. 1). Hierzu zählen bspw. Standardisierung, Automatisierung, Assistenzsysteme, Transparenz, Produktivität oder Ressourceneffizienz. Ähnlich dem Nutzenaspekt Ressourceneffizienz zeigt sich dies sowohl in den Ergebnissen der Experteninterviews als auch in der Fachliteratur, sodass auch hier nicht von neuen Erkenntnissen durch die Experteninterviews auszugehen ist. Die hohe Bedeutung der Prozessqualität im Zusammenhang mit Industrie 4.0 Anwendungen zeigt, dass 95 Prozent aller untersuchten Projekte diesbezüglich einen Beitrag leisten.

Die von den Interviewpartnern genannten Quantifizierungsmöglichkeiten in Bezug auf die Verbesserung der Prozessqualität durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen sind vielfältig und weitreichend. Beginnend bei Betriebskosten wie bspw. Inbetriebnahmeaufwände, Einarbeitungsaufwände oder Stillstandzeiten, über reduzierte Fehler-, Nacharbeits- und Verschrottungskosten bis hin zu verminderter Doppelarbeit, Investitionskosten und reduzierten Fluktuationsraten wurden insgesamt siebzehn Quantifizierungsmöglichkeiten zusammengetragen.

#### ***25. Prozesseffektivität***

Gemäß den Interviewpartnern lässt sich durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen die Prozesseffektivität signifikant steigern. Algorithmengestützte Datenerfassung, -verarbeitung und -auswertung erzeugen Transparenz im Prozess und sorgen dadurch für die Möglichkeit einer umfassenden Standardisierung der Abläufe. Assistenzsysteme in Form von Werkerführungssystemen sind hierfür ein genanntes Beispiel im direkten Bereich.

Workflowbasierte Prozesse in DES-Systemen stellen einen indirekten Anwendungsfall dar. Weiterhin tragen KI und Machine Learning dazu bei, die „richtigen Dinge“ zu tun. Diese Systeme sind jederzeit in der Lage auf Basis von Daten den aktuellen Prozessstatus zu erfassen und geeignete, zielführende Gegenmaßnahmen einzuleiten. Mit einer Häufigkeit von 75 Prozent liegt der Fokus der Steigerung der Prozesseffektivität im indirekten Bereich.

Wie die Zitate aus den Experteninterviews zeigen, liegt die zentrale Quantifizierungsmöglichkeit der Prozesseffizienzsteigerung in der Reduzierung von manuellen Tätigkeiten, die durch automatisierte Lösungen erreicht werden können. Im Endeffekt sinkt dadurch der benötigten Ressourceneinsatz, insbesondere auf der Seite der Personalressourcen. Zudem bestehen vielfältige Messbarkeiten bspw. in der Reduzierung von Anlagenstillständen, Inbetriebnahmeaufwänden und verringerter Doppelparbeit. Auch hier ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der Interviews dem Erkenntnisstand der Literatur entsprechen (Hill 2020, S. 12).

## ***26. Echtzeitsteuerung***

Die Grundlage für Echtzeitsteuerung legt die Verfügbarkeit und höchstmöglich automatisierte Verarbeitung von Prozessdaten. Auf dieser Basis ist eine teil- oder vollautomatische Prozessanpassung oder Erzeugung einer Entscheidungsgrundlage für manuelle Prozessanpassungen auf Basis von sensorgestützt erhobenen, verarbeiteten und ausgewerteten Prozessdaten möglich. Diese Ergebnisse entsprechen dem Erkenntnisstand der Literatur (Konrad et al. 2020, S. 7). Der Hauptnutzen von Echtzeitsteuerung ist hierbei im direkten Bereich anzusiedeln, was die Häufigkeit von 63 Prozent belegt.

In der Literatur wird der Nutzen von Echtzeitsystemen im betrieblichen Umfeld hauptsächlich durch die Parallelität von Planungs- und Steuerungsaktivitäten beschrieben, die auf Basis von vollständigen und aktuellen Prozessdaten möglich wird. Dadurch lassen sich in erster Linie Mitarbeiterkapazitäten im operativen wie administrativen Planungs- und Steuerungsprozess reduzieren (Konrad et al. 2020, S. 5 f.; Fleischle 2014, S. 9).

Die Interviewergebnisse erlauben auch hier detailliertere Einblicke in die Quantifizierungsmöglichkeiten. Die zentrale Quantifizierbarkeit von Echtzeitsteuerung kann laut den Interviewpartnern in der Reduzierung von Anlagenstillständen und somit in der Erhöhung von Anlagenverfügbarkeiten gesehen werden. In diesem Zusammenhang wurde auch die Reduzierung oder sogar Eliminierung von Fehlern im Prozess erwähnt, die wiederum verminderte Nacharbeits- und Verschrottungskosten nach sich ziehen. Ferner lässt sich der Flächenbedarf in logistischen Unternehmensbereichen durch eine gezielte Echtzeitsteuerung reduzieren.

„Deswegen ist ja die ganze Sensorik da, dass z.B. Fehler, die aufgrund von Behältern die über stehen oder sich quergestellt haben automatisch sofort erfasst werden. Im Idealfall werden die Störfälle direkt und vollautomatisch abrepariert, um die Verfügbarkeit der Anlage so hoch wie möglich zu halten.“ (I4 00:27:42)

„Messbarkeit wiederum in Reaktionszeit, bis Fehler abgestellt werden könnten. Bzw. das es gar nicht erst zu Fehlern kommt.“ (I15T1 00:20:20)

„Das heißt im Endeffekt die Reaktionszeit wird deutlich besser auf Stillstände? Ja. Genau. Und es können auch Stillstandzeiten reduziert werden? Ja.“ (I6T1 00:19:19)

„Hier könnte ich mir vorstellen Materialbereitstellung in einer Projektionsfläche. So weiter weg ich von Echtzeitdaten bin, umso mehr muss ich bevorraten. Desto näher ich an der Echtzeit dran bin und ich Echtzeitreaktion betreiben kann, umso weniger Material muss ich theoretisch an einer Linie bevorraten.“ (I1 00:14:55)

## ***27. Informationsverfügbarkeit***

Mit Blick auf die Häufigkeit der Informationsverfügbarkeit zeigt sich insbesondere in indirekten Bereichen mit 90 Prozent ein überdurchschnittlich hoher Wert. Einige Interviewpartner klassifizieren die Informationsverfügbarkeit als Grundvoraussetzung oder als Basis für den Einsatz von Industrie 4.0 Anwendungen. Der zentrale Nutzensauslöser der Informationsverfügbarkeit liegt bei Industrie 4.0 Anwendungsfällen in der automatisierten Datenerfassung, -verarbeitung und -visualisierung von Langzeitdaten, die wiederum für eine erhöhte Prozesstransparenz sorgt. In dessen Folge verbessert sich die Reaktionsfähigkeit bspw. für die Behebung von Prozessstörungen.

Da die Beschaffung von Information häufig ein stark manuell geprägter Prozess ist, lässt sich durch eine Automatisierung im Zusammenhang mit vernetzten Industrie 4.0 Systemen vordringlich Informations- und Datenhandlungsaufwand reduzieren. Dadurch können die Mitarbeiterressourcen im Prozess vermindert werden. Die Ergebnisse zum Nutzenaspekt Informationsverfügbarkeit entsprechen dem aktuellen Stand der Literatur (Wahlster et al. 2017, S. 31; BMWi 2015, S. 73).

## ***28. Lernfähigkeit der Systeme***

In der Literatur wird die Lernfähigkeit von Systemen mit KI gleichgesetzt (Plattform Industrie 4.0 2019, S. 3) und mit einer Vielzahl an direkten Nutzen und Quantifizierungsmöglichkeiten von reduziertem Personaleinsatz (Plattform Industrie 4.0 2019, S. 6) bis hin zur Verkürzung von Produktionszeiten (Plattform Industrie 4.0 2019, S. 10) beschrieben.

Die Ergebnisse der Experteninterviews lassen einen anderen Schluss zu. Die Lernfähigkeit von Systemen wird vom Großteil der Interviewpartner als Grundvoraussetzung von Industrie 4.0 Lösungen angesehen. Sowohl hoch entwickelte Assistenzsysteme als auch ganzheitliche autonome Lösungen müssen auf eine umfassende algorithmenbasierte Datenverarbeitung zurückgreifen können, um kontinuierlich Optimierungen zu erreichen. Erst diese

Optimierungen erzeugen einen messbaren Nutzen und nicht die Lernfähigkeit selbst. Das Zitat aus einem Industrie 4.0 Use Case mit dem Fokus Transportdrohnen, beschreibt diesen Umstand treffend.

„Ich würde sagen, es ist eine Grundvoraussetzung. Ich glaube, es gibt kaum noch Algorithmen, die nicht zumindest in Ansätzen KI, Big Data et cetera nutzen. Also alle Menschen, alleine in der Entwicklung heutzutage arbeitet man damit. Wir entwickeln typischerweise fahrerlose Fahrzeuge, wo auch die Drohnen meiner Meinung nach zu gehören. Indem wir die echte Positionsmessung in einen Algorithmus reingeben und dieser sich streckenweise selber optimiert. Deswegen ist das glaube ich eine Grundvoraussetzung.“ (I2 00:27:35)

„Lernfähigkeit eines Systems ist eigentlich eine Voraussetzung, dass ein Nutzen entstehen kann.“ (I15T2 00:10:17)

„Es ist wahrscheinlich eher die Grundvoraussetzung. Das System soll sich ja selber optimieren. Und wir verkaufen ja nicht diese Lernfähigkeit als Nutzen [...]“. (I10 00:34:06)

### ***29. Vernetzung der Systeme***

Die Interviewpartner waren sich bei der Vernetzung von Systemen als Nutzenaspekt einig, dass im Kontext Industrie 4.0 die Vernetzung kein Nutzen per se sein kann, sondern lediglich eine Grundvoraussetzung für einen späteren Nutzen darstellt, der wiederum über darauf aufbauende Aspekte generiert wird. Generell weist die durchschnittliche Häufigkeit von 97 Prozent die zentrale Bedeutung der Vernetzung für Industrie 4.0 Anwendungen nach. Die Erkenntnis, dass die Vernetzung eine Grundlage bzw. Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen darstellt, entspricht dem Stand der Literatur (Fraunhofer IPT 2018, S. 5; IPH 2021).

### ***30. Datenkonsistenz***

Der zentrale Nutzensauslöser der Datenkonsistenz liegt bei Industrie 4.0 Anwendungsfällen in der automatisierten Verknüpfung und Aktualisierung von Datensätzen in allen nutzenden, verwaltenden oder lagernden Systemen bei allen angebundenen und situativ relevanten Partnern über den kompletten Wertschöpfungsprozess hinweg. Ziel hierbei ist es, die Datendurchgängigkeit zu erhöhen. Einige Interviewpartner stufen die Datenkonsistenz als Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen ein. Auch die Datenkonsistenz kann mit einer Häufigkeit von 85 Prozent insbesondere in indirekten Projekten als wichtiger Industrie 4.0 Nutzenaspekt eingestuft werden.

Die Messbarkeit einer Datenkonsistenz lässt sich gemäß den Interviewpartnern über die Reduzierung von manuellen Informations- und Datenhandlungsprozessen herstellen. Die aufgeführten Erkenntnisse zum Nutzenaspekt Datenkonsistenz entsprechen dem Stand der Literatur (Huber 2013, S. 118; Fauser et al. 2017, S. 70).

Darüber hinaus ergaben die Interviewergebnisse, dass automatisierte Datenverknüpfung und Prozessautomatisierung sowie die workflowbasierte Datenerfassung zu weniger Fehleingaben und somit reduzierten Fehlerkosten führen.

„Und dadurch ist ja auch die Fehleranfälligkeit gesunken [...] Datenkonsistenz erzeugt also weniger Fehleingaben, die sich auch ermitteln und deren Auswirkungen quantifiziert werden können.“  
(I8 00:33:30)

### ***31. Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen***

Die Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen entsteht bei Industrie 4.0 Use Cases durch die teil- oder voll automatisierte Bereitstellung der relevanten Prozessinformationen für den Endanwender, sodass dieser auf Basis der gestiegenen Transparenz eigenständig gezielte Entscheidungen treffen kann. Mit einer Häufigkeit von 65 Prozent liegt der Schwerpunkt des Nutzenaspektes im indirekten Bereich.

Die Messbarkeit der gesteigerten Entscheidungsbefugnisse der operativen Mitarbeiter spiegelt sich laut den Interviewpartnern hauptsächlich in der Reduzierung von Datenhandlings- und Planungsaufwand und somit im verringerten Mitarbeiterereinsatz wider. Diese Erkenntnis entspricht dem Stand der Literatur (Kletti 2015, S. 6 f.).

### ***32. Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit***

Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit ist ein weiterer allgemeiner Nutzenaspekt, unter dem vielfältige andere Nutzenaspekte subsumiert werden können. Beispielsweise führen Standardisierung, Automatisierung, Wissens- und Erfahrungsmanagement, aber auch Datenkonsistenz dazu, dass Anforderungen erfüllt und Fertigungskosten so niedrig wie möglich gehalten werden. Zusammenfassend lässt sich jedoch festhalten, dass die Interviewpartner trotz einer Häufigkeit von 65 Prozent mit diesem Nutzenaspekt Verständnis- und Einordnungsschwierigkeiten in Bezug auf die Benennung von konkreten Beispielen hatten, da per Definition eine Vielzahl an Interpretationsmöglichkeiten besteht.

„Fehlt mir die Fantasie.“ (I16T2 00:04:55)

„Wenn ich jetzt eine Anforderung habe in unserem Beispiel, ich habe einen Produktionsauftrag aus dem SAP, den schiebe ich in das System automatisiert rein und der soll entsprechend dann auch fertigungsgerecht, also diese, Planungsvorgaben gerecht abgewickelt werden. Dann würde ich sagen, wäre das vielleicht ein Beispiel, sozusagen das quasi das in der Produktion und der Logistik wirklich abgefahren wird, was im Vorfeld angefordert wird und nicht irgendetwas anderes.“  
(I1 00:39:56)

Da die Definition vielfältige Interpretationsmöglichkeiten zulässt, wurde ein breites Spektrum an Quantifizierungsmöglichkeiten von den Interviewpartnern genannt. Die Quantifizierungsmöglichkeiten reichen hierbei von der Reduzierung von Betriebs-, Material- Nacharbeits- und

Flächenkosten, über die Reduzierung von Investitionen und Fehlern im späteren Serienprozess bis hin zu vermindertem Mitarbeiterinsatz. Die aufgeführten Quantifizierungsmöglichkeiten entsprechen dem aktuellen Stand der Literatur (VDI ZRE 2021).

### **33. Termintreue**

Die Verbesserung der Termintreue durch den Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen weist mit einer Häufigkeit von lediglich 21 Prozent den zweit geringsten Wert unter den sechsunddreißig Nutzenaspekten auf und kann somit als Randnutzenaspekt deklariert werden. Im indirekten Bereich liegt dieser Wert sogar nur bei 5 Prozent. Trotzdem existieren Nutzensauslöser, die hauptsächlich durch die automatisierte, autonome Steuerung von bspw. Transport- oder Fertigungssystemen entstehen. Schwarmintelligente Drohnen oder Flurförderzeuge können schneller auf Veränderungen im Prozess reagieren und dadurch entstandenen Zielterminkollisionen effizienter entgegenwirken. Neben diesen in der Literatur benannten Potenzialen (VDMA 2015, S. 8 f.), konnte im Rahmen der Interviews ein weiterer Nutzensauslöser identifiziert werden. Modulare Fertigungsstrukturen können bei veränderten Terminalsituationen Kapazitäten verlagern oder in kürzester Zeit gänzlich neue Kapazitäten schaffen, was die Flexibilität im Fertigungssystem enorm erhöht.

„Termintreue. Ja, wir haben eben nicht die eine Aufbaureihenfolge, sondern wir können grundsätzlich auch Aufträge priorisiert durch das System schleusen. Wir haben individuelle Durchlaufzeiten für die einzelnen Produkte durch den modularen Aufbau der Montage selbst.“ (I5 01:00:08)

In der Literatur über den prozentualen Anteil der termintreu fertiggestellten Aufträge definiert (Kuyumcu 2013, S. 20), führt die Verwendung der Wirkungskettenanalyse zu neuen Erkenntnissen. Die Quantifizierungsmöglichkeiten der beiden aufgeführten Zitate liegen in der Reduzierung von Transportverspätungen und daraus resultierenden Folgekosten für Sonderfahrten oder Produktionsausfällen beim Kunden sowie in der Reduzierung von Planungs- und Steuerungsaufwand im logistischen Terminplanungsprozess, was schlussendlich den Mitarbeiterinsatz vermindert.

„Also wie viel Termine sind im angemessenen Zeitfenster erfüllt. Wo die Termine nicht eingehalten werden entstehen ja Kosten und die gilt es zu bestimmen.“ (I2 00:34:50)

„[...] im Endeffekt die Messbarkeit der Termintreue sind Logistikkosten. [...] Ja und halt auch wieder dieser ganze Aufwand drumherum. Es muss sich einer drum kümmern. Es muss einer planen und steuern, wenn es irgendwo eng wird.“ [...] Also du sagst der Planungs- und Steuerungsaufwand ist auch noch eine Messgröße. Ja definitiv.“ (I5 01:02:07)

### ***34. Bedarfsglättung***

Die Bedarfsglättung weist mit einer durchschnittlichen Häufigkeit von 15 Prozent den niedrigsten Wert aller sechsunddreißig Nutzenaspekte auf. Damit kann der Nutzenaspekt Bedarfsglättung als Randaspekt betrachtet werden. Der Nutzensauslöser weicht im Kontext Industrie 4.0 nicht erheblich von der definitionsbasierten Beschreibung in der Literatur ab. Es geht stets um die Nivellierung und/oder zeitliche Reihenfolgeplanung von Prozessen zur Reduzierung von Bedarfsspitzen (Angermeier, 2016). Der spezifische Industrie 4.0 Aspekt hierbei ist, dass dies weitgehend automatisiert durch administrative oder operative Systeme bspw. in der Logistik oder der Instandhaltung erfolgt.

Die Messbarkeit der automatisierten Bedarfsglättung kommt gemäß den Interviewpartnern in erster Linie über die Reduzierung von manuellen Tätigkeiten zustande. Daraus resultieren wiederum vermiedene Fertigungszeiten und somit ein verminderter Mitarbeiterereinsatz im Planungs- und Steuerungsprozess. Diese Erkenntnisse entsprechen dem Stand der Literatur (Metternich et al. 2018, S. 14).

### ***35. Prozesstransparenz***

Die Erhöhung der Prozesstransparenz stellt einen Kernnutzen von Industrie 4.0 Lösungen dar. Dies belegt die durchschnittliche Häufigkeit von 95 Prozent, wobei sogar 100 Prozent der indirekten Projekte einen Nutzen in der gestiegenen Prozesstransparenz sehen. Der zentrale Nutzensauslöser liegt in der automatisierten Datenerfassung, -verarbeitung und -visualisierung idealerweise in Echtzeit. Dadurch ist es möglich, den Status eines Prozesses jederzeit vollumfänglich abbilden und gezielte Maßnahmen einleiten zu können.

Da die kontinuierliche, automatisierte Visualisierung von Prozessinformationen völlig neue Möglichkeiten der Prozessüberwachung, -steuerung oder -beeinflussung ermöglicht, wurde eine große Bandbreite an messbaren Nutzenpotenzialen von den Interviewpartnern genannt. Hierbei lassen sich jedoch zwei Schwerpunktbereiche erkennen.

Auf der einen Seite wird eine Reduzierung von manuellen Datenhandlingstätigkeiten erreicht, welche in der Vergangenheit für die manuelle Erzeugung von Prozesstransparenz benötigt wurden und somit als direkte Auswirkung der Automatisierung anzusehen sind.

Auf der anderen Seite bauen Folgenutzen auf der Prozesstransparenz auf, deren Wirkung hauptsächlich in der Reduzierung von Fehlern und Stillstandzeiten im Fertigungs- und Logistikprozess durch gezielteren Maßnahmeneinsatz zu erzielen sind. Die Erkenntnisse zum Nutzenaspekt Prozesstransparenz entsprechen dem Stand der Literatur (Kistler 2018, S. 30; Steven 2019, S. 138 f.).

### **36. Skalierbarkeit**

Auch die Skalierbarkeit muss mit einer Häufigkeit von durchschnittlich 92 Prozent als Kernnutzenaspekt von Industrie 4.0 Lösungen angesehen werden. Durch die horizontale Skalierbarkeit von entwickelten Lösungen auf andere Bereiche, Werke und sogar Branchen weltweit ist es möglich, unterschiedlichste Effizienzen zu erzielen. Zudem sind Industrie 4.0 Lösungen häufig vertikal skalierbar, was bspw. die dynamische und vollautomatische Kapazitätsanpassung von autonomen Flurförderzeugen oder Drohnen innerhalb eines Transportsystems betrifft. Cloudbasierte Architekturen ermöglichen ressourcenschonend sowohl vertikale als auch horizontale Skalierbarkeit.

Quantifizierungsmöglichkeiten von Skalierbarkeit können häufig direkt benannt und mit konkreten Zahlenwerten beschrieben werden. Die Interviewpartner nennen hier die Übertragbarkeit von einmalig entwickelten Hard- und Softwarekomponenten, welche die Entwicklungskosten für Folgeprojekte signifikant reduziert. Zudem können Inbetriebnahmeaufwände und Fehler durch bekannte, standardisierte Vorgehensweisen reduziert oder sogar vermieden werden. Im Vergleich zu Individualentwicklungen weisen skalierte Lösungen geringere Betriebskosten für Lizenzen, Service und Wartungen auf. Auch die Erkenntnisse zum Nutzenaspekt Skalierbarkeit entsprechen dem Stand der Literatur (Fauser et al. 2017, S. 75; Schmitt et al. 2020, S. 513).

#### **4.2.2 Bedeutung und Systematisierung von Kostenaspekten**

Bereits im Laufe der Befragungsserie konnte festgestellt werden, dass den Projektleitern die Beantwortung der Frage nach den relevanten Kostenaspekten deutlich leichter fällt als die Frage nach den Nutzenaspekten. Üblicherweise konnten die Interviewpartner die Kostenkategorien und teilweise auch die detaillierten Kosten für das jeweilige Projekt sofort benennen.

„Ja, das geht deutlich zügiger als bei den Nutzen eben. Ich sag mal die Kosten bzw. die Kostenblöcke sind jetzt nichts spezielles sondern die kennen wir recht genau.“ (I10 00:45:28)

„Das ist ja auch so, also deutlich leichter zu identifizieren. Wir können relativ genau sagen was uns die Lösung kostet.“ (I11 00:47:12)

„Ah, das geht schnell. Die kennen wir im Detail.“ (I14 00:34:10)

Da dieser Umstand in Übereinstimmung mit den literarischen Erkenntnissen bereits bei der Erstellung des Interviewleitfadens Berücksichtigung fand, existiert auch nur eine allgemeine Frage zur Nennung der Kostenaspekte durch den Projektleiter. Den Interviewpartnern wurden demzufolge keine Kostenaspekte vorgeschlagen, deren Relevanzbewertung für das jeweilige Projekt vorgenommen werden musste.

Anhang 3 zeigt die Detailauswertung zu den Kostenaspekten je Industrie 4.0 Projekt in direkten und indirekten Bereichen.

Mit hoher Relevanz sind Service-/Wartungskosten, Energiekosten, Qualifizierungskosten und die Personalkosten mit einer Häufigkeit von über 90 Prozent zu nennen. Mit einer Häufigkeit von unter 25 Prozent sind Mietkosten, Flächenkosten sowie die Neuentwicklung und Anpassung von Hardware einzustufen. Signifikante Unterschiede zwischen Projekten aus direkten und indirekten Bereichen zeigen sich lediglich bei den Informations- und Datenhandlingskosten, die im indirekten Bereich mit 85 Prozent und im direkten Bereich mit 26 Prozent Häufigkeit auftreten.

Die Erkenntnis, dass die Kostenaspekte von Industrie 4.0 Anwendungen keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu Kostenaspekten von bspw. Industrie 3.0 Projekten oder anderweitigen Digitalisierungs- oder IT-Vorhaben aufweisen, führte dazu, dass die Ergebnisse der Experteninterviews in nur einem Steckbrief zusammengefasst werden konnten. Dieser Umstand wirkt sich positiv auf die Bewertungssystematik aus, da die Komplexität reduziert und die Nutzerfreundlichkeit erhöht wird. Der Steckbriefe für die Kostenaspekte ist in Abbildung 20 dargestellt.

Vergleichbar mit den Steckbriefen der Nutzenaspekte ist auf dem Steckbrief der Kostenaspekte eine allgemeine Definition des Begriffes Kosten vermerkt. Darunter sind einige Beispiele aus den betrachteten Projekten zusammengefasst. Auf der rechten Seite sind die einzelnen Kostenkategorien und deren Detailkosten aufgelistet, aus denen operative Anwender die für ihr Projekt relevanten Kosten auswählen können. Ein Umrechnungsäquivalent wird bei Kostenaspekten gemeinhin nicht benötigt, da diese ohnehin quantitative und monetarisierte Elemente der Kosten- /Nutzenrechnung sind.

Eine wichtige Gruppierung bei den Kostenaspekten ist die Frequenz des jeweiligen Kostenanfalls, da diese häufig nicht nur einmalig, sondern auch laufend und teilweise sogar über die eigentliche Projektlaufzeit hinaus anfallen können (Westkämper et al. 2006 b, S. 105 ff.).

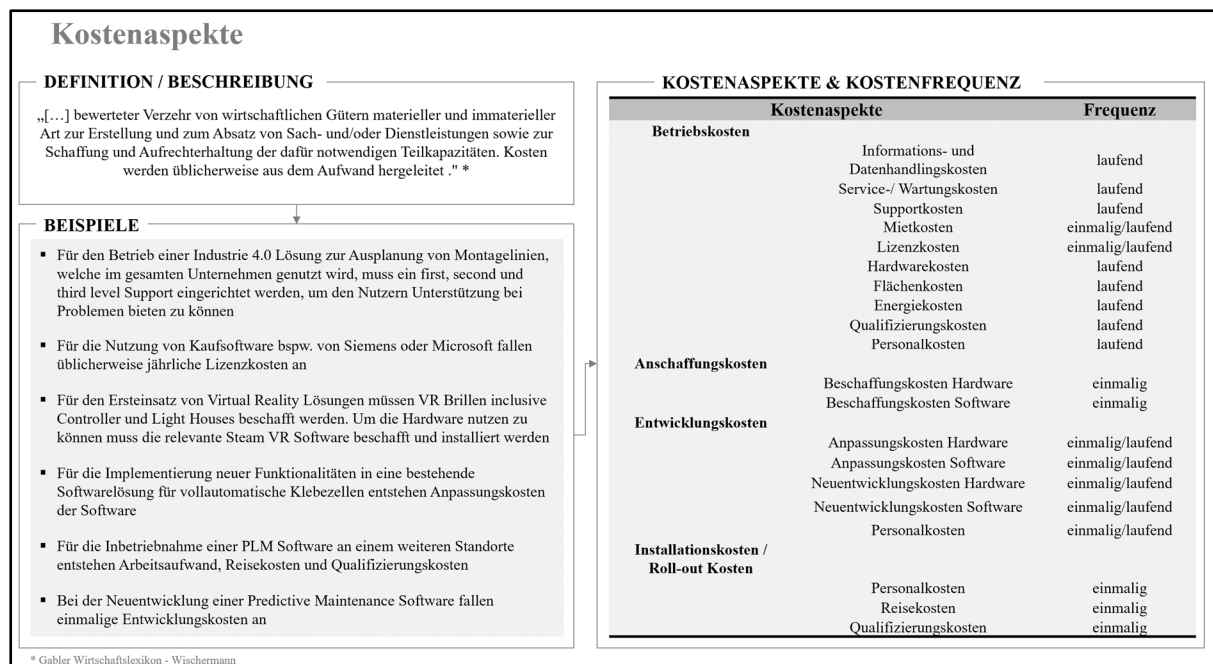


Abbildung 20: Ergebnisse der Experteninterviews zu den Kostenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen

Die insgesamt sechzehn Kostenaspekte sind nach der Logik von Schiffer und Autenrieth in vier Kostenkategorien/-arten eingeteilt (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 83):

## 1. Betriebskosten

Ursprünglich aus dem Immobiliengewerbe stammend, beinhalten Betriebskosten alle üblicherweise laufenden Kosten, die beim operativen Einsatz einer Software- oder Hardwarelösung anfallen (Stöfen 2018).

## 2. Anschaffungskosten

Auch als Synonym für Anschaffungskosten verwendet, bilden Beschaffungskosten alle Ausgaben für die Beschaffung von Sachen und Dienstleistungen in einem Unternehmen oder Projekt ab (Weber 2018 b).

## 3. Entwicklungskosten

Entwicklungskosten im IT-Umfeld sind in der Literatur als verlässlich zurechenbare Kosten für die Entwicklung von Software- oder Hardwareprodukten definiert (Dawo 2019).

## 4. Installations- / Roll-out Kosten

Diese Kategorie beschreibt alle Kosten die anfallen, um die erstmalige, bestimmungsgemäße Verwendung eine Hardware oder Software zu erreichen (Frick 2009). Im Kontext Roll-out können Inbetriebnahmekosten auch die erstmalige, bestimmungsgemäße Verwendung in einer weiteren Organisationseinheit oder einem zusätzlichen Standort bedeuten (Augsten 2017).

## 4.3 Entwicklung einer Systematisierungslogik für Nutzenaspekte

Forschungsfrage 2 ist auf die Fragestellung zugeschnitten, wie eine leicht verständliche Systematisierung der Kosten- und Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik mit dem Ziel der Komplexitätsreduzierung für den Endanwender gelingen kann. In Kapitel 4.2 konnte bereits herausgearbeitet werden, dass eine weiterführende Systematisierung der Kostenaspekte aufgrund der geringen Komplexität und der geringen absoluten Anzahl nicht weiter untersucht werden muss, sodass der Schwerpunkt in diesem Kapitel auf der Systematisierung von Nutzenaspekten liegt.

### 4.3.1 Auswahl eines Systematisierungsrahmens für Nutzenaspekte

Im ersten Schritt ergab die Prüfung auf Redundanzen im Rahmen der internen Focus Group folgende Ergebnisse. Es konnte identifiziert werden, dass der Nutzenaspekt Individualisierung der Bedienoberfläche als Bestandteil des Nutzenaspekts Usability/Nutzerfreundlichkeit zu betrachten ist. Weiterhin geht der Nutzenaspekt Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen in den Nutzenaspekten Assistenzsysteme und Autonome Systeme auf. Der Nutzenaspekt Mitarbeitervernetzung ist durch mehrere Aspekte wie bspw. Value Chain Integration, Datenkonsistenz und Wissens- und Erfahrungsmanagement abgedeckt. Aus Sicht der Focus Group Teilnehmer sind auch Automatisierung und virtuelle Absicherung keine eigenständigen Nutzenaspekte, da diese durch Assistenzsysteme und Autonome Systeme bereits repräsentiert sind. Zudem wurde festgestellt, dass der Nutzenaspekt Informationsverfügbarkeit in Datenkonsistenz aufgeht. Insgesamt reduziert sich die Anzahl der Nutzenaspekte dadurch von zweiunddreißig auf sechsundzwanzig.

Da eine Unterstützungslogik für Projektleiter von Industrie 4.0 Lösungen mit sechsundzwanzig zur Auswahl stehenden Nutzenaspekten als immer noch zu unpraktikabel eingestuft wurde, musste an weiteren Vereinfachungen gearbeitet werden. Dazu zeigt Abbildung 21 die Gegenüberstellung der identifizierten Systematisierungsansätze für Nutzenaspekte, die aus den relevanten Bewertungsansätzen abgeleitet sind. Das Ziel dabei bestand in der Auswahl einer Systematisierungslogik, welche die Praktikabilität der Kosten-/Nutzenanalyse erhöht.

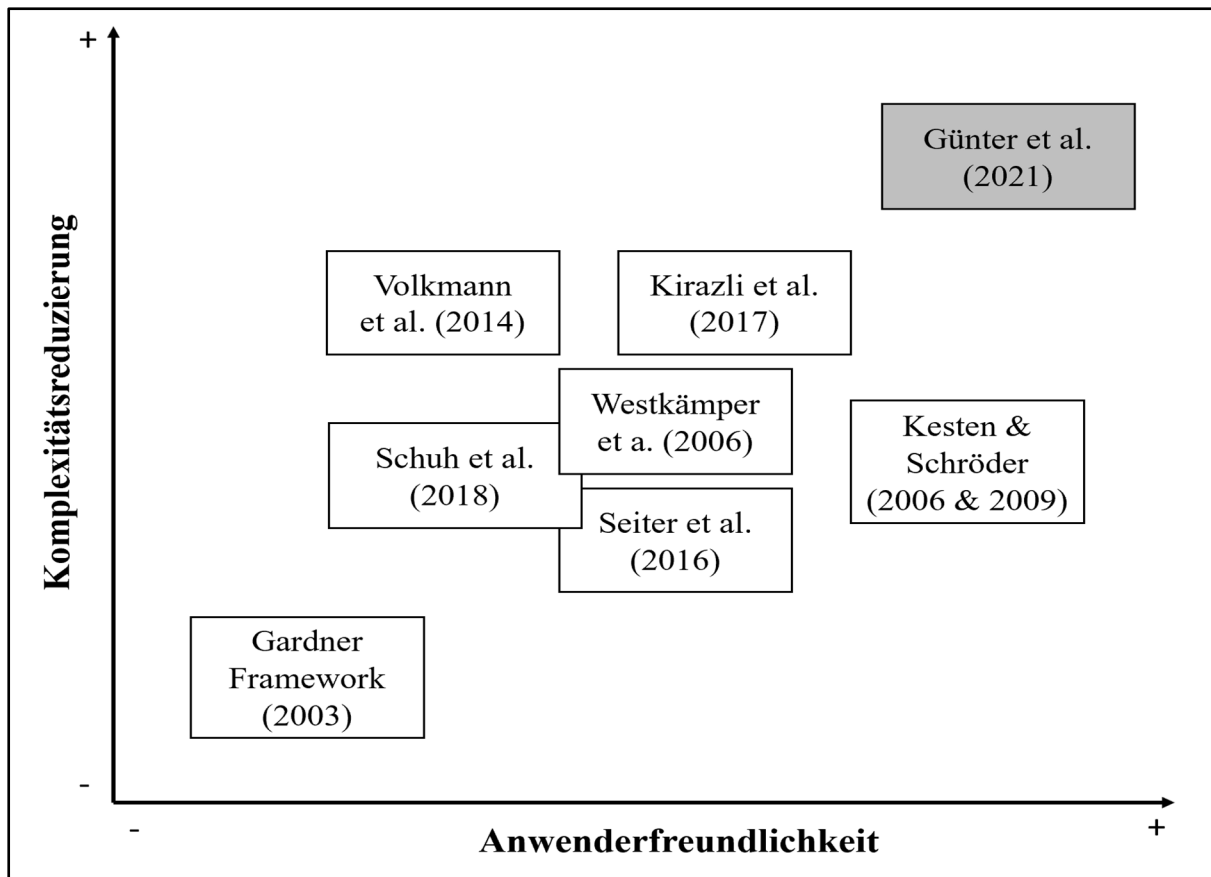


Abbildung 21: Auswahl einer geeigneten Systematisierungslogik für Nutzenaspekte

Wie Abbildung 21 zeigt, wird auf den Ansatz von Günter et al. (2021) als Basis für die Systematisierungslogik zurückgegriffen, der nach Einschätzung der Focus Group Teilnehmer als anwenderfreundlich und gleichermaßen komplexitätsreduzierend eingestuft wurde. Zur Systematisierung der Nutzenaspekte nutzt der Ansatz zur ökonomischen Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen die Begriffe Ziel-, Ergebnis- und Steuergröße und ordnet Nutzenaspekte diesen entsprechend zu.

Ergebnisgrößen sind Nutzenaspekte, die selber keinen Nutzensauslöser darstellen, sondern lediglich das Ergebnis der sogenannten Steuergrößen darstellen. Beispiele für Ergebnisgrößen sind Prozessqualität und Produktqualität. Demzufolge sind Steuergrößen Nutzenaspekte, welche direkt einen Nutzen auslösen und somit vordringlich im Rahmen einer Kosten-/Nutzenanalyse zu betrachten sind. Beispiele für Steuergrößen sind Standardisierung und Modularisierung (Günter et al. 2021, S. 6 f.). Um die Komplexität zu reduzieren, verzichteten die Teilnehmer der Focus Group auf die Verwendung von Zielgrößen.

Somit wird eine hierarchische, zweistufige Systematisierungslogik verwendet, um die Praxistauglichkeit bei der Kosten-/Nutzenbewertung zu erhöhen. Zudem wird durch diese neue Logik die klassische Unterscheidung in qualitative und quantitative Nutzenaspekte abgelöst.

### 4.3.2 Ausgestaltung des Systematisierungsrahmens für Nutzenaspekte

Der zweite Schritt der Systematisierungsdiskussionen von Nutzenaspekten innerhalb der Focus Group umfasste die Zuordnung der relevanten Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik in die beiden Kategorien Ergebnis- und Steuergröße. Um an diesem Punkt die Unabhängigkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurde den Teilnehmern die von Günter et al. (2021) bereits vorgenommene Einteilung nicht vorgestellt. Die Zuordnung fand lediglich unter Zuhilfenahme der Definitionen für Steuer- und Ergebnisgrößen und der entwickelten Steckbriefe statt.

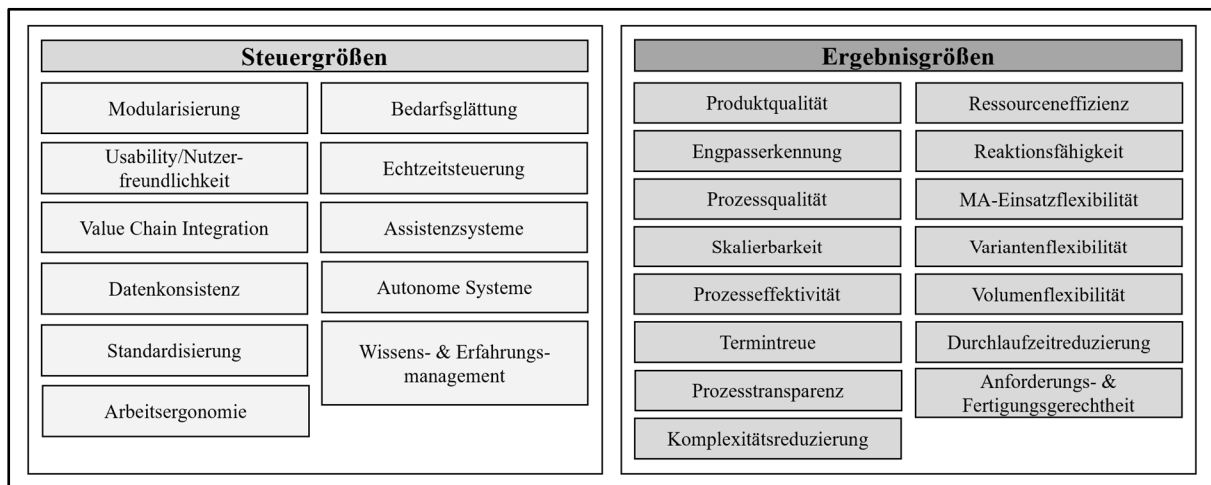


Abbildung 22: Zuordnung der Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen zu Steuer- und Ergebnisgrößen

Erst im Nachgang der Zuordnung erfolgte ein Abgleich mit der vorhandenen Einteilung nach Günter et al. (2021). Dabei konnte eine ca. 80 prozentige Übereinstimmung festgestellt werden. Abbildung 22 zeigt das Ergebnis der Zuordnung der Nutzenaspekte zu Steuer- bzw. Ergebnisgrößen. Durch die vorgenommene Zuordnung wurden die sechsundzwanzig Nutzenaspekte in elf Steuer- und fünfzehn Ergebnisgrößen eingeteilt.

In Schritt drei der Systematisierungsdiskussionen galt es eine quantifizierbare Abhängigkeit zwischen den Steuer- und Ergebnisgrößen zu definieren. Hierfür wählten die Focus Group Teilnehmer die Quantifizierungsmöglichkeiten der einzelnen Nutzenaspekte als Grundlage. Beim Ansatz von Günter et al. (2021) erfolgte die Festlegung der Abhängigkeiten zwischen Ergebnis- und Steuergrößen noch auf Basis subjektiver Einschätzungen des Projektteams. Im Rahmen dieser Arbeit basieren die Abhängigkeiten auf quantitativ beschreibbaren Zusammenhängen der Interviewergebnisse. Da Steuergrößen per Definition als Eingangsgröße für Ergebnisgrößen zu betrachten sind, erweist sich die Prüfung der Quantifizierungsmöglichkeiten auf Überschneidungen als zielführend. Konkret konnte herausgearbeitet werden, dass eine Steuergröße in eindeutiger Abhängigkeit zu einer Ergebnisgröße gesetzt werden kann,

wenn die Mehrheit der Quantifizierungsmöglichkeiten der Steuergröße mit jenen der Ergebnisgröße im Steckbrief übereinstimmen. Dabei ist zu erwähnen, dass die Festlegung der Grenze von  $\geq 50$  Prozent durch die Focus Group Teilnehmer erfolgte und das höhere oder niedrigere Werte ein anderes Ergebnis erzeugen. Ein Beispiel für die Steuergröße Standardisierung ist in Abbildung 23 visualisiert.

Steuergröße	Ergebnisgrößen	Übereinstimmung bei den Quantifizierungen in %	Abhängigkeit
Standardisierung	Variantenflexibilität	60	ja
	Reaktionsfähigkeit	30	nein
	Durchlaufzeitreduzierung	40	nein
	Volumenflexibilität	50	ja
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	20	nein
	Komplexitätsreduzierung	80	ja
	Prozessqualität	90	ja
	Produktqualität	50	ja
	Ressourceneffizienz	90	ja
	Prozesseffektivität	60	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	90	ja
	Skalierbarkeit	90	ja
	Termintreue	40	nein
	Engpasserkennung	20	nein
Prozesstransparenz	60	ja	

Abbildung 23: Abhängigkeit zwischen Steuer- und Ergebnisgrößen am Beispiel der Steuergröße Standardisierung

Die Detailauswertungen zur Systematisierung der Nutzenaspekte sind in Anhang 6 zu finden. Das Ergebnis der gesamtheitlichen Zuordnung der Steuergrößen zu den Ergebnisgrößen mittels der beschriebenen Logik ist in Abbildung 24 dargestellt. Die identifizierten Abhängigkeiten sind hier mittels Verbindungspfeilen für alle Steuer- und Ergebnisgrößen visualisiert.

Die Einteilung der Nutzenaspekte für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik in Steuer- und Ergebnisgrößen führt dazu, dass gemäß Definition lediglich die elf Steuergrößen im Rahmen einer Kosten-/Nutzenbewertung zu betrachten sind, da die fünfzehn Ergebnisgrößen in der systematischen Folge des Vorgehensmodells automatisch zugeordnet werden. Durch die Einführung der vorgestellten Systematisierung von Nutzenaspekten konnte die ursprüngliche Zahl von sechsundzwanzig auf elf Steuergrößen und fünfzehn Ergebnisgrößen reduziert werden.

Durch die schrittweise Reduzierung, Zusammenfassung und Systematisierung ist es möglich, die sechsunddreißig literatur- und interviewrelevanten Nutzenaspekte auf elf ausschlaggebende Steuergrößen zu reduzieren und somit die Basis für eine praktikable und effiziente Kosten-/Nutzenanalyse zu schaffen. Somit ist Forschungsfrage 2 nach der Definition einer Systematisierung der Nutzenaspekte zur Komplexitätsreduzierung bei der Nutzensauswahl für operative Anwender beantwortet. An dieser Stelle ist nochmals herauszustellen, dass die

Systematisierung der Nutzenaspekte im Vergleich zum Ansatz von Günther et al. (2021) zwar auf Basis der Quantifizierungsmöglichkeiten objektiviert werden konnte, jedoch besteht keine statistische Absicherung der Abhängigkeiten zwischen Steuer- und Ergebnisgrößen. Das Ergebnis in Abbildung 24 resultiert aus qualitativen Einschätzungen und Festlegungen von Fachexperten unter Praktikabilitäts Gesichtspunkten und nicht aus mathematischen Analysen.

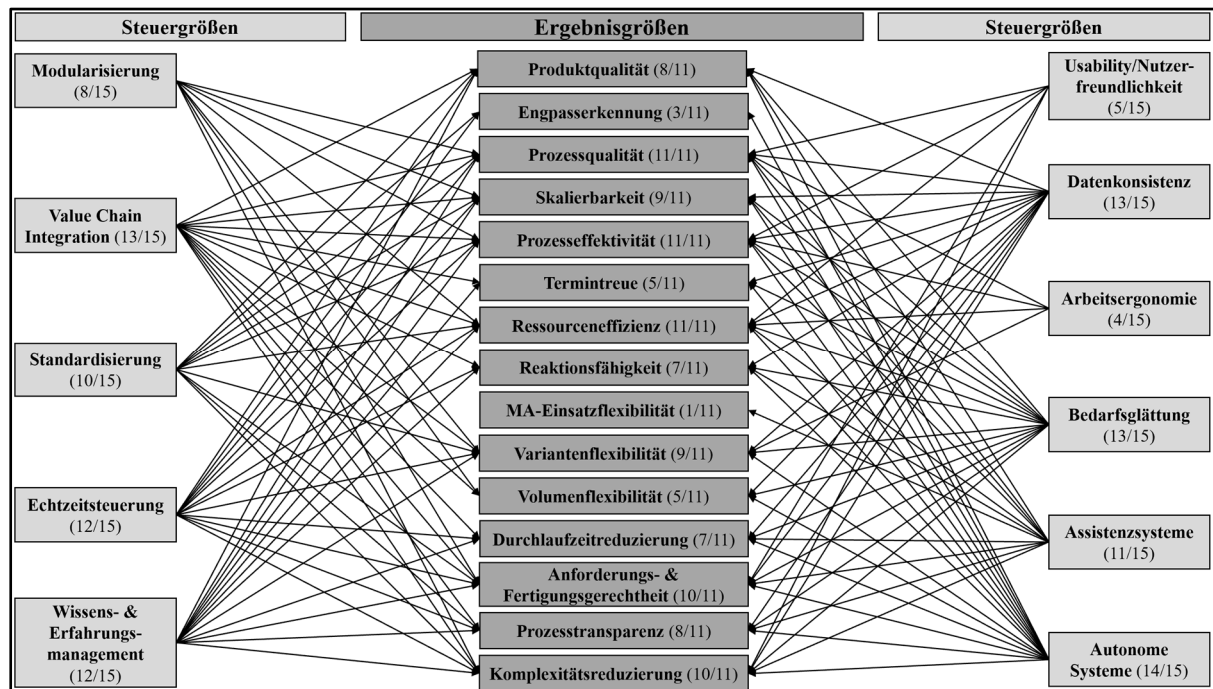


Abbildung 24: Übersicht der quantitativen Zuordnung von Steuer- zu den Ergebnisgrößen

#### 4.4 Integration der Forschungsergebnisse in ein Vorgehensmodell

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 erfolgt in diesem Kapitel die Herleitung der notwendigen Bewertungsschritte einer ex-ante Investitionsbewertung für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik unter Einbeziehung der in den vorhergehenden Kapiteln erarbeiteten Forschungsergebnisse. Dabei wird auf die Detailauswertung der analysierten Ansätze aus der Literatur in Kapitel 3.5 zurückgegriffen. Diesbezüglich wird zuerst unter 4.4.1 ein grober Modellrahmen für das zu entwickelnde Vorgehensmodell definiert, der im weiteren Verlauf des Kapitels unter 4.4.2 durch die Herleitung geeigneter Methoden und Verfahren weiter konkretisiert wird.

##### 4.4.1 Konzeptionierung des Modellrahmens

In Kapitel 3.5 konnte herausgearbeitet werden, dass kein vorgestellter Bewertungsansatz alle zwölf Anforderungskriterien an eine ex-ante Wirtschaftlichkeitsbewertung von Industrie 4.0 Investitionen erfüllt. Aus diesem Grund gilt es ein neues Vorgehensmodell zu entwickeln,

welches alle zwölf Anforderungen abdeckt und dabei praxisorientiert und anwenderfreundlich gestaltet ist.

Dazu bietet es sich an, ein Vorgehensmodell auf Basis der vorgestellten Ansätze und verwendeten Methoden aufzubauen und danach um fehlende Bewertungsschritte und relevante Verfahren zu erweitern, um allen Anforderungen gerecht zu werden. Dabei gilt es sowohl die notwendigen Inhalte der Bewertungsschritte als auch deren Reihenfolge und Benennung zu identifizieren. Hierzu müssen die relevanten Bewertungsansätze hinsichtlich ihrer Bewertungsschritte miteinander verglichen werden, um valide Ableitungen durchführen zu können. Es findet keine Einschränkung statt, da alle Ansätze gemäß Anforderungskriterium 2 ein praxistaugliches, strukturiertes Vorgehensmodell mit Phasenorientierung aufweisen und somit geeignet sind, um in die Gegenüberstellung einzufließen. Die Gegenüberstellung der Bewertungsschritte je Bewertungsansatz mit den relevanten Anforderungskriterien ist in Abbildung 25 und 26 dargestellt. Bewertungsschritte, die einzelne Anforderungskriterien erfüllen, sind mit einem x gekennzeichnet. Mit einem t gekennzeichnete Bewertungsschritte erfüllen Anforderungskriterien nur teilweise. Ein freies Feld steht für Nichterfüllung.

Wichtig zu erwähnen ist, dass die Anforderungskriterien 1 und 2 nicht in der Tabelle aufgeführt sind, da diese allgemeiner Natur sind und nicht auf die inhaltliche Vorgehensweise abzielen. Anforderungskriterium 7 ist ebenfalls nicht aufgeführt, da in keinem der Bewertungsansätze Vorgehensmodelle zur Beantwortung der Anforderungen von Industrie 4.0 Lösungen aus direkten und indirekten Bereichen an eine Kosten-/Nutzenanalyse zu finden sind.

Insgesamt ist festzuhalten, dass keine allgemeingültige Vorgehensweise identifiziert werden konnte, obgleich Muster einzelner Bewertungsschritte und Methoden für die Entwicklung eines neuen Ansatzes verwendet werden können. Die vorgestellten Bewertungsansätze sind grundlegend unterschiedlicher Natur. Einige Ansätze fokussieren spezifische Industrie 4.0 Technologien wie Predictive Maintenance oder Virtual Reality, wohingegen andere ein allgemeingültiges Vorgehensmodell zur Investitionsbewertung von Industrie 4.0, Digitalisierungs- oder IT-Investitionen beschreiben. Die Anzahl der Bewertungsschritte schwankt zwischen zwei und sieben, wobei der Großteil der Ansätze vier bis sechs Bewertungsschritte umfasst.

Bewertungsansatz	Bewertungsschritte	Anforderungskriterien									
		AK 3: Berücksichtigung von Kosten- und Nutzenaspekten	AK 4: Systematisierungslogik für Kosten- und Nutzenaspekte	AK 5: Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten	AK 6: Bibliotheken mit Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten	AK 8: Beitrag zur Schaffung synchroner IT-Systemlandschaften inklusive Technologieauswahl	AK 9: Berücksichtigung von Unsicherheiten und Risiken	AK 10: Methoden zur Prozessvisualisierung und -optimierung	AK 11: Gobbeschreibung des Investitionsvorhabens	AK 12: Abschließende Investitionsbewertung mittels relevanter Investitionsrechnungsverfahren	
Obermeier et al. (2018)	Ist-Prozessmodellierung							x			
	Anforderungen an das Soll-Konzept							x			
	Modellierung des Soll-Prozesses							x			
	Identifikation von Nutzenpotenzialen Potenzialanalyse	x	x	t						x	
Günther et al. (2018)	Technologie Readiness Level										
	Singapur Smart Industry Readiness Index										
	Prozessanalyse							x			
	Handlungsbedarf ableiten										
	Zielsetzung	x	x	t							
	Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge		x								
Schuh et al. (2018)	I4.0 Technologieauswahl						t				
	Bewertung									x	
	Vorprüfung							x	x		
	Monetäre Bewertung	x	x	t							
Volkman et al. (2014)	Nicht-monetäre Bewertung	x	x								
	Entscheidung									x	
	Bestimmung der Prämissen								x		
	Modellierung							x			
	Bestimmung der Kennzahlen							x			
	Marktanalyse und Vorauswahl						t				
	Lösungswahl						t				
Schiffer & Autenrieth (2019)	Neukonzeption										
	Bestimmung der Basisdaten- und KZ-änderung	x		x							
	Wirtschaftlichkeitsrechnung und Auswertung	x								x	
Kirazli (2017)	Klassifizierung Cyber-Physischer Systeme						t				
	Quantifizierung der Performancesteigerung	x					t				
	Kostenermittlung von Cyber-Physischen Technologien	x								x	
	Prozessaufnahme							x	x		
	Prozessanalyse							x			
Liebrecht (2020)	Prozessbewertung Ist-Zustand		x					x			
	Prozessoptimierung							x			
	Prozessbewertung Soll-Zustand		x					x			
Stocker et al. (2019)	Prozessbewertung und -implementierung	x						x		x	
	Eingrenzung relevanter Methoden										
	Bewertung von Potenzialmethodensträngen	x								x	
	Simulation der Implementierungsreihenfolge										
Kirsch (2017)	Ausgangssituation							x	x		
	Technische Lösungsansätze						t				
	Technische Enabler						t				
	Zielsituation							x			
Plattform Mittelstand 4.0 (2016)	Impactbewertung	x								x	
	Untersuchungsbereich abgrenzen								t		
	Prozessanalyse							x			
Plattform Mittelstand 4.0 (2016)	Potenzialanalyse und Bewertung	x								x	
	Quantifizierte Erfassung des Ist-Zustands							x			
	Berechnung der anstehenden Investitionen	x									
Plattform Mittelstand 4.0 (2016)	Kosten-/Nutzenbewertung	x								x	

Abbildung 25: Gegenüberstellung der Bewertungsschritte und Anforderungskriterien Teil 1

Bewertungsansatz	Bewertungsschritte	Anforderungskriterien									
		AK 3: Berücksichtigung von Kosten- und Nutzenaspekten	AK 4: Systematisierung für Kosten- und Nutzenaspekte	AK 5: Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten	AK 6: Bibliotheken mit Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten	AK 8: Beitrag zur Schaffung synchroner IT-Systemlandschaften inklusive Technologieauswahl	AK 9: Berücksichtigung von Unsicherheiten und Risiken	AK 10: Methoden zur Prozessvisualisierung und -optimierung	AK 11: Gobbeschreibung des Investitionsvorhabens	AK 12: Abschließende Investitionsbewertung mittels relevanter Investitionsrechnungsverfahren	
Seiter et al. (2016)	Bestandsaufnahme									x	
	Potenziale identifizieren	x									
	Potenziale auswählen		x	t							
	Potenziale bewerten	x						x			x
	Roadmap erstellen										
Plattform Mittelstand 4.0 (2020)	Kosten-/Nutzenanalyse	x					t			x	
	Investitionsbewertung	x									x
Barthelmey et al. (2019)	Ergonomische Bewertung des Szenarios								x		
	Kosten-/Nutzenbewertung	x	t		t						x
	Risiko- und Unsicherheitsbewertung							t			
Hetterscheid (2020)	Vorbereitung der digitalen Prozesstransformation									x	
	Analyse des Ist-Zustandes und Definition des Soll-Zustandes								x		
	Entwicklung eines CPS-Konzepts						t				
Fraunhofer IML (2018)	ex-ante Nutzenbewertung	t	x	t							t
	Spezifizierung des Investitionsvorhabens									x	
	Kosten- und Nutzenanalyse	x	x								
	Investitionsrechnung	x									
	Projektrisiken							x			
Plattform Mittelstand 4.0 (2017)	Strategische Bedeutung										
	Wirtschaftlichkeitsbewertung										x
	Definieren									x	
	Bewerten	x									
	Analysieren	x									
Kesten & Schröder (2006 & 2009)	Risiken abschätzen							x			
	Auswerten										x
	Investitionsbeschreibung								x	x	
	Wirkungsbeschreibung		x				t				
Schäffer et al. (2018)	Monetarisierung	x		t							
	Wirtschaftlichkeit und Unsicherheit	x						x			x
	Definition primärer und sekundärer Parameter									x	
	Kostenmodelle	x	t								
	Nutzenmodelle	x	t								
Westkämper et al. (2006)	Wirtschaftlichkeitsmodell	x									
	Risikobewertung							x			x
	Auswahl von Nutzenkategorien	x	x		t						
	Auswahl von Kostenkategorien	x	x		t						
Eigner & Stelzer (2009)	Prozessanalyse								x	x	
	Investitionsbewertung	x									x
	Ist-Zustand								t		
	Auswirkung der PLM-Einführung	x									
Forrester Research Inc. (2003)	Kosten-Nutzen-Erfassungsmodell	x	x	t	t			t			
	Berechnung	x									x
	Ergebnisaufbereitung										x
	Kosten-/Nutzenanalyse	x									
Gartner Framework (2003)	Folgenutzen durch Enablertechnologien	x									
	Risikoanalyse							x			x
	Projektbeschreibung									x	
	Capability Analyse						t				
	Kosten-/Nutzenanalyse	x	x		t						
Mascarella et al. (2005)	Dynamic Benefit Realization				t			t			
	Risikoanalyse							x			x
	Business Assessment									x	
	Solution								x		
Mascarella et al. (2005)	Cost and Benefit	x	t		t						
	Risk							x			
	Financial Metrics										x

Abbildung 26: Gegenüberstellung der Bewertungsschritte und Anforderungskriterien Teil 2

Insgesamt lassen sich sieben Bewertungsschritte aus den analysierten Bewertungsansätzen ableiten, die häufig in einer dezidierten Reihenfolge durchlaufen werden, wenngleich die inhaltliche Ausprägung oftmals stark abweicht. Die identifizierten Bewertungsschritte sind: Vorprüfung/Projektbeschreibung, Prozessanalyse, IT-Integration, Technologieauswahl, Kosten-/Nutzenanalyse, Risiko und Unsicherheitsanalyse und Investitionsbewertung. Weiterhin zeigt die Analyse der Bewertungsansätze, dass in Bezug auf die Ablaufart stets ein sequenzielles Vorgehen gewählt wird, sodass die Ergebnisse einzelner Bewertungsschritte sukzessive in die folgenden Schritte einfließen. Inkrementelle oder agile Vorgehensweisen konnten nicht identifiziert werden. In Kapitel 4.4.2 erfolgt eine detaillierte Herleitung des in Abbildung 27 gezeigten Modellrahmens für eine ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik.

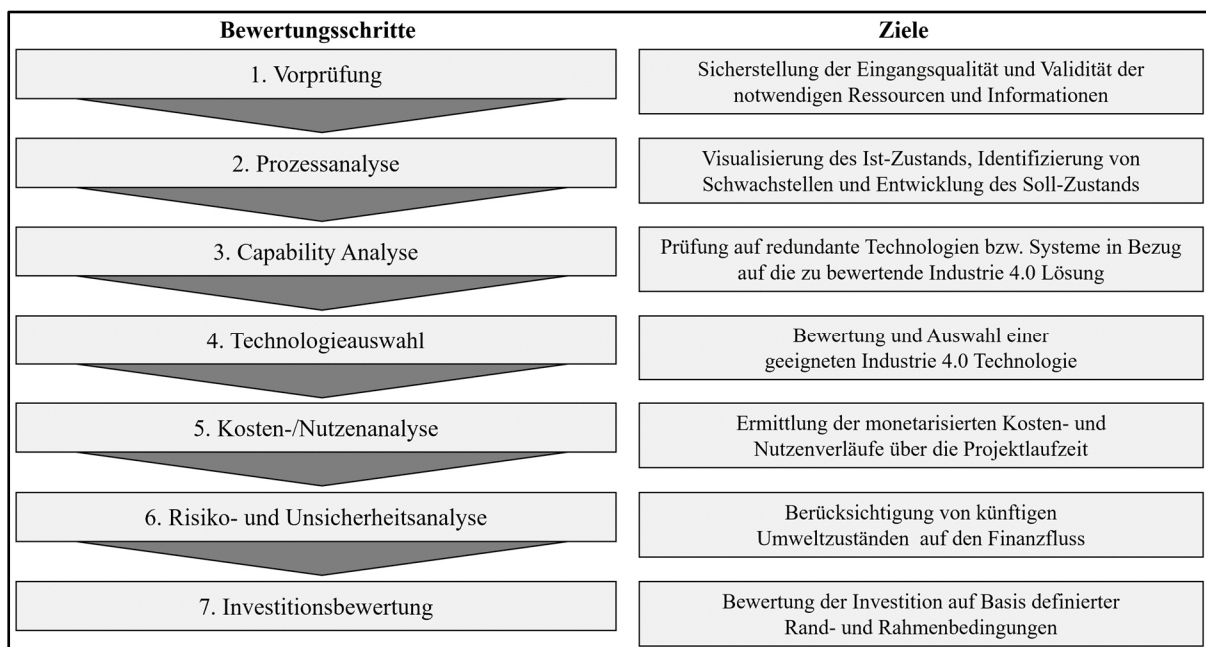


Abbildung 27: Modellrahmen des Vorgehensmodells zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen

#### 4.4.2 Herleitung der Bewertungsschritte und Verfahren

Der in Kapitel 4.4.1 vorgestellte Modellrahmen wird in diesem Kapitel in Bezug auf die erforderlichen Bewertungsschritte detailliert und um relevante Verfahren in den einzelnen Phasen ergänzt. Die Detailvorstellung des entwickelten ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik auf methodischer Ebene erfolgt darauf aufbauend in Kapitel 4.5 der Arbeit.

##### 1. Vorprüfung

Eine grundlegende Form der Projektvorprüfung ist in fünfzehn der dreiundzwanzig betrachteten Bewertungsansätze vorhanden und wird überwiegend zu Beginn der Bewertung

durchgeführt. Dieser Bewertungsschritt hat die Festlegung der Prämissen einer Investition in Bezug auf Prozess, Organisation, Ressourcen, Informationen und Know-how (Volkman 2014, S. 103 f.) zum Ziel. Zudem geht es um die detaillierte Schilderung der Ausgangssituation des Projektvorhabens im Kontext der Problem- und Zielstellung (Stocker et al. 2019, S. 500). Hierzu gehört bspw. auch die Abgrenzung des Untersuchungsbereichs (Kirsch 2017, S. 8), Definition des Budgets, des Zeitrahmens und des notwendigen Projektteams (Brosa-Abut und Parlings 2017, S. 3 f.). Andere Ansätze spezifizieren oder definieren das Investitionsvorhaben und verwenden anstelle des Begriffes Vorprüfung bspw. Projektbeschreibung (Apfel und Smith 2003, S. 5 f.) oder Business Assessment (Mascarella 2005, S. 5 ff.). Dabei werden auch Schwerpunkte bei der Identifikation kritischer Projekterfolgskriterien, KPIs und unternehmensstrategischer Eckpunkte gelegt (Mascarella 2005, S. 19). Allen Bewertungsschritten gemein ist das Ziel, eine gewisse Eingangsqualität und Validität in Bezug auf die notwendigen Ressourcen und Informationen der zu bewertenden Investition sicherzustellen (Schuh et al. 2018, S. 42), sodass keine unnötige Ressourcenverschwendung bei der späteren Detailbewertung betrieben wird. Gemäß der Formulierung von Mascarella (2005), muss an dieser Stelle eine Detaillierungsstufe gewählt werden, die ausreichend ist, um Ressourcen allozieren zu können (Mascarella 2005, S. 9). Dieser formale Akt der Vorprüfung soll also dazu beitragen, den Grundstein für eine spätere Investitionsbewertung zu legen (Mascarella 2005, S. 9 ff.). Damit kann dem Anforderungskriterium 11 nach der Gobbeschreibung des Investitionsvorhabens entsprochen werden.

Abgeleitet aus den analysierten Ansätzen zur Investitionsbewertung lassen sich acht Betrachtungsschwerpunkte innerhalb einer Vorprüfungsphase definieren, um den Anforderungen an Prozesse, Personal, Technologien und Finanzen entsprechen zu können: Projekttitle, Problemstellung, Zielstellung, Nutzerkreis und Zielgruppe, Zeitschiene und Meilensteine, Aufwand/Nutzen Schätzung, IT-Systemanalyse, Prämissen und Annahmen.

## **2. Prozessanalyse**

Vierzehn der dreiundzwanzig betrachteten Bewertungsansätze weisen einen der klassischen Prozessanalyse ähnlichen Bewertungsschritt auf. Wobei vier Bewertungsansätze eben genau diese Begrifflichkeit verwenden (Günter et al. 2021, S. 4 f.; Kirsch 2017, S. 7; Kirazli 2017, S. 107; Westkämper et al. 2006 a, S. 105). Hierbei ist die Prozessschritttiefe bei der Prozessanalyse innerhalb der Bewertungsansätze stark schwankend. Beispielsweise gliedert Kirazli (2007) die Prozessanalyse in sieben Bewertungsschritte auf (Kirazli 2017, S. 107), wohingegen beim Ansatz von Westkämper et al. (2006) all diese Schritte unter den Begriffen Ist- und Soll-Analyse subsumiert sind (Westkämper et al. 2006 a, S. 105). Prozessanalysen sind ein

weitverbreitetes Werkzeug zur systematischen Untersuchung von Prozessen und deren Bestandteilen, um ein Gesamtverständnis über den Fachprozess zu erlangen. Dabei sollen Schwachstellen im Prozess identifiziert und Verbesserungsmöglichkeiten entwickelt werden (Eigner und Stelzer 2009, S. 356 f. ; Dr. Kraus und Partner 2020). In abgewandelter Form beinhalten alle untersuchten Prozessanalysen die Schritte der Ist-Prozessaufnahme und -bewertung, Schwachstellenanalyse, sowie Sollzustandsentwicklung und -bewertung (Hetterscheid 2020, S. 133). Bei den analysierten Bewertungsansätzen liegt der Fokus bei der Soll-Prozessentwicklung auf der möglichst umfangreichen Implementierung von Industrie 4.0 (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 11 ff.). Die Abbildungen 25 und 26 zeigen deutlich, dass die Prozessanalysen, sofern vorhanden, stets am Anfang der Investitionsbewertung oder nach der Vorprüfungsphase an zweiter Stelle erfolgen. Mit der Einführung einer Prozessanalyse wird dem Anforderungskriterium 10 nach der Integration einer Methodik zur Prozessvisualisierung und -optimierung entsprochen.

Abgeleitet aus den analysierten Ansätzen zur Investitionsbewertung lassen sich zudem vier Schritte innerhalb einer Prozessanalyse definieren: Erfassung des Ist-Zustands, Bewertung des Ist-Zustands, Entwicklung des Soll-Zustands, Vergleich von Ist und Soll-Zustand. Da die klassische Prozessaufnahme den Anforderungen einer Analysemethodik für komplexe Industrie 4.0 Lösungen nicht genügt, findet eine Erweiterung um einen Daten- und Systembereich sowie einen Datenverwendungsbereich statt. Hierbei wird auf den Ansatz von Hartman et al. (2018), der sogenannten „Wertstromanalyse 4.0“ zurückgegriffen. Dieser fokussiert die informationstechnische Vernetzung der Prozesselemente sowie die Visualisierung digitaler Technologien (Hartmann et al. 2018, S. 393 f.). Dabei wird jedem Prozessschritt das zugehörige System oder Medium sowie die darin erfassten, verarbeiteten oder erzeugten Daten zugeordnet. Ferner findet im Bereich der Datenverwendung die Auflistung der Datennutzung je Prozessschritt statt (Hartmann et al. 2018, S. 396). Ziel hierbei ist es, im Rahmen der anschließenden Bewertung des Ist-Zustands bspw. Systembrüche und unnötig erfasste Daten zu identifizieren sowie die Grundlage für ein späteres Datenmodell zu schaffen (Volkman 2014, S. 58 f.).

### **3. Capability Analyse**

Das Anforderungskriterium 8 nach dem Beitrag zur Schaffung synchroner IT-Systemlandschaften inklusive Technologieauswahl ist in Bezug auf die Integrationsherausforderung von Industrie 4.0 (Bitkom 2016, S. 20) in insgesamt neun von dreiundzwanzig Ansätzen teilweise zu finden. Allerdings konnte hierbei festgestellt werden, dass eine Aufteilung des Anforderungskriteriums in zwei separate Bewertungsschritte vorzunehmen ist.

Beide Anforderungen nach den synchronen IT-Systemlandschaften und der Technologieauswahl können aufgrund der Komplexität der Einzelverfahren nicht in einem Bewertungsschritt realisiert werden. Auch die analysierten Bewertungsansätze zeigen, dass die beiden inhaltlich stark interdependenten Vorgänge prozessual getrennt betrachtet werden müssen. In der Detailanalyse weisen lediglich zwei Bewertungsansätze Methoden zur Schaffung synchroner IT-Systemlandschaften auf, wohingegen alle neun Bewertungsansätze Vorgehensmodelle zur Technologieauswahl beinhalten.

Eine der größten Fehlerquellen im Daten- und Systemmanagement ist eine asynchrone IT-Landschaft, wo relevante Informationen redundant oder fehlerhaft verwaltet werden (Ennemann und Rückert 2016, S. 27). Als Grundlage, um eine Industrie 4.0 Investition bewerten zu können, steht die Frage nach dem Vorhandensein einer bereits bestehenden und dokumentierten IT-Systemlandschaft im Unternehmen sowie dem zugehörigen Datenmodell im Mittelpunkt. Ziel hierbei ist die Vermeidung von kostenintensiven Investitionen (Ilin et al. 2021, S. 1) durch Doppel- oder Fehlentwicklungen sowie asynchronen Systemlandschaften (Lynn 2020). Nur der TVO Ansatz beschreibt eine Vorgehensweise zur Verknüpfung von fachlichen und informationstechnischen Anforderungen via Capabilities, die eine Zuordnung von Fachprozessen zu IT-Systemen ermöglicht und somit einen Abgleich der zu entwickelnden Lösung mit der bestehenden IT-Landschaft des Unternehmens erlaubt (Apfel und Smith 2003, S. 7 f.). Die verwendete Capability Analyse ist als Teilbereich des „Enterprise Architecture Management“ zu betrachten und ermöglicht durch die Verbindung von Fach- und IT-Prozessen architekturbezogene Entscheidungen (Korhonen und Halen 2017, S. 351; Ilin et al. 2021, S. 2). Im RBS Score ist diesbezüglich der Bewertungspunkt IT-Architektur integriert (Apfel und Smith 2003, S. 7 ff.). Im Rahmen eines Self Assessment umfasst der Ansatz von Stocker et al. (2019) einen detaillierten Fragenkatalog bzgl. Systemarchitektur, Technologieplattform und IT-seitiger Einordnung in das bestehende Environment und die Technologie Roadmap der Industrie 4.0 Lösung. Es wird beschrieben, dass die Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen stets von der Technologie aus betrachtet werden muss (Stocker et al. 2019, S. 500 f.).

Auf Basis der Ergebnisse des Abgleichs mit der IT-Systemlandschaft können anschließend funktionale und nicht-funktionale Anforderungen oder Prämissen an die Umsetzung formuliert werden. Insbesondere in Zeiten des Megatrends Digitalisierung, der vor Unternehmensgrenzen nicht Halt macht und die umfassende Umsetzung von Industrie 4.0 Lösungen vorantreibt (Leupold und Pirron 2018), rückt die Anforderung nach einer synchronen IT-Systembebauung zur gesamtheitlichen Kostenminimierung sowie effizienten Skalierbarkeit von entwickelten Lösungen (Ilin et al. 2021, S. 2) in den Fokus. Dies zeigt die Notwendigkeit eines solchen

Prozessschritts in einer ex-ante Bewertungssystematik auf. Abbildung 25 und 26 zeigen, dass ein solcher Bewertungsschritt bei nahezu allen relevanten Ansätzen in der ersten Hälfte des Gesamtbewertungsverfahrens verortet ist und häufig an eine Prozessanalyse anknüpft.

Da die Capability Analyse aus dem TVO Ansatz die Anforderungen an einen Bewertungsschritt zur Schaffung synchroner IT-Landschaften erfüllt und zudem als praxistauglich einzustufen ist (Aldea et al. 2019, S. 130), findet die Capability Analyse Eingang in die zu entwickelnde ex-ante Bewertungssystematik. Nach Aldea et al. (2019) sind Capability Analysen zudem als geeignetes Werkzeug zur Objektivierung und Detaillierung von Business Cases einzustufen (Aldea et al. 2019, S. 129). Ferner gewinnen „Enterprise Architecture Management Methoden“ im industriellen Umfeld aktuell an Bedeutung, um IT-Systemlandschaften systematisch zu planen (Kazem und Legner 2021, S. 1334).

#### **4. Technologiebewertung bzw. -auswahl**

Den zweiten Teil von Anforderungskriterium 8 nach einer Vorgehensweise zur Technologieauswahl weisen neun von dreiundzwanzig Bewertungsansätzen teilweise oder vollständig auf. Auch bei der Vorgehensweise zur Technologieauswahl ist kein standardisiertes Modell zu erkennen. Die Vorgehensmodelle sind hierbei breit gefächert. Da der Markt für Technologien und Services im Bereich der Digitalisierung stark gewachsen ist und vielfältige Möglichkeiten bietet, können passende Lösungen von unerfahrenen Projektleitern ohne lange Recherche nicht identifiziert werden (Vollmer 2020). An dieser Stelle kann eine Technologie-datenbank, wie im Bewertungsansatz von Günter et al. (2021) beschrieben, Anwendung finden (Günter et al. 2021, S. 9). Dabei werden dem Nutzer des Bewertungsansatzes sowohl passende Hardware als auch Softwarelösungen angeboten, die zum entsprechenden Use Case passen. Einen anderen Ansatz beschreibt Liebrecht, der einen morphologischen Kasten für die gezielte Methoden- und Technologieauswahl beinhaltet. Dem Anwender werden dabei unterschiedliche Auswahlmöglichkeiten für Industrie 4.0 Methoden oder Technologien inklusive einer steckbriefbasierten Detailbeschreibung bereitgestellt. Darüber hinaus beinhaltet der Ansatz eine systemgestützte Berechnungslogik zur Ermittlung der Implementierungsreihenfolge (Liebrecht 2020, S. 58 ff.). Der Ansatz von Schiffer und Autenrieth (2019) bietet dem Anwender bspw. ein systemgestütztes Auswahlcockpit mit insgesamt dreißig Technologien in sieben Kategorien an, die auf Basis von zuvor festgelegten Parametern entweder vollumfänglich oder in reduziertem Umfang ausgewählt werden können (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 101 ff.). Da die effiziente Technologieauswahl maßgeblich die finanziellen Entwicklungskosten von IT-Projekten beeinflussen (Hartmann 2016), ist ein solcher Prozessschritt in einen Bewertungsansatz zu integrieren.

Da diese Arbeit das Ziel verfolgt, einen allgemeingültigen ex-ante Bewertungsansatz für Industrie 4.0 in Produktion und Logistik zu entwickeln, kann auf die analysierten, teilweise systemgestützten Technologieauswahlprozesse via Technologie-, Soft- sowie Hardwarebibliotheken für spezifische Industrie 4.0 Technologien nicht zurückgegriffen werden. Es ist nicht der Schwerpunkt dieser Arbeit spezifische Bibliotheken aufzubauen. An dieser Stelle gilt es daher einen allgemeingültigen Ansatz zur Technologiebewertung und -auswahl in das zu entwickelnde Vorgehensmodell zu integrieren.

Diesen liefert Vollmer (2020) durch ein Vorgehensmodell in vier Schritten. Im ersten Schritt erfolgt die detaillierte Analyse des Industrie 4.0 Projektes mit dem Ziel, Bewertungskriterien für die Technologieauswahl zu definieren. Danach werden in Schritt zwei in Frage kommende Technologien und Services identifiziert, im Kontext der Industrie 4.0 Lösung betrachtet und auf Basis der festgelegten Kriterien bewertet. Schritt drei umfasst den Vergleich der bewerteten Technologien mit dem Ziel der eigentlichen Technologie-, Service- oder Plattformauswahl. In der abschließenden Implementierungsplanung können die Ressourcenbedarfe konkret ermittelt werden (Vollmer, 2020).

## **5. Kosten-/Nutzenanalyse**

In Bewertungsschritt 5 des Vorgehensmodells werden die Anforderungskriterien 3, 4, 5, 6 und 7 zusammengefasst, was die zentrale Bedeutung der Kosten-/Nutzenanalyse für den zu entwickelnden Bewertungsansatz zeigt. In Abbildung 25 und 26 ist zu erkennen, dass die Anforderungskriterien 3, 4, 5 und 6, sofern in den Bewertungsansätzen vorhanden, sehr häufig im gleichen Bewertungsschritt Berücksichtigung finden. Lediglich Anforderungskriterium 7 lässt sich gemäß dieser Logik nicht direkt in diesem Bewertungsschritt verorten. Jedoch lässt die Formulierung der Forschungsfrage keinen anderen Schluss zu, als die Forschungsergebnisse im Rahmen der Kosten-/Nutzenanalyse zu integrieren. Weiterhin ist auf den Abbildungen zu erkennen, dass die Kosten-/Nutzenanalyse in Bezug auf die Reihenfolge der Prozessschritte nicht eindeutig verortet werden kann. Im Mittelwert und in Abhängigkeit der relevanten Eingangsergebnisse der bereits vorgestellten Bewertungsschritte wird für den zu entwickelnden Bewertungsansatz Position fünf gewählt. Um der Bedeutung der Kosten-/Nutzenanalyse zu entsprechen, findet eine ausführliche und detaillierte Vorstellung der relevanten Verfahren statt. Alle Bewertungsansätze berücksichtigen quantitative Nutzenaspekte. Für die Berücksichtigung qualitativer Nutzenaspekte stehen häufig Kosten- und Nutzenbibliotheken zur Verfügung (Eigner und Stelzer 2009, S. 359 ff.), welche der operative Anwender als Auswahlunterstützung heranziehen kann. Die Vielfältigkeit der Lösungen ist hierbei hervorzuheben. So bietet der Ansatz von Obermeier (2015) lediglich den Hinweis, dass Nutzen

in Form einer Produktivitätssteigerung in Minuten auszuweisen ist (Obermeier, 2015, S. 489 f.). Im Vergleich dazu bietet der Ansatz zur ökonomischen Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen von Günther et al. (2021) einen Nutzenaspektkatalog mit sechsundzwanzig Auswahlmöglichkeiten in den Rubriken Flexibilität, Produktivität, Qualität und Wandlungsfähigkeit (Günther et al. 2021, S. 7). Auch der Ansatz von Stocker et al. (2019) stellt dem Nutzer insgesamt einundzwanzig KPIs zur Auswahl zur Verfügung, aus denen die projektspezifisch relevanten ausgewählt werden können (Stocker et al. 2019, S. 500 f.).

Da es häufig nicht möglich ist, Investitionen ausschließlich monetär zu bewerten, (Colbe und Witte 2018, S. 308) berücksichtigen zwanzig von dreiundzwanzig Bewertungsansätzen neben quantitativen Nutzenaspekten auch qualitative Nutzenaspekte. Die Herausforderung bei der Einbeziehung von qualitativen Nutzenaspekten beruht darauf, dass lediglich mit monetär messbaren Werten eine klassische Investitionsrechnung durchgeführt werden kann (Colbe und Witte 2018, S. 4). Da qualitative Aspekte nicht messbaren Nutzen beschreiben, müssen separate Bewertungsinstrumente wie bspw. die Nutzwertanalyse für die Berücksichtigung nicht-monetär messbarer Effekte zum Einsatz kommen (Laßmann et al. 2015, S. 313 f.). Der Ansatz von Schuh et al. (2018) umfasst eine Nutzwertanalyse zur vergleichenden Bewertung von nicht-monetären Effekten. In die abschließende Investitionsbewertung geht der Nutzwert im Rahmen einer Portfoliomatrix als Entscheidungskriterium ein (Schuh et al. 2018, S. 53). Vergleichbare Vorgehensweisen sind bspw. in den Ansätzen von Kirsch (Kirsch 2017, S. 6 f.) und in komplexerer Form via RBS-Index im Ansatz von Apfel und Smith (Apfel und Smith 2003, S. 7 f.) zu finden. Allen Ansätzen gemein ist jedoch die schlussendlich fehlende direkte monetäre Vergleichbarkeit von quantitativen und qualitativen Effekten.

Bei Colbe und Witte (2018) wird darauf verwiesen, dass eine Investition nicht nur monetär bewertbar ist, gleichzeitig wird aber auch beschrieben, dass nur monetäre Effekte in die Investitionsrechnung einbezogen werden können. Ähnlich beschreibt auch Kruschwitz und Lorenz (2019) die Situation. „Das Mittel [der Investitionsrechnung] beschränkt sich darauf, einen Teil der Informationen, nämlich die quantifizierbaren Daten, in angemessener Weise auszuwerten. Rechnen kann man nur mit Zahlen.“ (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 1) Daher können auch nur quantitative Nutzenaspekte in die Investitionsrechnung einbezogen werden. Die Berücksichtigung von qualitativen Nutzenaspekten muss stets außerhalb erfolgen (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 10), was in der Praxis dazu führt, dass diese Nutzenaspekte zwar genannt sind, jedoch nicht in die Gesamtkalkulation Einzug finden (Kofner 2016, S. 163). Unter den analysierten Bewertungsansätzen sind fünf Ansätze zu finden, die eine Quantifizierung und Monetarisierung von qualitativen Nutzenaspekten in Form von

Vorgehensmodellen beschreiben. Kesten und Schröder (2006 und 2009) verwenden in ihrem Ansatz den Begriff qualitative oder nicht-monetäre Effekte nicht. Vielmehr wird hervorgehoben, dass ausschließlich quantifizierbare und monetarisierbare Effekte zur Bewertung zu verwenden sind (Kesten und Schröder 2009, S. 6). Um dies zu erreichen verwenden Kesten und Schröder die Wirkkettenanalyse, deren Endergebnis stets eine Quantifizierung eines Effektes darstellt (Kesten und Schröder 2009, S. 7). Einer vergleichbaren Vorgehensweise bedient sich auch der Ansatz von Hettterscheid (2020), um qualitative Nutzenaspekte zu quantifizieren und anschließend zu monetarisieren (Hettterscheid 2020, S. 122 ff.). Der Ansatz von Günther et al. (2021) geht ebenfalls grundsätzlich davon aus, dass die Unterteilung in qualitative und quantitative Nutzenaspekte nicht existiert und das somit alle Effekte gleichermaßen messbar sind. Auf den Steckbriefen der identifizierten Nutzenaspekte sind mögliche KPIs hinterlegt. Zum einen sind nicht für alle Nutzenaspekte KPIs aufgeführt, zum anderen stammen die Daten aus den Selbsteinschätzungen der Projektleiter von nur drei Industrie 4.0 Lösungen (Günther et al. 2021, S. 1 ff.). Der Ansatz von Seiter et al. (2016) beschreibt die Nutzung der „Extended Performance Analysis“ zur Monetarisierung von nicht monetären, jedoch messbaren und nicht direkt quantifizierbaren Potenzialen (Seiter et al. 2016, S. 73 ff.). Am Umsetzungsbeispiel von Kaiser (2009) wird deutlich, dass die Monetarisierung der indirekten Potenziale über Ursache-/Wirkungsbeziehungen vorgenommen wird. Als Beispiel wird die Prozessqualität als nicht direkt quantifizierbares Potenzial aufgeführt, die zu einer Reduktion der Durchlaufzeit führt, die sich wiederum auf das Cluster Personalkosten auswirkt und somit monetarisierbar ist (Kaiser 2009, S. 1). Eine ex-ante Bewertungssystematik muss sich einer Kombination des Ansatzes von Hettterscheid, Günther et al., Kesten und Schröder, Eigner und Stelzer sowie Seiter et al. bedienen, um die nachhaltige Ermittlung aller quantitativen Nutzeneffekte sicherstellen zu können.

In diesem Abschnitt konnte sowohl aus theoretischer als auch praktischer Sicht die hohe Praxisakzeptanz der Wirkungskettenanalyse und des Monetarisierungsverfahrens sowie die daraus resultierende Eignung zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 nachgewiesen werden. Auf diese Weise lassen sich auch die Anforderungskriterien 3 und 5 erfüllen.

Eine Systematisierung der identifizierten Nutzenaspekte, wie in Anforderungskriterium 4 gefordert, ist allein aufgrund der Vielzahl der Möglichkeiten zu empfehlen, um dem Endanwender mehr Struktur bei der Nutzensauswahl bereitzustellen. In vierzehn der dreiundzwanzig Bewertungsansätze ist eine Systematisierungslogik integriert. Je nach Literaturquelle werden hierfür unterschiedliche Herangehensweisen genutzt. Schuh et al. (2018) verwenden eine Systematisierungslogik auf Basis von Unternehmensbereichen, denen

die Zielgrößen zugeordnet werden, in denen diese wirken (Schuh et al. 2018, S. 45 f.). Kesten und Schröder (2006 und 2009) systematisierten die relevanten Nutzenaspekte sowohl nach Wirkungsbereichen als auch nach der finanziellen Wirksamkeit der Einsparungen (Kesten und Schröder 2009, S. 8). Volkmann (2014) nutzt einen Systematisierungsansatz basierend auf den drei Bereich Leistung, Kosten und Zeit. Im Bereich der Kosten erfolgt eine weitere Systematisierung via Kostengruppen und -arten (Volkmann 2014, S. 72 ff.). Smith (2010) nutzt für die Systematisierung von einundvierzig „Business Value Aspekten“ im Rahmen des Gartner Business Value Models ein hierarchisches Drei-Stufen-Modell, welches aus „Business Aspects“, „Aggregate Matrics“ und „Prime Metrics“ besteht, um mehr Übersichtlichkeit zu schaffen (Smith 2010, S. 9). Liebrecht (2020) stellt sowohl für qualitative (strategische) (Liebrecht 2020, S. 79) als auch quantitative Nutzenaspekte (Liebrecht 2020, S. 84) systematisierte Kriterienkataloge bereit. Die Vorstellung der unterschiedlichen Systematisierungsmöglichkeiten zeigt, dass eine einheitliche Systematisierungslogik zwar nicht identifizierbar ist, jedoch die Notwendigkeit zur Systematisierung besteht. Daher lässt sich die Notwendigkeit zur Systematisierung als allgemeingültige Anforderung an einen Bewertungsansatz ableiten. An dieser Stelle werden die Forschungsergebnisse der Focus Group aus Kapitel 4.3 in den Modellrahmen integriert. Die Einteilung der Nutzenaspekte in Ergebnis- und Steuergrößen erfüllt das Anforderungskriterium nach einer generellen Systematisierungslogik, welche den Auswahlprozess effizienter gestaltet. Zudem kann der Systematisierungslogik aufgrund der Definition im Rahmen einer Focus Group eine umfassende Praxis-tauglichkeit beschieden werden.

Anforderungskriterium 6 nach dem Aufbau von Bibliotheken für Kosten- und Nutzenaspekte inklusive Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten erfüllen lediglich sechs der dreiundzwanzig analysierten Bewertungsansätze. Deuse et al. (2019) nutzen bspw. systemgestützte Nutzenbibliotheken in der verwendeten Simulationssoftware, in denen Quantifizierungsäquivalente hinterlegt sind (Deuse et al. 2019, S. 222). Allerdings sind hier nur quantitative Nutzenaspekte berücksichtigt und es findet keine Monetarisierung statt. Auch Westkämper et al. (2006), Schiffer und Autenrieth (2019) und das Gartner Business Framework bieten dem Modellanwender teilweise Kosten- und Nutzenbibliotheken zur Unterstützung der Kosten-/Nutzenanalyse einer Industrie 4.0, Digitalisierungs- oder IT-Lösung an (Westkämper et al. 2006 a, S. 106 f.; Smith 2010, S. 9; Schiffer und Autenrieth 2019, S. 83). An dieser Stelle findet die Integration der Forschungsergebnisse der Experteninterviews aus Kapitel 4.2 in den Modellrahmen statt. Die Verwendung von Steckbriefen mit den aggregierten Forschungsergebnissen je Kosten- bzw. Nutzenaspekt bietet dem operativen Endanwender eine effiziente

und praxistaugliche Unterstützung bei der Kosten-/Nutzenanalyse. Abschließend ist festzuhalten, dass die Integration von Bibliotheken für Kosten- und Nutzenaspekte dem allgemeinen Anforderungskriterium dieser Arbeit zur Maximierung der Praxistauglichkeit und Effizienz in Hinblick auf die Anwendung im operativen Umfeld zuträglich ist.

## **6. Risiko- und Unsicherheitsanalyse**

In Übereinstimmung mit der einschlägigen Fachliteratur zur Investitionsrechnung, berücksichtigen elf von dreiundzwanzig Bewertungsansätze das Anforderungskriterium 9 nach der Berücksichtigung von Projekt-risiken und Unsicherheiten im Projektverlauf (Colbe und Witte 2018, S. 255 ff. ; Poggensee 2016, S. 75 ff.).

Die Ansätze des Investitionsleitfadens und des Business Case-Kalkulators erfassen beim Nutzer die relevanten Risikofaktoren sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeit und geschätzten Auswirkungen und visualisieren den Risikoscore im Rahmen einer Risikoanalysegrafik (Brosa-Abut und Parlings 2017, S. 6). Beim TEI Ansatz werden auf Basis der Kosten-/Nutzenkalkulation pauschal geschätzte Prozentsätze zur Reduzierung bzw. Erhöhung der Kosten und Nutzen als Risikoszenarien herangezogen (CioWiki 2018). Kirazli (2017) bindet ebenfalls eine Risikoanalyse ein, bestehend aus Risikoursachen und Risikowirkungen, die in einer Design-Struktur-Matrix zusammengeführt werden, um die jeweiligen Abhängigkeiten zu visualisieren (Kirazli 2017, S. 173 f.). Kesten und Schröder (2009) nutzen für die Einbeziehung von Unsicherheit und Risiken die Erstellung von Szenarien für künftige Umweltzustände, für die Eintrittswahrscheinlichkeiten zu ermitteln sind. Neben dem initialen Umweltszenario, entstehen so ein weiteres pessimistisches und optimistisches Szenario. Im Mittelpunkt steht hierbei jedoch kein separater Risikoscore, sondern die direkte Auswirkung der Umweltzustände auf den Kapitalwert der Industrie 4.0 Investition (Kesten und Schröder 2009, S. 16 f. ; Eigner und Stelzer 2009, S. 373). Die Einbindung eines Bewertungsschrittes, um Risiko und Unsicherheit in einen ex-ante Bewertungsansatz für Industrie 4.0 Lösungen einzubeziehen, ergibt sich zwingend sowohl aus Erkenntnissen der allgemeinen Investitionsrechnungsliteratur als auch aus der Analyse bestehender Bewertungsansätze.

Die Auswahl der geeigneten Verfahren für eine Risiko- und Unsicherheitsanalyse basiert auf deren Praxistauglichkeit. Diese wird nach Kesten et al. (2006) maßgeblich durch die Methodenkomplexität bestimmt, da diese im praktischen Umfeld die Akzeptanz der Nutzer beeinflusst. Auf dieser Basis wurden die vorgestellten Methoden in Abbildung 28 in Anlehnung an Kesten et al. (2006) miteinander verglichen. Endanwender wollen nicht erst zeit- und kostenintensive Datenbeschaffungsprozesse einleiten, die dann subjektive Wahrscheinlichkeitswerte oder -verteilungen zum Ergebnis haben, die lediglich eine Scheingenauigkeit

erzeugen (Kesten et al. 2006, S. 23). „Das wirtschaftliche Umfeld ist extrem ungewiss geworden. [...] Wir kennen nicht mehr alle Ereignisse, die auftreten können, und erst recht nicht ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten“ (Schwenker 2021, S. 70).

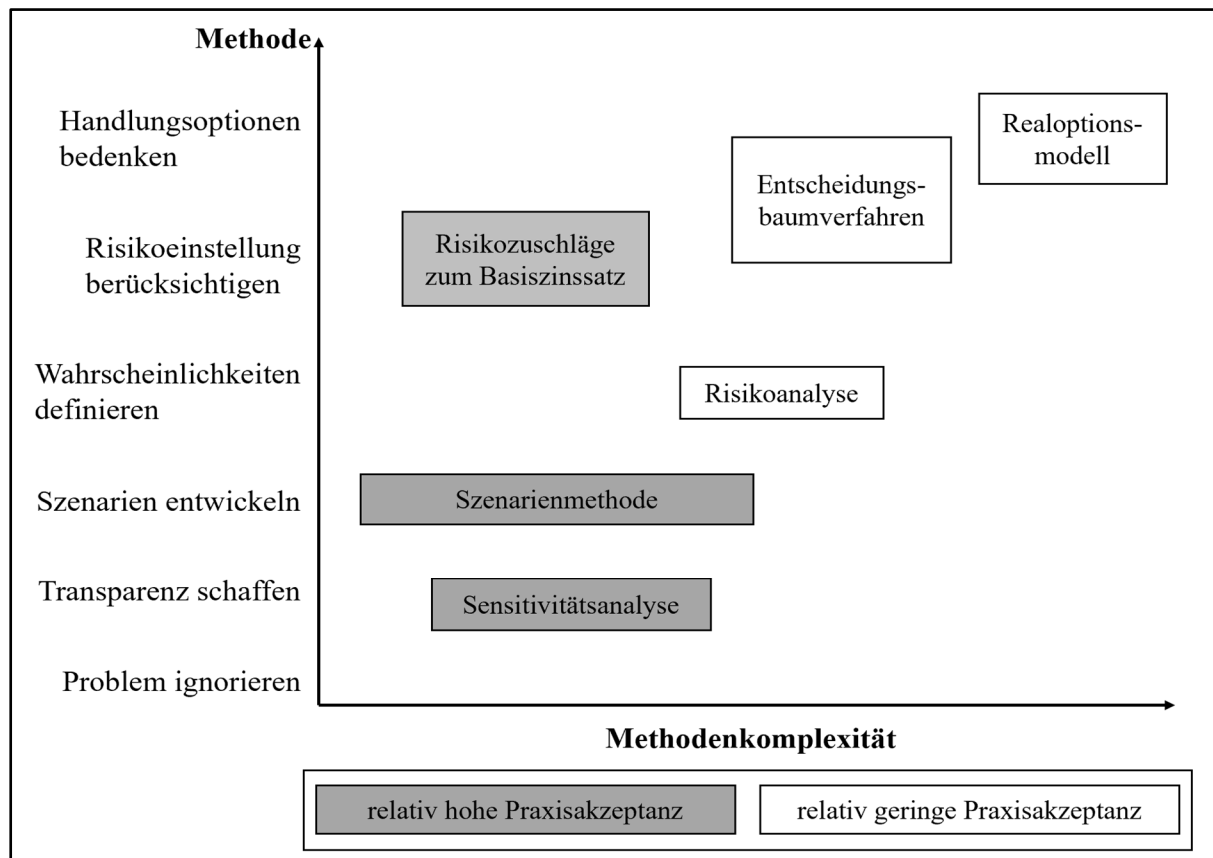


Abbildung 28: Praxisakzeptanz der Verfahren zur Berücksichtigung von Unsicherheit nach Kesten et al. (Kesten et al. 2006, S. 23)

Bei der Gegenüberstellung konnten das Korrekturverfahren, die Szenario-Rechnung bzw. Szenariomethode sowie die Elemente der Sensitivitätsanalyse als relativ praxistauglich eingestuft werden. Im Gegensatz dazu ergab die Analyse eine geringe Praxisakzeptanz bei der Risikoanalyse, dem Realoptionsmodell und dem Entscheidungsbaumverfahren (Kesten et al. 2006, S. 23).

Gemäß dem Ansatz zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von IT-Investitionen nach Kesten et al. (2006) und dem Beitrag von Eigner und Stelzer (2009) zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von PLM-Systemen ist schlussendlich die Szenariomethode als die im praktischen Umfeld am vordringlichsten einzusetzende Methode einzustufen, da die Endanwenderakzeptanz von allen vorgestellten Ansätzen am höchsten ist. Insbesondere das Top-Management hat großes Interesse an Analysen, die finanzielle Auswirkungen zum positiven wie negativen plakativ darstellen (Kesten et al. 2006, S. 31; Eigner und Stelzer 2009, S. 373). Zudem erlebt die Szenariomethode aktuell eine breite Renaissance im betrieblichen Umfeld (Schwenker 2021,

S. 72; Mankins und Gottfredson 2022, S. 21 f). Aus diesem Grund findet die Szenarienanalyse Einzug in den Bereich der Risiko- und Unsicherheitsanalyse des zu entwickelnden Ansatzes zur Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen und erfüllt somit Anforderungskriterium 9.

Um die Risiko- und Unsicherheitsanalyse zu vereinfachen und durch die zeitaufwändige Definition von künftigen Umweltzuständen sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten keine Scheingenauigkeit zu erzeugen, ist zur Ermittlung des finanziellen Einflusses künftiger Szenarien eine prozentuale Reduzierung oder Erhöhung der Kosten bzw. Nutzen anzuwenden.

## **7. Investitionsbewertung**

Nahezu homogen über zweiundzwanzig von dreiundzwanzig analysierte Ansätze ist ein abschließender Bewertungsschritt integriert, in welchem die Bewertungsergebnisse zusammengeführt und Auswertungen durchgeführt werden.

Da Investitionen für Industrie 4.0 Projekte im betrieblichen Umfeld einen endlichen Planungszeitraum aufweisen, stellt sich die Frage nach der Investitionsfolge auf Basis von Zeitreihenanalysen im abschließenden Bewertungsschritt (Kruschwitz und Lorenz, 2019, S. 182 f.; Mascarella 2005, S. 82 und 107). Insgesamt berücksichtigen sechzehn der dreiundzwanzig Bewertungsansätze detaillierte Zeitreihenkalkulationen. Dreizehn der dreiundzwanzig Ansätze verwenden eine einfache Auflistung der Kosten- und Nutzenverläufe in Jahresscheiben über die gesamte Projektlaufzeit. Diese Verlaufskurven sind für die Ermittlung der Amortisationsdauer und des „Break Even Point“ von Bedeutung (Eigner und Stelzer 2009, S. 365 ; Aunkofer 2008). Für einen ex-ante Bewertungsansatz für Industrie 4.0 Investitionen zur Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit ist die Verwendung der vergleichsweise einfachen Kosten- und Nutzenverlaufskurven über die Projektlaufzeit aufgrund der hohen Praxistauglichkeit als ausreichend einzustufen (Schuh et al. 2018, S. 52 ff.). Bei den abschließenden Investitionsbewertungsverfahren reicht die Spanne der Inhalte des letzten Bewertungsschrittes von einer einfachen Darstellung der Kosten- und Nutzenverläufe sowie der Risikoanalyse (Brosa-Abut 2017; Brosa-Abut und Parlings 2017) bis hin zur Kalkulation von relevanten statischen oder dynamischen Investitionskennzahlen.

Schuh et al. (2018) verwenden bspw. die Amortisationsdauer als einzige Kennzahl (Schuh et al. 2018, S. 43 f.), wohingegen Kesten und Schröder (2009) neben der Amortisationsdauer noch Barwerte, Ertragswerte, Kapitalwerte und Annuitäten ermitteln (Kesten und Schröder 2009, S. 34). Da in diesem Punkt keine Einigkeit bei der zu empfehlenden Vorgehensweise auf Basis der aktuellen Bewertungsansätze für den abschließenden Bewertungsschritt herrscht, wird auf die Analyse der Praxistauglichkeit der Verfahren und

Kennzahlen zur Investitionsbewertung auf Basis der Fachliteratur zur Investitionsbewertung zurückgegriffen.

Angelehnt an die Vorgehensweise zur Ermittlung der Praxisakzeptanz der Investitionsrechenverfahren nach Kesten et al. (2006) wird zur Bewertung der Praxisakzeptanz der Investitionsrechenverfahren eine vergleichbare Logik angewendet, die auf der Anforderung zur Identifizierung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Investition und der Praxistauglichkeit des jeweiligen Verfahrens beruht. Bei der Vorstellung der einzelnen Verfahren zur statischen und dynamischen Investitionsrechnung in Kapitel 2.4 wurde gemäß der Literatureinschätzungen bereits auf die Methodenkomplexität und Praxisrelevanz sowie die Verbreitung des jeweiligen Verfahrens in der Praxis eingegangen, sodass sich die Zusammenführung der Erkenntnisse in Abbildung 29 wie folgt ergibt.

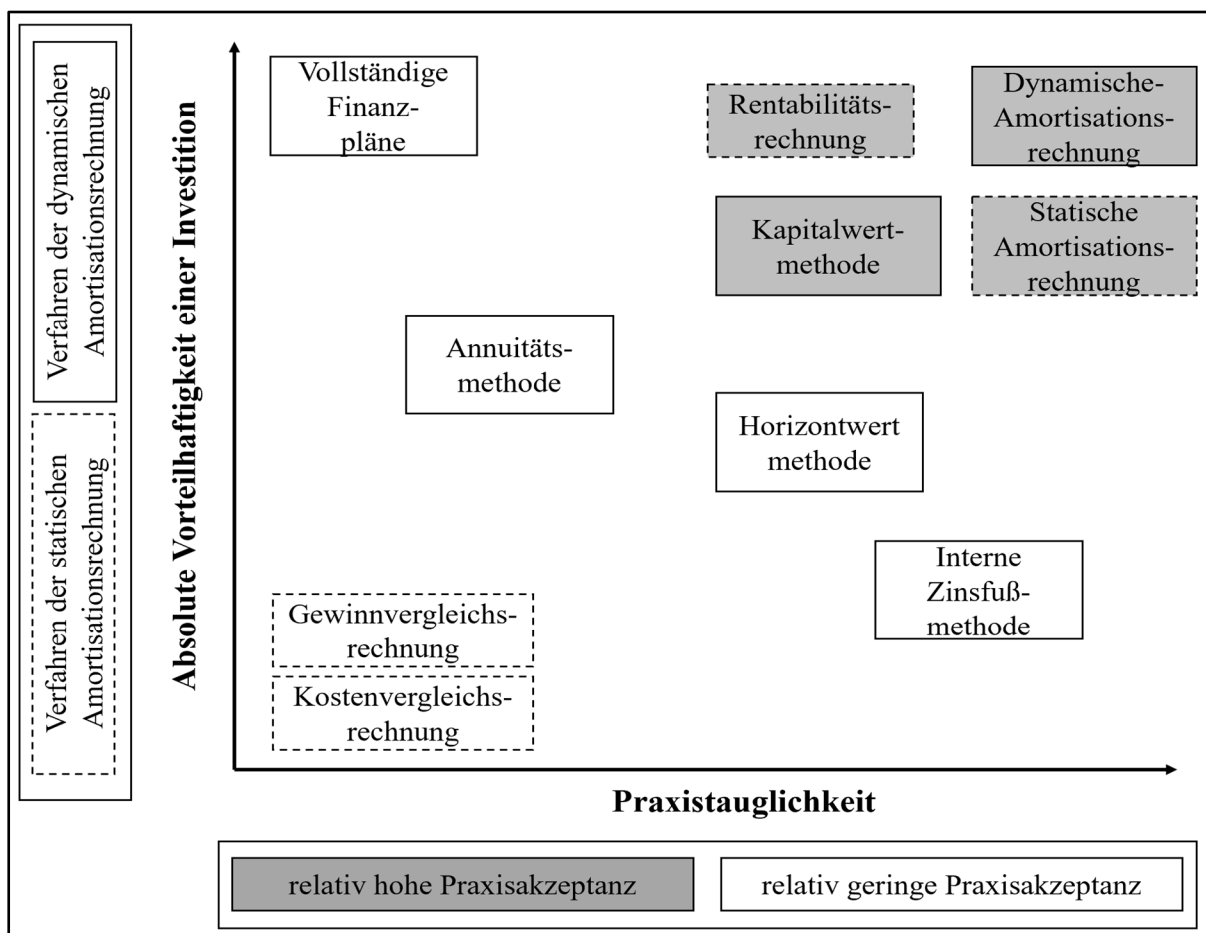


Abbildung 29: Praxistauglichkeit der Verfahren zur statischen und dynamischen Investitionsrechnung

Es zeigt sich, dass von den insgesamt zehn vorgestellten Verfahren vier sowohl zur Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer Investition verwendbar sind als auch eine hohe Praxistauglichkeit aufweisen, sodass die Praxisakzeptanz dieser Verfahren als hoch einzustufen

ist. Von den vier Verfahren stammen zwei aus der statischen und zwei aus der dynamischen Investitionsrechnung:

- Statische Amortisationsrechnung
- Rentabilitätsrechnung
- Dynamische Amortisationsrechnung
- Kapitalwertmethode

Die Gewinn- und Kostenvergleichsrechnung werden zur Ermittlung der relativen Vorteilhaftigkeit von Investitionen verwendet und erfüllen somit die Kernanforderung dieser Arbeit nicht. Die Horizontwert- und interne Zinsfußmethode sind, wenngleich praxistauglich, auch nur eingeschränkt zur Ermittlung der absoluten Vorteilhaftigkeit von Investitionen zu verwenden. Vollständige Finanzpläne und Annuitätsrechnungen weisen durch die hohe Komplexität eine geringe Praxistauglichkeit auf und führen daher zu einer geringen Praxisakzeptanz. Durch die Integration der vier geeigneten Investitionsrechenverfahren ist Anforderungskriterium 12 erfüllt.

Anforderungskriterium 1 nach der Gültigkeit des zu entwickelnden Vorgehensmodells zur ex-ante Investitionsbewertung für Industrie 4.0 Lösungen in den Bereichen Produktion und Logistik wird durch zwei Forschungs- und Analyseelemente sichergestellt. Zum einen stammt die analysierte Fachliteratur und die identifizierten Bewertungsansätze schwerpunktmäßig aus den Bereichen Produktion und Logistik. Zum anderen sind in die empirische Forschung und die Beantwortung der Forschungsfragen 1, 2, 3 und 4 nur Praxisprojekte und Fachexperten aus den Bereichen Produktion und Logistik einbezogen worden, um diesem Anforderungskriterium zu entsprechen.

Anforderungskriterium 2 nach einer praxistauglichen, strukturierten Vorgehensweise wird durch den definierten sieben-stufigen Modellrahmen sowie der konsequenten Methoden- und Verfahrensauswahl unter Praktikabilitäts Gesichtspunkten sichergestellt. Dem operativen Anwender wird dadurch ein Vorgehensmodell zur Verfügung gestellt, welches eine schrittweise gestützte Bewertung einer Industrie 4.0 Investition ermöglicht.

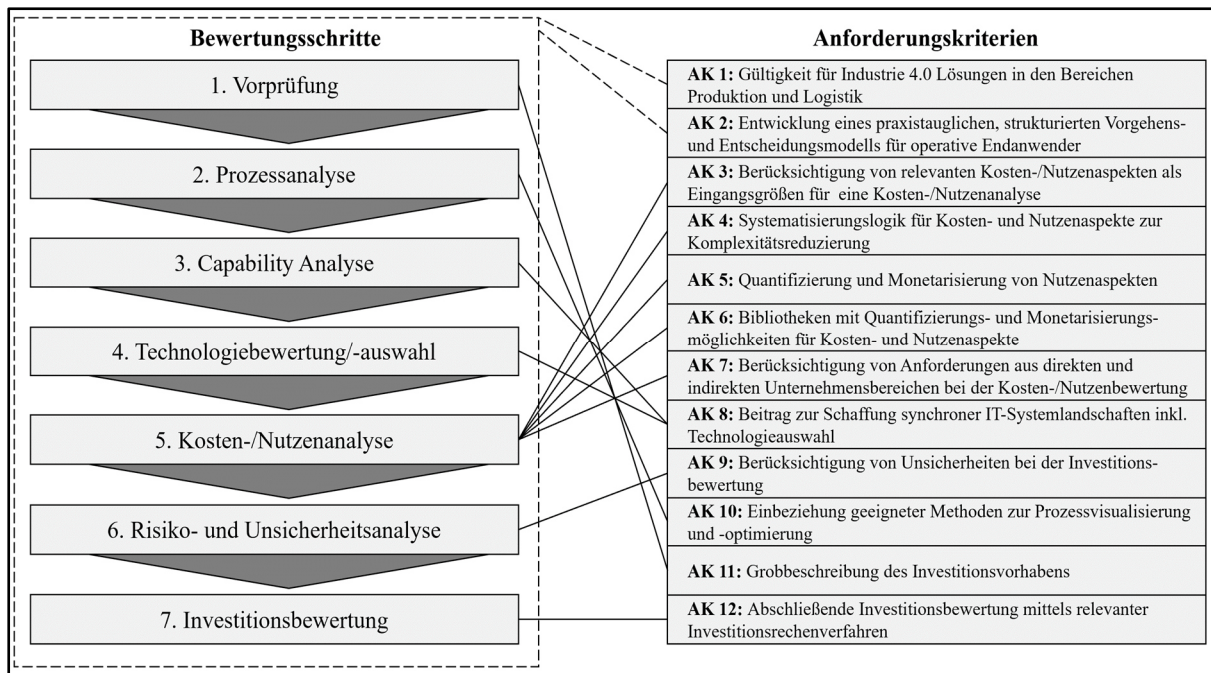


Abbildung 30: Abgleich des Modellrahmens mit den definierten Anforderungskriterien

Abbildung 30 gibt einen Überblick darüber, welche Anforderungskriterien von den definierten Bewertungsschritten abgedeckt sind. Hierbei wird deutlich, dass alle relevanten Anforderungen erfüllt sind. Anforderungskriterium 1 und 2 sind genereller Natur und somit keinem konkreten Bewertungsschritt zugeordnet.

#### 4.5 Detailvorstellung der ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik

Auf Basis der identifizierten Bewertungsschritte sowie der relevanten Verfahren aus Kapitel 4.4 wird in diesem Kapitel der entwickelte Ansatz zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik methodisch ausgestaltet und jeder Bewertungsschritt detailliert beschrieben, sodass in Kapitel 5 die Validierung anhand von Praxisprojekten erfolgen kann. Die entwickelte Bewertungssystematik in sieben Schritten ist in Abbildung 31 dargestellt.

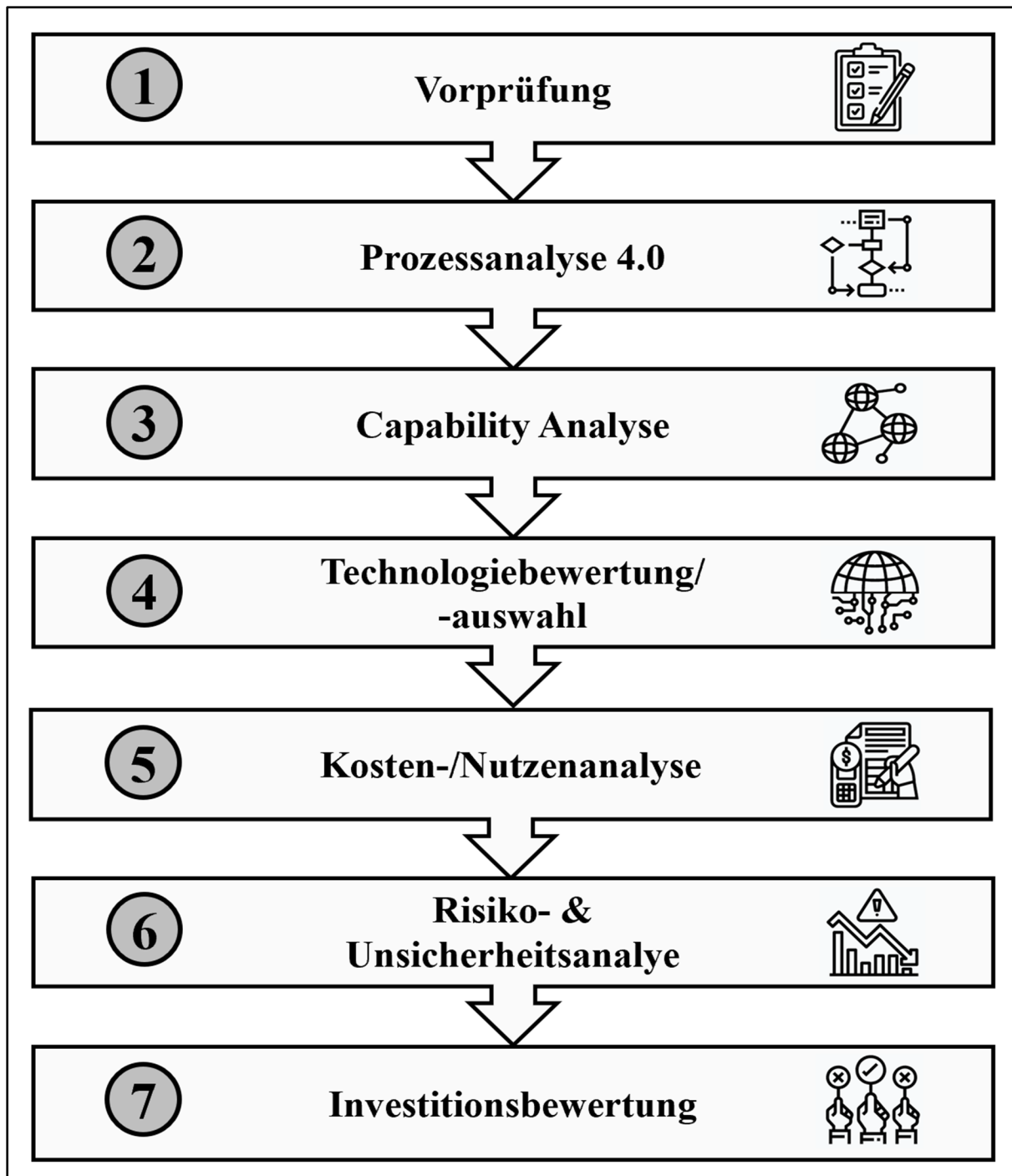


Abbildung 31: Vorgehensweise zur ex-ante Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik

#### 4.5.1 Schritt 1: Vorprüfung

Im initialen Prozessschritt der Vorprüfung werden die wichtigsten Informationen des zu bewertenden Industrie 4.0 Projektes grob zusammengetragen. Dies soll sicherstellen, dass die notwendigen Grundüberlegungen hinsichtlich Ziel, Ergebnis und Nutzen des Investitionsvorhabens durchgeführt wurden und somit im Projektvorhaben ein gewisser Reifegrad durch ein einheitliches Verständnis zwischen den beteiligten Prozesspartnern erreicht ist (Stocker et al. 2019, S. 499; Schuh et al. 2018, S. 40 f.). Hierbei bleiben die Beschreibungen

stets auf einem allgemeinen Niveau und sind an die Inhalte der folgenden Bewertungsschritte angelehnt. Häufig zeigen unvollständige oder fehlerhafte Steckbriefe für komplexe Industrie 4.0 Lösungen, dass ein Projekt nicht genügend analysiert oder die Umsetzung ungenügend durchdacht ist, ausreichender Rückhalt in den Fachbereichen fehlt oder nicht alle architektonischen Rahmenbedingungen geklärt wurden (Schuh et al. 2018, S. 42). Ferner ist eine standardisierte Groberfassung für ein übergeordnetes Portfoliomanagement von Bedeutung, welches jedoch gesondert zu betrachten ist. Die Grundelemente eines Steckbriefs in der Phase der Vorprüfung orientieren sich am Ansatz von Schuh et al. (2018):

### **1. Projekttitle:**

Hier wird lediglich der Name der umzusetzenden Industrie 4.0 Lösung aufgeführt. Idealerweise werden anstelle von uneindeutigen Bezeichnungen Abkürzungen in Form von Akronymen verwendet, um überlange Namen zu vermeiden.

### **2. Problemstellung:**

In diesem Punkt geht es darum, die Ausgangssituation und die technologischen, prozessualen oder methodischen Schwachstellen zu beschreiben, welche dazu führen, dass eine Optimierung notwendig ist. Je detaillierter diese Beschreibung ist und je mehr Zahlen, Daten und Fakten herangezogen werden können, umso leichter fällt der spätere Vergleich zwischen Ist-Zustand und Soll-Zustand (Schuh et al. 2018, S. 42). Zudem gilt es den Untersuchungsbereich abzugrenzen, um den Fokus bei der Optimierung zu wahren (Kirsch 2017, S. 2 f.).

### **3. Zielstellung**

An dieser Stelle erfolgt die Beschreibung des Soll-Zustands. Was soll mit der Implementierung der Industrie 4.0 Lösung im Detail erreicht werden und was sind die Benefits für die Organisation oder den Prozess? Auch hier ist es wichtig, dass mit Zahlen, Daten und Fakten möglichst konkret aufgezeigt werden kann, welche Optimierungen erzielt werden sollen (Schuh et al. 2018, S. 42).

### **4. Nutzerkreis und Zielgruppe**

Wer ist der Endanwender der zu implementierenden Lösung? Welche Fachbereiche sind bspw. bei der Datenbereitstellung oder dem späteren Betrieb der Software eingebunden? Hierbei ist es ratsam, sich intensiv Gedanken zu machen, dies mit den identifizierten Stakeholdern abzustimmen und strukturiert darzustellen.

Da Industrie 4.0 Lösungen komplexe IT-Systeme darstellen, ist es nicht unüblich, dass eine Vielzahl an Fachbereichen involviert werden muss (Volkman 2014, S. 58 f.; Mascarella, 2005, S. 24 ff.).

### **5. Zeitschiene und Meilensteine**

Zu einem Projektsteckbrief gehört auch die Darstellung des zeitlichen Projektablaufs mit den benötigten internen und externen Ressourcen sowie den geplanten Liefer- oder Implementierungsstufen. Erfahrungsgemäß treten hier große Schwierigkeiten auf. In aller Regel betreten komplexe Industrie 4.0 Lösungen auf der technischen, aber auch auf der organisatorischen Ebene, absolutes Neuland, was dazu führt, dass keine Erfahrungswerte aus vergleichbaren Projekten vorliegen (Ematinger 2018, S. 9 ff.). Dies führt wiederum dazu, dass mittelfristige oder langfristige Projektplanungen über drei bis fünf Jahre in dieser Phase nur nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt werden können und wenig belastbar sind (Schuh et al. 2018, S. 42).

### **6. Kosten/Nutzen Schätzung**

Eben aus diesem Grund sind die Kosten/Nutzen Kalkulationen in diesem Stadium der Bewertung ebenfalls wenig belastbar. Projektleiter können oftmals die Nutzenaspekte ihrer Industrie 4.0 Lösung nur rudimentär benennen und quantifizieren (Regelmann 2019, S. 46). Es wird häufig auf bewährte Kennzahlen und Nutzenaspekte sowie auf die klassische Einteilung der Nutzenaspekte in qualitativ und quantitativ zurückgegriffen, wodurch nicht alle positiven Effekte ermittelbar sind. Um jedoch eine grundlegende Wirtschaftlichkeit nachweisen zu können, die eine intensivere Analyse rechtfertigt, ist es an dieser Stelle bereits zwingend erforderlich, eine erste Kosten-/Nutzenkalkulation auf Basis der vorhandenen Informationen und Erfahrungen aufzubauen (Schuh et al. 2018, S. 42 f.), die dann im weiteren Verlauf der Bewertung verfeinert werden kann.

### **7. IT-Systemanalyse**

Die Auswertungen der Interviews aus dieser Arbeit zeigen, dass Industrie 4.0 Lösungen auch stets IT-Projekte sind und die Implementierung neuer Prozesse, Services oder Systeme zum Ziel haben. Um zum einen sicherstellen zu können, dass keine doppelten Lösungen entwickelt werden und zum anderen Synergien aus vorhandenen Lösungen für neue Lösungen nutzen zu können, ist eine grobe Analyse der bekannten Systemlandschaft notwendig (Schuh et al. 2018, S. 42; Ilin et al. 2021, S. 2). Hierbei gilt es grob darzustellen, an welcher Stelle die zu implementierende Industrie 4.0 Lösung integriert werden soll und welche Abhängigkeiten und Schnittstellen zu anderen Systemen bestehen.

## **8. Prämissen und Annahmen**

Da bei Planungshorizonten von oftmals drei bis fünf Jahren vielfältige Interdependenzen zu anderen Projekten innerhalb der Organisation bestehen, kann es vorkommen, dass Aufwand und Nutzen auf Prämissen und Annahmen basieren, die es in diesem Abschnitt dezidiert zu beschreiben gilt. Ebenfalls ist aufzuzeigen, welche Auswirkungen ein Wegfall einzelner Prämissen oder Annahmen für den Projekterfolg hat (Volkman 2014, S. 103 f.).

Die hier aufgeführten acht Grundelemente einer Vorprüfung können je nach Unternehmen und Branche beliebig erweitert oder reduziert werden. Hierbei gilt jedoch das Motto: „So viele wie nötig, aber so wenige wie möglich“, da es in dieser Phase einen unverhältnismäßig großen Aufwand zu verhindern gilt, welcher schnell eine Scheingenauigkeit der Inhalte und Ergebnisse erzeugt.

### 4.5.2 Schritt 2: Prozessanalyse 4.0

Analog einer Vielzahl von Bewertungsansätzen bildet eine strukturierte Prozessanalyse mittel Prozessablaufdiagrammen in Form von Swimlane-Diagrammen die Grundlage für eine möglichst umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Obermeier 2015, S. 486; Kirsch 2017, S. 2; Kirazli 2017, S. 107). Je nach Literaturquelle werden unterschiedlich viele Schritte innerhalb einer solchen Prozessanalyse durchgeführt. Bei einer klassischen Prozessanalyse jedoch nur vier Schritte notwendig (Becker 2018, S. 145 ff.; Schwegmann und Laske 2012, S. 165 ff.; Speck und Schnetgöke 2012, S. 195 ff.):

1. Erfassung des Ist-Zustands
2. Bewertung des Ist-Zustands
3. Entwicklung des Soll-Zustands
4. Vergleich von Ist und Soll-Zustand

#### **1. Erfassung des Ist-Zustands**

„Detaillierte Dokumentationen der Ist-Prozesse [...] sind das Grundgerüst für sämtliche inhaltliche Ausarbeitungen“ (Besemann et al. 2021, S. 6). In dieser Phase wird der zu betrachtende Fachprozess in Form eines Prozessablaufdiagramms visualisiert, was die Grundlage der späteren Schwachstellenanalyse darstellt (Schwegmann und Laske 2012, S. 165 f.). Häufig taucht in der Praxis hierfür auch der Begriff Swimlane-Diagramm auf, da die einzelnen Schwimmbahnen den Verantwortungsbereich einer Funktionseinheit oder Abteilung beschreiben (Microsoft 2019). Als Grundvoraussetzung für die Visualisierung müssen zuerst

die Problembereiche sowie deren Prozessgrenzen in Form von Start und Endpunkten gesetzt werden (Schwegmann und Laske 2012, S. 169 f.). Dies dient dazu, den Fokus bei der Analyse zu wahren (Koch und Geissbauer 2014, S. 64 f.). Im Anschluss erfolgen die Auflistung der Prozessbeteiligten sowie die Dokumentation der einzelnen Prozessschritte. Diese werden den einzelnen Verantwortungsbereichen bzw. „Swimlanes“ zugeordnet und visualisieren so den Prozessverlauf (Kirazli 2017, S. 141). Bei der Prozessaufnahme ist es von zentraler Bedeutung, dass alle Prozessexperten involviert sind, um alle relevanten Prozessdetails und Blickwinkel erfassen und abbilden zu können (Schwegmann und Laske 2012, S. 177; Besemann et al. 2021, S. 6).

Da die klassische Prozessaufnahme den Anforderungen einer Analysemethodik für komplexe Industrie 4.0 Lösungen nicht genügt, findet eine Erweiterung um einen Daten- und Systembereich sowie einen Datenverwendungsbereich statt (Hartmann et al. 2018, S. 393 f.). Dabei wird jedem Prozessschritt das zugehörige System oder Medium sowie die darin erfassten, verarbeiteten oder erzeugten Daten zugeordnet. Ferner findet im Bereich der Datenverwendung die Auflistung der Datennutzung je Prozessschritt statt (Hartmann et al. 2018, S. 396). Ziel hierbei ist es, im Rahmen der anschließenden Bewertung des Ist-Zustands bspw. Systembrüche und unnötig erfasste Daten zu identifizieren sowie die Grundlage für ein späteres Datenmodell zu schaffen (Volkman 2014, S. 58 f.). Abbildung 32 zeigt die schematische Darstellung einer Prozessanalyse 4.0.

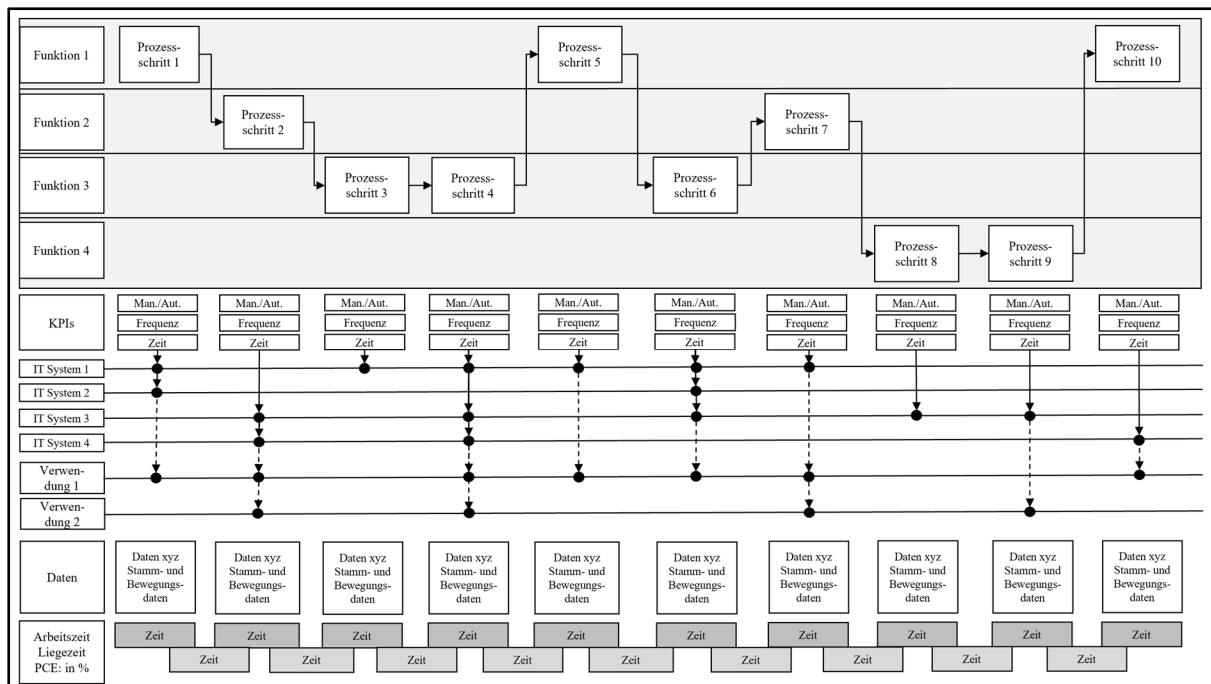


Abbildung 32: Schematische Darstellung einer Prozessanalyse 4.0

Die zu erfassenden Kennzahlen im Rahmen der Ist-Prozessaufnahme werden ebenfalls erweitert. Neben den klassischen Mengen- und Zeitgerüsten (Schwegmann und Laske, 2012, S. 176) wie bspw. der Prozesskennzahlen Bearbeitungs- respektive Arbeitszeit und Liegezeit, die unter der Rubrik Durchlaufzeit zusammengefasst werden, erfolgt die Dokumentation der Prozessschrittfrequenz als neuer KPI (Hartmann et al. 2018, S. 396).

Um eine Grundlage für die anschließende Capability Analyse zu legen, können die einzelnen Prozessschritte den jeweiligen Fähigkeiten bereits hier zugeordnet werden. Je nach Komplexität des zu analysierenden Prozesses können nur eine oder gleich mehrere Fähigkeiten betroffen sein. Eine detaillierte Beschreibung der Capability Analyse ist in Kapitel 4.5.3 zu finden.

Die Erweiterung der Prozessaufnahmemethodik um die Bereiche Daten und Systeme bringt einen Mehraufwand in der Vorbereitung und Durchführung mit sich. Dieser ist jedoch notwendig, um eine gesamtheitliche Analyse- und Bewertungsgrundlage für die anstehende Soll-Zustandsentwicklung einer Industrie 4.0 Lösung zu schaffen. Hauptgrund hierfür sind die Komplexität und der lange Entwicklungshorizont von Industrie 4.0 Lösungen, die zu einer Vielzahl an Unvorhersehbarkeiten führen (Fallenbeck und Eckert 2014, S. 431). Fehler im Aufnahmeprozess können insbesondere durch den langwierigen Aufbau und die ressourcenintensive Implementierung von Industrie 4.0 und Digitalisierungslösungen weitreichende Auswirkungen haben (Grimme 2015, S. 3) und sind daher zu vermeiden.

## **2. Bewertung des Ist-Zustands**

Nachdem der Ist-Zustand gesamtheitlich visualisiert ist, können nun die Schwachstellen identifiziert und gezielt Optimierungen erarbeitet werden (Schwegmann und Laske 2012, S. 182 f.). Auch in diesen Prozessschritt sind alle Prozessbeteiligten zu involvieren, um eine möglichst optimale Schwachstellen- und Lösungsfindung sicherstellen zu können (Kirazli 2017, S. 139). Schwachstellen können sein: überflüssige Prozesse, hohe Durchlaufzeiten, ineffiziente innerbetriebliche Schnittstellen, Doppelarbeit, unklare Aufgaben- und Verantwortungsbereiche (Schwegmann und Laske 2012, S. 184 f.).

Der visualisierte Ist-Ablauf bietet allen Prozesspartnern einen transparenten Blick auf den Gesamtprozess. Bei komplexen, IT-lastigen und abteilungsübergreifenden Prozessen, bei denen jeder Prozessbeteiligte oftmals nur Teilbereiche des Gesamtprozesses überblickt, führt diese übergreifende Transparenz zu neuen Diskussions- und Lösungsansätzen (Fürermann 2014, S. 54).

Die systematische Visualisierung des Ist-Zustands erleichtert zudem die Schwachstellenidentifikation. Wechselnde Prozessverantwortlichkeiten, parallele Doppelarbeiten, Medien- und Systembrüche, unnötig erhobene und nicht wieder verwendete Daten sowie Ursachen für

die Behinderung des Informationsflusses können leicht identifiziert werden (Hartmann et al. 2018, S. 395; Schwegmann und Laske 2012, S. 183). Zudem bietet die Datenanalyse einen detaillierten Einblick in die innerprozessuale Datenobjektstruktur. Diese ist als Grundlage für die Überführung von manuellen in elektronische Industrie 4.0 Prozesse unverzichtbar.

Ebenfalls Bestandteil dieses Prozessschritts ist die Entwicklung von Lösungsansätzen in Bezug auf die teilweise oder vollständige Digitalisierung des aufgenommenen Fachprozesses (Hartmann et al. 2018, S. 394). Hierbei kann internes und externes Benchmarking den Prozess unterstützen (Schwegmann und Laske 2012, S. 188 f.). Bezüglich des Zielzustands bestehen oftmals konkrete Vorstellungen des Fachbereiches, wie die finale Industrie 4.0 Lösung strukturiert und umgesetzt werden soll. An dieser Stelle ist die Einbindung von Digitalisierungsexperten aus dem jeweiligen Fachbereich oder der Fachdisziplin empfehlenswert, die einen gesamtheitlichen Blick auf die IT-Systemwelt vorweisen können, um möglichst realistische Lösungen zu entwickeln.

### **3. Entwicklung des Soll-Zustands**

Auf Basis der erarbeiteten Optimierungen, jedoch stets unter Berücksichtigung der Unternehmensziele (Speck und Schnetgöke 2012, S. 212), findet die Erstellung des zukünftigen Prozesses in Form eines Prozessablaufdiagramms statt (Speck und Schnetgöke 2012, S. 195). Dabei gilt es im ersten Schritt einen idealisierten, jedoch nicht gänzlich unrealistischen Soll-Zustand zu entwickeln, der sich dadurch auszeichnet, dass größere prozessuale, technische oder strukturelle Änderungen vorgenommen werden müssen und ein mittel- bis langfristiger Umsetzungshorizont besteht (Kamiske 2009, S. 313 f.). Im weiteren Verlauf erfolgt die Ableitung eines innerhalb von sechs Monaten erreichbaren Soll-Prozesses mit möglichst wenigen Restriktionen. Die Erstellung eines zeitlich getakteten Stufenplans zur schrittweisen Erreichung des idealisierten Soll-Zustands ist ebenfalls eine weitverbreitete Praxis. Damit können idealisierte Soll-Zustände auch als Leitbild bzw. Grundlage für weitere Prozessoptimierungen verwendet werden (Speck und Schnetgöke 2012, S. 218 ff.).

Im Kontext der Entwicklung von Industrie 4.0 Lösungen, liegt der Fokus des Soll-Prozesses auf der möglichst umfangreichen Digitalisierung des Fachprozesses. Demzufolge gilt es manuelle und papierbasierte Prozessschritte zu eliminieren (Hartmann et al. 2018, S. 394). Hierzu hilft die im ersten Prozessschritt erläuterte Erweiterung der Prozessvisualisierung um die Bereiche Daten und Systeme. Mit deren Hilfe ist es möglich, ein durchgängiges, applikationsgestütztes Datenhandling ohne Systembrüche und Doppelarbeiten mit automatisierten Schnittstellen zu angrenzenden Prozessen aufzubauen.

Wie bei der Aufnahme des Ist-Zustands, ist abschließend die Erfassung der KPIs Liegezeit, Bearbeitungszeit bzw. Durchlaufzeit sowie die Prozessfrequenzen vorzunehmen. Weiterführende KPIs wie bspw. die durchschnittlich anfallenden Kosten lassen sich ex-ante nur mit großem Aufwand ermitteln und haben daher eine reduzierte Aussagekraft (Speck und Schnetgöke 2012, S. 224). Da bei einer stark automatisierten Industrie 4.0 Lösung im Vergleich zu manuellen Lösungen die Prozessfrequenz einen geringen Einfluss auf den Ressourcenbedarf hat, kann auf die Erfassung verzichtet werden. Die Ergebnisse der Soll-Prozessmodellierung sind in geeigneter und verständlicher Art und Weise aufzubereiten und frühzeitig vor Umsetzungsbeginn im Unternehmen zu kommunizieren, um Feedback einholen zu können (Speck und Schnetgöke 2012, S. 226 f.).

#### **4. Vergleich von Ist und Soll-Zustand**

Der Vergleich des erfassten Ist-Zustands und der entwickelten Soll-Zustände schließt die Prozessanalyse ab. Hierbei steht die Gegenüberstellung der ermittelten KPIs sowie der Anzahl der prozessbeteiligten Instanzen und internen Prozessressourcen zum Nachweis der absoluten Vorteilhaftigkeit des Soll-Zustands im Vordergrund (Kirazli 2017, S. 128). Zudem ist der Vergleich der Datenmodelle von Ist- und Soll-Zustand eine gute Vorbereitung für die Technologieauswahl in Schritt 4 der Bewertungssystematik.

Im Rahmen der Prozessanalyse wird das Thema Technologieauswahl nicht explizit betrachtet. Es geht in erster Linie nicht um die konkrete technologische und architektonische Umsetzung, sondern ausschließlich um eine prozessuale Betrachtung und Optimierung des Fachprozesses, die jedoch als Grundlage für eine zielgerichtete Marktanalyse verwendet werden kann (Volkman 2014, S. 51). Dies ist von zentraler Bedeutung, da erst eine gesamtheitliche Capability Analyse Klarheit über die Einsatzmöglichkeiten spezifischer Technologien bietet, da erst diese den singulär entwickelten und isoliert betrachteten Soll-Prozess in die unternehmensweite IT-Landschaft einordnet (LeanIX 2020).

Ferner dient die standardisierte Prozessdokumentation im Rahmen des Change-Managements sowohl als Kommunikationsgrundlage als auch als Nachweis für eine tatsächliche Prozessoptimierung, an deren Entwicklung alle Prozesspartner beteiligt waren (Speck und Schnetgöke 2012, S. 226 f.). Somit entsteht größere Verbindlichkeit bei der späteren Umsetzung (Kirazli 2017, S. 175).

##### **4.5.3 Schritt 3: Capability Analyse**

Der Aufbau, Betrieb und die Entwicklung von integralen IT-Systemlandschaften hat strategische Bedeutung für alle produzierenden Unternehmen (Ilin et al. 2021, S. 4). Das

„Enterprise IT Architecture Management“ bietet hierzu effiziente Methoden und Werkzeuge, wie bspw. die Capability Analyse als Element des „Capability Based Planning“ an (Korhonen und Halen 2017, S. 351).

Capabilities beschreiben Fähigkeiten eines Prozesses, die ein spezifisches unternehmerisches Ergebnis erzielen bzw. notwendig sind, um die Geschäftsstrategie umzusetzen. Eine Capability beschreibt dabei den Wert eines Prozesses stets aus Sicht des Kunden (Homann 2015). Capabilities werden in „Business Capabilities“ und „IT Capabilities“ unterschieden. Geschäftsarchitekten nutzen Business Capabilities um eine bessere Strategie für IT-Lösungen zu entwickeln und Redundanzen in der IT-Systemlandschaft mit zugehöriger Hardware aufzudecken (Gong und Janssen 2021, S. 40). Das Optimierungspotenzial durch den Einsatz von Capability Analysen liegt laut McKinsey bei 15 bis 20 Prozent (LeanIX 2020).

Üblicherweise besteht die Beschreibung einer Capability aus einem Substantiv und einem Objekt (Schulz 2020). Beispiele für Business Capabilities sind Planungsstände absichern oder Wareneingang buchen. Jede Capability muss unabhängig zu anderen Capabilities sein und dementsprechend bezeichnet und beschrieben werden (Aletrati Khosroshahi et al. 2015, S. 32). Capabilities können dabei frei definiert werden, sodass diese individuell auf den Branchen- oder Unternehmenskontext anpassbar sind (Schulz 2020). Demzufolge kann im Rahmen dieses Bewertungsschritts keine allgemeingültige Übersicht relevanter Capabilities bereitgestellt werden.

Einzelne Capabilities generieren jedoch keinen signifikanten Mehrwert. Von zentraler Bedeutung ist die Verknüpfung von fachlichen Capabilities zu den zugehörigen technischen Capabilities. Konkret wird dabei der Fachprozess dem entsprechenden IT-System und der entsprechenden Hardware zugeordnet (Schulz 2020; Korhonen und Halen 2017, S. 351). Erst im Rahmen einer unternehmensweiten „Capability Map“ können übergreifende Benefits dieser Analysemethoden erzielt werden. Die schematische Darstellung einer „Capability Map“ ist in Abbildung 33 an einem Beispiel aus der Lagerlogistik visualisiert.

Durch die transparente und systematische Visualisierung aller Capabilities und den zugehörigen IT-Systemen kann die bestehende IT-Systemlandschaft gezielt auf Schwachstellen und Redundanzen untersucht werden (Fuhrer 2013; Denman 2011; Korhonen und Halen 2017, S. 351 f.). So können bspw. Capabilities identifiziert werden, die keine systemseitige Abbildung aufweisen. Weiterhin ist es möglich, Doppelbebauungen in der Systemlandschaft oder redundante Hardwarelösungen, also Capabilities, denen mehrere Systeme bzw. Hardwarelösungen zugeordnet sind, zu identifizieren (Gong und Janssen 2021, S. 40). Haki und Legner (2021) behaupten sogar, dass ohne die Methoden des „Enterprise Architecture Management“

wie bspw. der Capability Analyse ein gezielter Soll-Ist Abgleich und der damit verbundene strategische Aufbau sowie die Steuerung von Architekturkonzepten in modernen Unternehmen nicht möglich ist (Haki und Legner 2021, S. 1335).

Der Aufbau von Capability Maps kann ebenso individuell wie die Capabilities selbst sein. In der Literatur findet sich jedoch häufiger ein hierarchisches Modell, gesteuert über Ebenen. Diese Ebenen beginnen auf dem obersten Prozesslevel und werden in der Abhängigkeitsbeschreibung immer feingranularer (Freitag et al. 2011). So gehört bspw. zur Ebene eins Planung durchführen eine Capability der Ebene zwei Montagelinie planen sowie eine Capability der Ebene drei Materialanstellung planen.

Es lässt sich also festhalten, dass ganzheitliche „Capability Maps“ die Effizienz und Effektivität des IT-Portfoliomanagements steigern (Bondel 2020; Aldea et al. 2019, S. 128). An dieser Stelle entsteht die Relevanz von Capabilities und im Speziellen der „Capability Map“ für den Bewertungsansatz von Industrie 4.0 Lösungen. Da die Umsetzung eines entwickelten Soll-Zustands eines Fachprozesses mit dem Fokus Industrie 4.0 automatisch eine systemseitige Integration bspw. in Form komplexer Algorithmen zur Steuerung von Maschinen bedeutet (Lechler und Schlechtendahl 2017, S. 61), ist es unverzichtbar, dass zuvor geprüft wird, ob technologisch oder architektonisch überhaupt die Notwendigkeit dafür besteht.

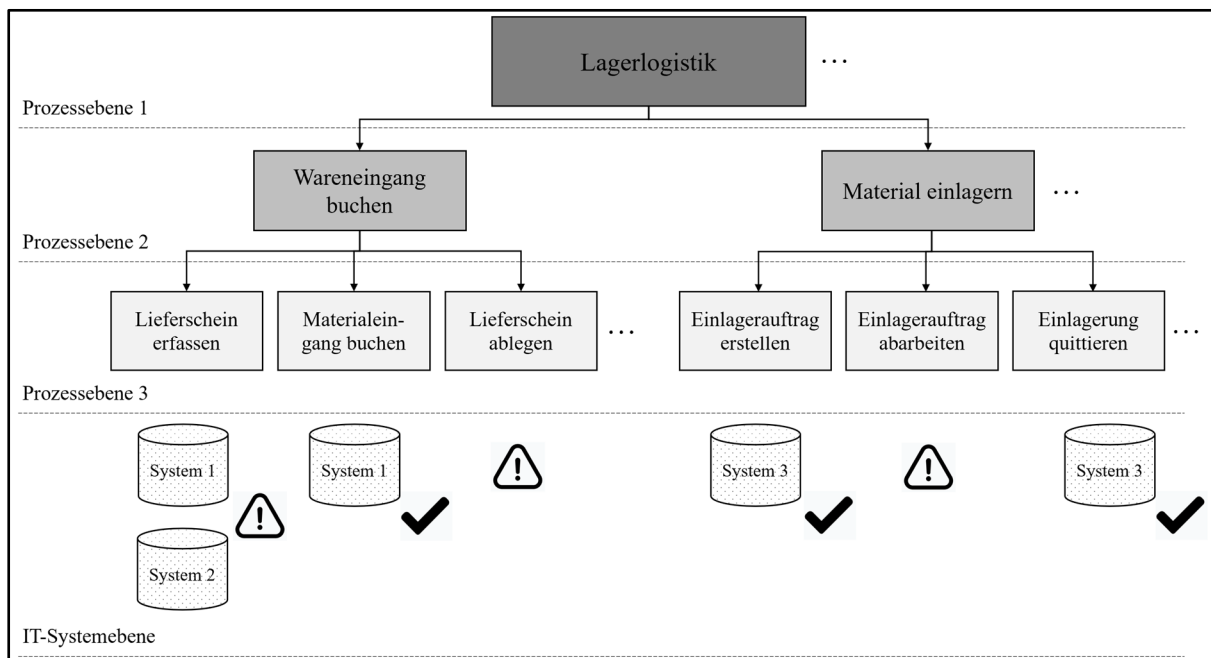


Abbildung 33: Exemplarisches Ergebnis einer Capability Analyse am Beispiel Lagerlogistik

Anders ausgedrückt wird im Rahmen der Capability Analyse überprüft, ob für die betroffenen Capabilities bereits bestehende IT- und/oder Hardwarelösungen im Unternehmen vorhanden sind, die direkt verwendet oder modular angepasst werden können (LeanIX 2020; Korhonen

und Halen 2017, S. 351). Sollte eine fehlende systemseitige Abbildungsmöglichkeit erkannt werden, können über die angrenzenden Capabilities und die im Unternehmen bereits eingesetzten Technologien Vorgaben für die Implementierung der zu integrierenden Industrie 4.0 Lösung getroffen werden. Dadurch ist eine Standardisierung und Harmonisierung der Systemlandschaft eines Unternehmens, hauptsächlich in Bezug auf den Technologieeinsatz und somit die Schnittstellenfähigkeit bzw. Datendurchgängigkeit, möglich (Ilin et al. 2021, S. 2). Ferner sind Capability Analysen im Rahmen des Fusionsmanagements von Unternehmen oder Abteilungen bedeutsam, da dabei redundante Systeme identifiziert und auf deren Basis Entscheidungen für die künftige Applikationslandschaft getroffen werden können (Ilin et al. 2021, S. 2; Gong und Janssen 2021, S. 40). Schritt drei des Bewertungsansatzes ist unverzichtbar, um im Rahmen der späteren Investitionsentscheidung Klarheit über die Konformität der zu bewertenden Industrie 4.0 Lösung mit den Unternehmenszielen sowie der vorherrschenden IT-Systemlandschaft zu erlangen.

Die Ergebnisse der applikationsspezifischen Capability Analyse sind in die unternehmensweite Capability Map einzupflegen, damit diese stets aktuell gehalten werden kann. Eine systemgestützte Erfassung, Abbildung und Steuerung der Capability Map ist insbesondere bei großen Unternehmen mit heterogener IT-Systemlandschaft zu empfehlen (LeanIX 2020).

#### 4.5.4 Schritt 4: Technologiebewertung/-auswahl

Nachdem in Schritt 3 die Frage beantwortet wurde, ob auf einer bestehenden Technologie oder einem bereits integrierten IT-System aufgesetzt werden kann bzw. ob eine teilweise oder vollständige Neuentwicklung der Industrie 4.0 Lösung notwendig ist, folgt nun die funktionale<sup>34</sup> und nicht-funktionale Anforderungsbewertung<sup>35</sup> geeigneter Technologien und konkreter Lösungsanbieter (Volkman 2014, S. 80 f.). Die gezielte Technologieauswahl ist dabei als eine der am herausforderndsten Aufgaben eines Unternehmens anzusehen, da Unternehmen ihren Wettbewerbsvorteil durch die Auswahl der falschen Technologien verlieren können (Torkelli und Tuominen 2002, S. 271 f.).

Sofern auf ein bereits integriertes IT-System zurückgegriffen werden kann, ist die Wahl der Technologie und des Anbieters oftmals vorgegeben und findet somit in diesem Schritt statt. In der Praxis sind häufig strategische Ausrichtungen bzgl. einer Technologie oder eines konkreten

---

<sup>34</sup> Funktionale Anforderungen spezifizieren, welche Funktionalität oder Verhalten ein Softwareprodukt unter bestimmten Bedingungen besitzen bzw. erfüllen soll (Balzert 2011, S. 109)

<sup>35</sup> Nicht-funktionale Anforderungen beschreiben Aspekte, die mehrere oder alle funktionalen Anforderungen betreffen und keine Funktionalitäten der Softwarelösung darstellen (Balzert 2011, S. 109)

Anbieters durch das Management oder die interne IT-Strategie vorgegeben. Es werden häufig durchgängige Gesamtlösungen aus einer Hand gefordert.

So besteht bspw. bei der Siemens PLM-Lösung „Teamcenter“ die Möglichkeit einer modularen Erweiterbarkeit, was bedeutet, dass noch nicht genutzte Teilmodule hinzugekauft werden können (Siemens AG 2020). Sollte also der zu entwickelnde Industrie 4.0 Soll-Prozess durch ein zusätzliches Teamcenter Modul systemseitig umsetzbar sein, kann eine nahtlose und zeitsparende Integration in die bestehende Systemlandschaft erfolgen. Die zeit- und kostenintensive Neuentwicklung einer bereits bestehenden Kauflösung oder die Integration eines neuen Anbieters sowie einer abweichenden Technologie und somit Systemarchitektur ist an dieser Stelle nicht sinnvoll. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass auch in diesem Fall die Sachverhalte komplex sind und Entscheidungen wohl überlegt werden müssen, um bspw. Abhängigkeiten durch „Single Sourcing“<sup>36</sup> zu vermeiden (Capgemini 2018, S. 33).

Im Falle einer teilweisen oder kompletten Neuentwicklung kommt der Technologie- respektive Anbietersauswahl eine noch weitreichendere Bedeutung zu. „Der Markt für Technologien und Services im Bereich der Digitalisierung ist in den vergangenen Jahren rasant gewachsen, sodass eine fundierte Entscheidung für Software oder Hardwarelösungen ohne zeitintensive Recherche nicht möglich ist“ (Vollmer 2020). Weiterhin führt der zeit- und kostenintensive Entwicklungs- und Implementierungsprozess neuer Software- und Hardwarelösungen zu einer mittel- bis langfristigen Bindung von Ressourcen. Wodurch Fehlentscheidungen erhebliche langfristige Auswirkungen auf die Kosten-/Nutzenstruktur haben können (Grimme 2015, S. 3).

Da unter den analysierten Bewertungsansätzen in Kapitel 3.5 keine einheitliche Vorgehensweise zur Bewertung und Auswahl der passenden Technologie identifiziert werden konnte und die Bandbreite der Analysemethoden unterschiedliche Aufwands- und Komplexitätsniveaus aufweisen (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 100 ff.; Volkmann 2014, S. 81), wird im Folgenden das vier-stufige Technologieauswahlmodell nach Vollmer (2020) sowie vergleichbar das Modell nach Grimme (2015) als allgemeingültiger Ansatz verwendet und an das entwickelte Vorgehensmodell angepasst. Das gewählte Vorgehensmodell ist in Abbildung 34 dargestellt.

---

<sup>36</sup> Single Sourcing stellt eine „Beschaffungsstrategie dar, die eine gezielte, freiwillige Beschränkung auf einen [...] Lieferanten vornimmt.“ (Krieger 2018)

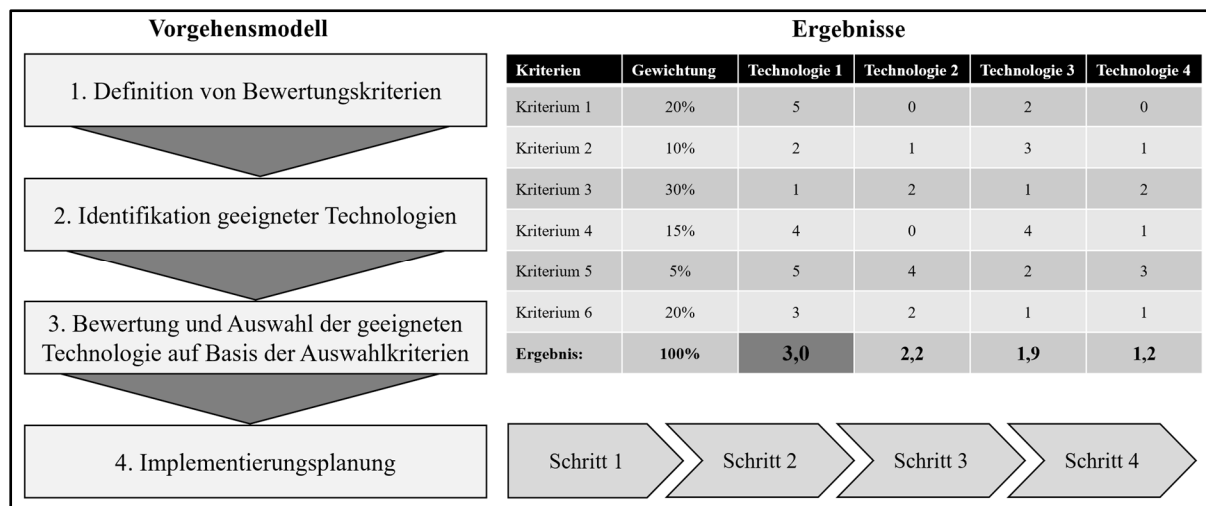


Abbildung 34: Schematische Darstellung des Vorgehensmodells zur Technologieauswahl

Im ersten Schritt des Ansatzes erfolgt die detaillierte Analyse des Industrie 4.0 Projektes mit dem Ziel, Bewertungskriterien für die Technologieauswahl zu definieren. An dieser Stelle fließen die Ergebnisse der Capability Analyse ein. Zumeist ist es dadurch möglich, die Suche nach der passenden Technologie bereits einzugrenzen. Danach werden geeignete Technologien und Services identifiziert, im Kontext der Industrie 4.0 Lösung betrachtet und auf Basis der festgelegten Kriterien bewertet. Schritt drei umfasst den gewichteten Vergleich der bewerteten Technologien mit dem Ziel der eigentlichen Technologie-, Service- oder Plattformauswahl. In der abschließenden Implementierungsplanung können die Ressourcenbedarfe konkret ermittelt werden (Vollmer 2020; Grimme 2015, S. 7 f.).

Im Unterschied zur vorgestellten Vorgehensweise findet in diesem Prozessschritt bei teilweise oder kompletten Neuentwicklungen keine finale Technologieauswahl statt, sondern eine auf die definierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen basierende Technologiebewertung bzw. -eingrenzung. Im Idealfall kann dadurch bereits eine relevante Technologieoption identifiziert werden. Die finanzielle Bewertung wird in Schritt 5 des Vorgehensmodells verlagert. Der Hintergrund hierfür sind die aufgebauten Kosten-/Nutzensteckbriefe, die bei der finanziellen Bewertung systematische Unterstützung leisten und den Prozess durch Standardisierungen erleichtern. Die Kombination aus funktionaler bzw. nicht-funktionaler und finanzieller Bewertung dient bei teilweisen oder kompletten Neuentwicklungen als Grundlage für die abschließende Technologieauswahl am Ende von Schritt 5.

#### 4.5.5 Schritt 5: Kosten-/Nutzenanalyse

Schritt 5 der ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik beinhaltet die Umsetzung der Ergebnisse der zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit. Der Fokus der Kosten-/Nutzenanalyse liegt auf der geführten Auswahl von relevanten Kosten- und Nutzenaspekten aus den entwickelten Bibliotheken (Kirazli 2017, S. 117; Liebrecht 2020, S. 78 f.) sowie deren Quantifizierung, Monetarisierung (Liebrecht 2020, S. 83 f.) und Systematisierung (Schuh et al. 2018, S. 45 f.), sodass auf der Nutzenseite ausschließlich quantitative Aspekte zur Bewertung verbleiben. Dadurch kann dem operativen „ROI-Zwang“, also dem messbar machen des Nutzens, entsprochen werden (Stocker et al. 2019, S. 499). Gleichmaßen entsteht dadurch die Möglichkeit, dem Problem der zweifelhaften Quantifizierbarkeit von qualitativen Nutzenaspekten sowie der daraus resultierenden fehlenden Vergleichbarkeit von qualitativen und quantitativen Nutzenaspekten entgegenzuwirken (Zimmermann 2003, S. 5).

Erst in Schritt 5 ist es möglich, den Nutzen basierend auf dem entwickelten Soll-Zustand in Schritt 2 sowie die Kosten, die sich hauptsächlich durch die ausgewählte Technologie aus Schritt 4 auf Basis der Capability Analyse in Schritt 3 ergeben, detailliert zu ermitteln. Hierfür konnte auf Basis von neununddreißig Interviews mit Projektleitern von Industrie 4.0 Lösungen eine Vorgehensweise entwickelt werden, die künftigen Projektteams als Unterstützungshilfe dienen soll, die Kosten-/Nutzenbewertung einer Industrie 4.0 Lösung möglichst vollständig und zeitsparend durchzuführen.

Da Industrie 4.0 Lösungen neben bewährten Nutzenaspekten völlig neue Nutzenaspekte aufweisen und diesbezüglich häufig Erfahrungswerte fehlen (Ematinger 2018, S. 9 f.), gehen Projektteams oftmals zu konservativ an die Kosten-/Nutzenbewertung heran. Was dazu führt, dass die Vorteilhaftigkeit der Industrie 4.0 Lösungen im Vergleich zu den hohen Kosten nicht immer ausreichend beschrieben wird. Somit muss oftmals über das Management strategische Bedeutung gesetzt werden, um die Effizienz mit geringer Priorität betrachten zu können (Regelmann 2019, S. 262).

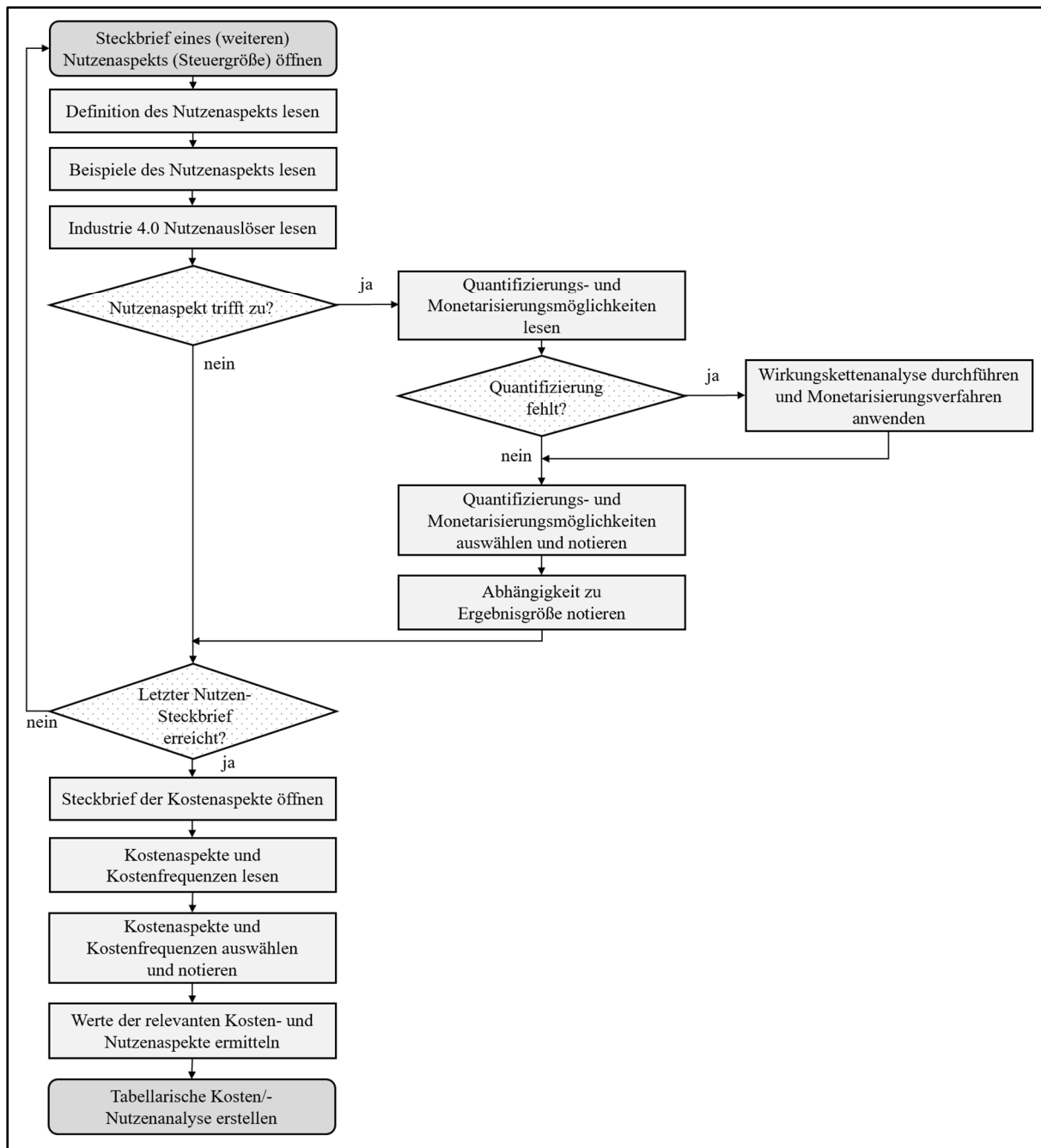


Abbildung 35: Prozessablaufdiagramm zur Kosten-/Nutzenanalyse mittels Steckbriefen

Das Vorgehensmodell der Kosten-/Nutzenanalyse ist in Form eines Prozessablaufdiagramms in Abbildung 35 dargestellt und umfasst im ersten Schritt die schrittweise Durchsprache von elf Steuergrößen. Steuergrößen sind hierbei Nutzenaspekte, die direkt durch die Einführung der Industrie 4.0 Lösung beeinflusst werden können (Günter et al. 2021, S. 6). Für jede Steuergröße existiert ein Steckbrief mit standardisiertem Aufbau. Abbildung 36 zeigt exemplarisch den Steckbrief des Nutzenaspekts Wissens- und Erfahrungsmanagement. Die übrigen Steckbriefe sind in Anhang 4 dargestellt.

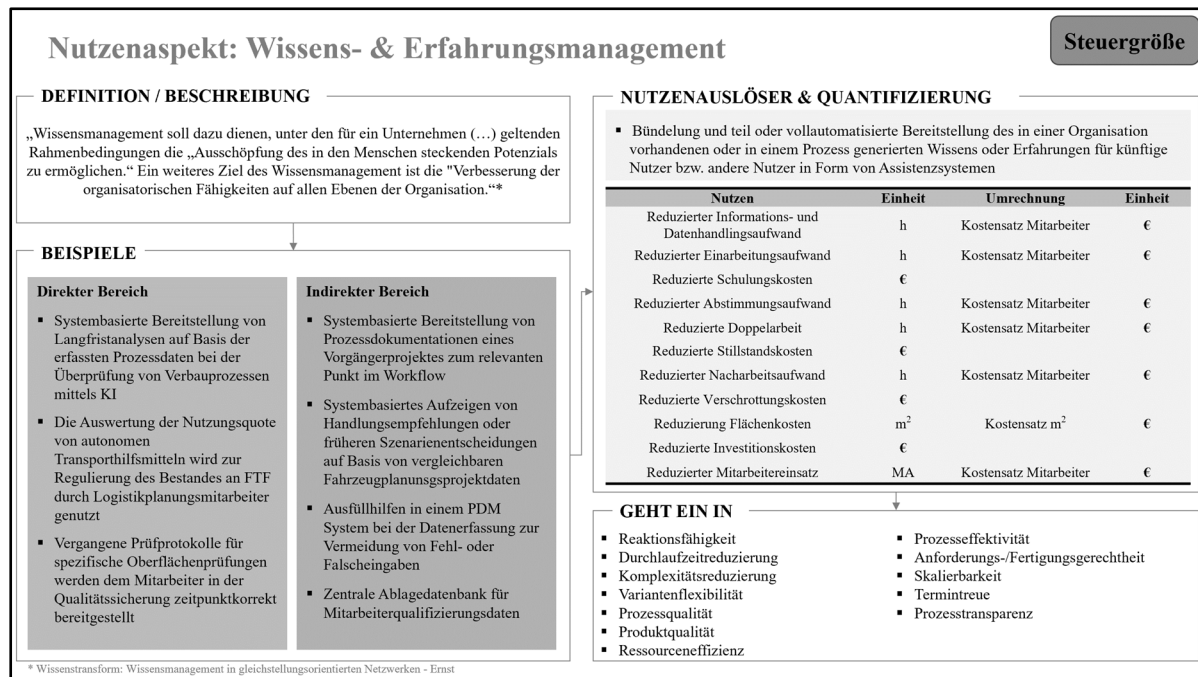


Abbildung 36: Steckbrief des Nutzenaspekts Wissens- und Erfahrungsmanagement

Um die jeweilige Steuergröße vorzustellen und damit ein einheitliches Verständnis zu erzeugen, ist stets eine aus der Fachliteratur stammende Definition sowie mehrere Praxisbeispiele aus direkten und indirekten Unternehmensbereichen aufgeführt. Auf dieser Basis entscheidet das Projektteam, ob der Nutzenaspekt auf die Industrie 4.0 Lösung angewendet werden kann oder nicht. Bei einer positiven Entscheidung wird die rechte Seite des jeweiligen Steckbriefs betrachtet. Das Projektteam erhält hier Informationen über den konkreten Nutzensauslöser im Kontext Industrie 4.0 sowie mögliche Quantifizierungen und Monetarisierungen des Nutzenaspektes. Auf Basis dieser Informationen können die passenden Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten ausgewählt werden. Die Quantifizierungsmöglichkeiten haben stets den Fokus, bestehende Kosten aus dem Ist-Zustand eines Prozesses zu reduzieren. Kann an dieser Stelle im Auswahlprozess festgestellt werden, dass die Bibliothek nicht vollständig ist, so ist eine erneute Wirkungskettenanalyse mit anschließendem Monetarisierungsverfahren durchzuführen. Durch die Anwendung des Monetarisierungsverfahrens können ermittelte quantitative Nutzenaspekte mittels Umrechnungsäquivalenten in finanzielle Größen umgerechnet werden, was zu einer rein monetären Nutzenbewertung der Industrie 4.0 Investition führt.

Der letzte Teilabschnitt der Steckbriefe weist auf die Beziehung der jeweiligen Steuergröße zu unterschiedlichen Ergebnisgrößen hin. Ergebnisgrößen sind hierbei Nutzenaspekte, die nicht unmittelbar beeinflussbar sind, sondern stets das Ergebnis von Steuergrößen darstellen (Günter et al. 2021, S. 6 f.). Ein Beispiel hierfür stellen Variantenflexibilität und Termintreue dar. Für

beide Ergebnisgrößen bedarf es Steuergrößen, um diese zu beeinflussen. So führt bspw. die Steuergröße Standardisierung dazu, dass sich die Variantenflexibilität und Termintreue verbessern.

Nachdem alle Steckbriefe der Steuergrößen auf zutreffende Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten untersucht wurden, steht dem Projektteam für die Nutzenbewertung eine Übersicht zu den Quantifizierungsmöglichkeiten der auf die Industrie 4.0 Lösung zutreffenden Steuergrößen und den beeinflussten Ergebnisgrößen zur Verfügung.

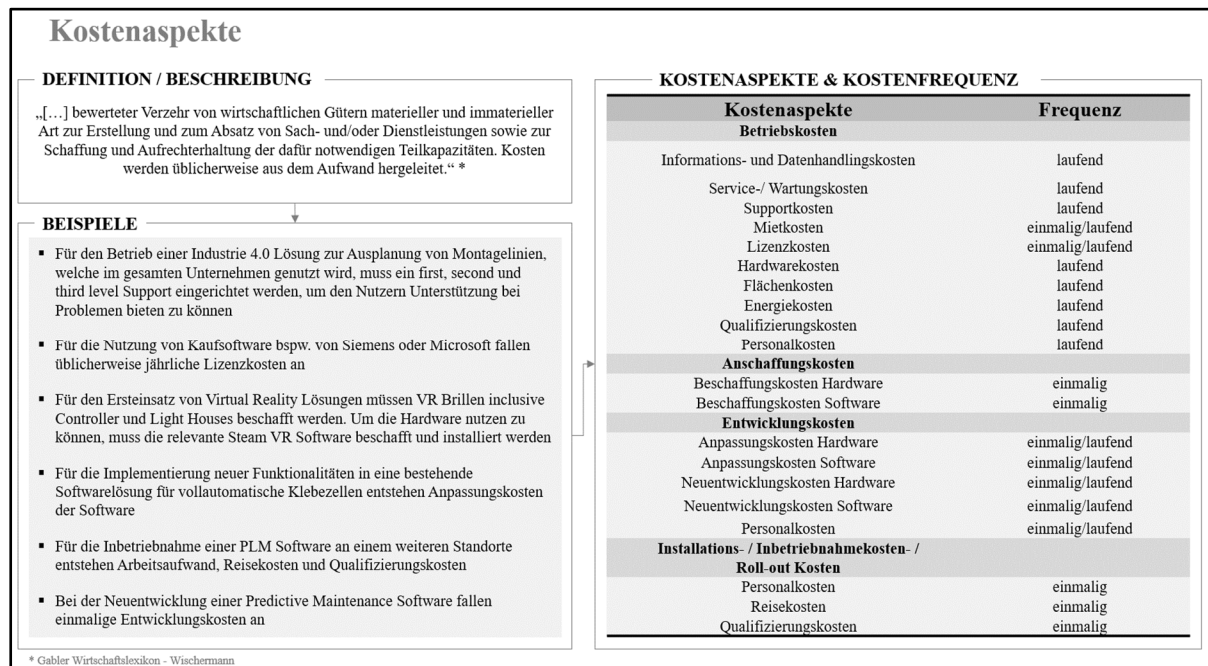


Abbildung 37: Übersicht zu den Kostenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen

Nachdem der letzte Steckbrief der elf Steuergrößen durchgearbeitet wurde, ist die Vorgehensweise für den Steckbrief mit den Kostenaspekten zu wiederholen. Dabei dient ein einzelner Steckbrief mit Kostenblöcken und -kategorien als Auswahlhilfe der passenden Kostenaspekte. Im Gegensatz zu den Nutzenaspekten weisen Industrie 4.0 Lösung keine Besonderheiten bei den Kostenblöcken auf. Zudem ist die Kostenseite mit weniger Aufwand als die Nutzenseite ermittelbar. Abbildung 37 zeigt den Steckbrief der Kostenaspekte.

Das Ergebnis der Kosten-/Nutzenanalyse stellt die tabellarische Gegenüberstellung ausschließlich quantitativer Kosten- und Nutzenaspekte dar, sodass eine aufwendige und aufgrund der nicht vorhandenen Vergleichbarkeit fehlerbehaftete Quantifizierung von qualitativen Nutzenaspekten nicht erfolgen muss. Die für eine abschließende Kosten-/Nutzenanalyse notwendigen finanziellen Werte der relevanten Kosten- und Nutzenaspekte sind durch das Projektteam in Form von Sekundärdatenanalysen oder Primärdatenaufnahmen zu ermitteln.

#### 4.5.6 Schritt 6: Risiko- und Unsicherheitsanalyse

Im betrieblichen Umfeld ist zu beobachten, dass Projektteams nur selten echte Risikoanalysen für Industrie 4.0 Investitionen durchführen, da die notwendigen Einschätzungen als unpräzise und subjektiv eingestuft werden (Kahneman et.al. 2020, S. 28 ). So liegen bspw. bezogen auf die klassischen Verfahren der Investitionsrechnung unvollständige Informationen über die tatsächlichen Kosten- und Nutzenstrukturen und somit Ein- und Auszahlungen über die Projektlaufzeit vor. Ferner können künftige, teilweise nicht vorhersehbare Umweltzustände interdependente Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Entwicklung und Implementierung aufweisen (Kesten et al. 2006, S. 16). Dennoch wird eine Risiko- und Unsicherheitsanalyse als notwendig eingestuft, um mögliche Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit im Projektteam zu beleuchten und möglichst genau monetär auszudrücken. Dies dient der besseren Einschätzung des Projektvorhabens und führt zu einer vereinfachten nachgelagerten Steuerung, insbesondere für die Entscheidungsinstanzen (Mascarella 2005, S. 45 f.).

Da der Fokus des entwickelten Ansatzes auf einer möglichst hohen Praxistauglichkeit und breiten Anwendbarkeit ohne besonderes Expertenwissen liegt, muss auch in diesem Schritt eine einfache Methodik Anwendung finden. Daher wird aus Komplexitäts- und Praktikabilitätsgründen, wie in Kapitel 4.4.2 vorgestellt, auf den Ansatz von Kesten et al. (2006) zurückgegriffen (Kesten et al. 2006, S. 23), der aktuell im betrieblichen Umfeld eine breite Renaissance erlebt (Schwenker 2021, S. 72; Manikins und Gottfredson 2022, S. 21 f.).

Dieser Ansatz beinhaltet eine Szenarienanalyse bzw. Szenariotechnik in Bezug auf die Kosten-/Nutzenbewertung der Industrie 4.0 Lösung. Hierbei erfolgt die Erstellung von unterschiedlichen Szenarien, basierend auf künftigen Umweltzuständen (Schmelting 2019, S. 301) oder möglichen Risikofaktoren in Abhängigkeit der Projektlaufzeit. Diese werden initial definiert und deren Eintrittswahrscheinlichkeit durch mehrere Personen festgelegt. Die Auswahl der Umweltzustände und Risikofaktoren ist individuell je Industrie 4.0 Lösung, Wettbewerbsumfeld oder Branche vorzunehmen (Mascarella 2005, S. 95 f.). Um die Risiko- und Unsicherheitsanalyse zu vereinfachen und durch die zeitaufwendige Definition von künftigen Umweltzuständen sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten keine Scheingenauigkeit zu erzeugen, ist zur Ermittlung des finanziellen Einflusses künftiger Szenarien auch eine einfache prozentuale Reduzierung oder Erhöhung der Kosten bzw. Nutzen möglich.

Danach wird ein realistisches Trendszenario für die Jahre der Projektlaufzeit auf Basis der ermittelten initialen Kosten-/Nutzenanalyse visualisiert. Von dieser Basis aus werden sowohl ein optimistisches als auch ein pessimistisches Trendszenario entwickelt, welche auf den

Eintrittswahrscheinlichkeiten der definierten Umweltzustände oder Risikofaktoren fußen (Kesten et al. 2006, S. 17 f.). Da Menschen dazu neigen, bei ungeraden Anzahlen an Optionen stets die mittlere auszuwählen, empfiehlt es sich, mindestens ein weiteres Trendszenario zu entwickeln (Kahneman et al. 2020, S. 28). Das Ergebnis einer Risiko- und Unsicherheitsanalyse ist in Tabelle 8 schematisch dargestellt.

	Kosten	Risikofaktor/ Umweltzustände	Erhöhung/ Reduzierung	Nutzen	Risikofaktor/ Umweltzustände	Erhöhung/ Reduzierung	Erwartungs- wert
Pessimistisches Szenario	€	Text	%	€	Text	%	0,1 - 1
Realistisches Szenario 1	€	-	-	€	-	-	0,1 - 1
Realistisches Szenario 2	€	Text	%	€	Text	%	0,1 - 1
Optimistisches Szenario	€	Text	%	€	Text	%	0,1 - 1

Tabelle 8: Schematische Darstellung des Ergebnisses einer Risiko- und Unsicherheitsanalyse

Um die Auswirkungen der identifizierten Risiken so gering wie möglich zu halten, müssen Gegenmaßnahmen erarbeitet und dokumentiert werden (Brosa-Abut und Parlings 2017, S. 6). Hierbei reicht die Bandbreite an möglichen Methoden von einer einfachen tabellarischen Auflistung bis hin zur Durchführung einer komplexen und aufwendigen FMEA (REFA AG, 2020 b). Die Auswahl der geeigneten Methode ist dem Projektteam unter Einbeziehung der branchen-, unternehmens- oder projektbezogenen Rand- und Rahmenbedingungen überlassen.

#### 4.5.7 Schritt 7: Investitionsbewertung

Ein abschließender Schritt zur Investitionsbewertung dient der Zusammenfassung der in Schritt 1 bis 6 durchgeführten Analysen, Ermittlung der relevanten Investitionskennzahlen sowie der Bewilligung oder der Ablehnung des Investitionsvorhabens.

Hierzu müssen die Ergebnisse zu den zeitlichen Kosten- und Nutzenverläufen über die Projektlaufzeit noch zusammengeführt werden. Da schwankende Kosten- und Nutzenverläufe zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Entwicklungs- und Implementierungsprozess auftreten, kommt der Zeitreihenplanung eine zentrale Bedeutung in Bezug auf den finalen Investitionsentscheid zu (Mascarella 2005, S. 101 f.). Durch die hohe Laufzeit von Industrie 4.0 Projekten und der generell rasanten technologischen Entwicklung, sind Interdependenzen mit technischen oder methodischen Neuerungen zu berücksichtigen.

Es ist möglich, dass Industrie 4.0 Lösungen zwar wirtschaftlich sind, dafür jedoch viele Jahre benötigen und somit langfristig Kapital und Ressourcen binden. Daher ist es notwendig, dass vom Finanzcontrolling klare Vorgaben bzgl. des vorhandenen Budgets, der Wirtschaftlichkeitskriterien sowie der Investitionskennzahlen für die zu bewertende Investition gesetzt werden (Schuh et al. 2018, S. 48). Denn für eine rationale Investitionsbewertung müssen

Zielvorstellungen vorhanden sein, mit deren Hilfe die Handlungsalternativen nach ihrer absoluten Vorteilhaftigkeit zu bewerten sind (Laux und Schabel 2009, S. 9). Zudem haben Zielkriterien eine zentrale Bedeutung für das übergreifende Projektportfoliomanagement, welches die relative Vorteilhaftigkeit von Investitionen analysiert.

Im betrieblichen Umfeld häufig verwendete, da relativ einfach berechenbare Investitionskennzahlen, sind die statische und dynamische Amortisationsdauer (Schuh et al. 2018, S. 43 f.; Günter et al. 2021, S. 1), der Kapitalwert, sowie die Kapitalrendite oder Kapitalrentabilität, die auch unter dem Namen ROI bekannt ist (Schuh et al. 2018, S. 44 f.; Deuse et al. 2019, S. 222). Ebenso zeigt die Strukturierung der Verfahren zur Nutzenbewertung nach Becker et al. (2011), dass bei gesamtheitlichen, finanziellen Bewertungsverfahren die Verwendung des ROI und der Kapitalwertmethode zu empfehlen ist (Becker 2011, S. 81).

### **1. und 2. Statische und dynamische Amortisationsdauer**

„Zeitpunkt, an dem die Summe der Einzahlungsüberschüsse eines Investitionsprojekts (bei statischer Amortisationsrechnung) oder deren Barwert<sup>37</sup> (bei dynamischer Amortisationsrechnung) gleich der Investitionsausgabe [...] ist“ (Pape 2018 a). Oder einfacher: „Nach wie vielen Jahren macht sich die Investition bezahlt?“ (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 292).

Die Berechnungsformel der statischen Amortisationsdauer mittels Durchschnittsmethode lautet (Friedrichsen und Ahting 2021, S. 87):

$$\text{Statische Amortisationszeit} = \frac{\text{Kapitaleinsatz} - \text{Restwert}}{\text{durchschnittlicher Kapitalrückfluss pro Periode}}$$

Die Berechnungsformel der dynamischen Amortisationsdauer mittels Kumulationsmethode lautet (Friedrichsen und Ahting 2021, S. 88):

$$\text{Dynamische Amortisationszeit} = \frac{\text{Kapitaleinsatz} - \text{Restwert}}{\sum_{t=1}^n \text{Rückfluss pro Periode} \times (1 + \text{Zinssatz})^{\text{Jahre}}}$$

### **3. Kapitalwert**

Die Kapitalwertmethode gilt heute als „State-of-the-Art“ Investitionsrechnungsinstrument. Dabei werden die Barwerte der Ein- und Auszahlungen der Laufzeitperioden kumuliert, zu einem bestimmten Zinssatz abgezinst und um die Anschaffungsausgaben vermindert (Pape 2018 b). Die Berechnungsformel des Kapitalwerts lautet (Heesen 2020, S. 27):

---

<sup>37</sup> Barwerte bilden unter Annahme einer bestimmten Verzinsung den heutigen Wert künftiger Zahlung dar. Dadurch werden Zahlungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, vergleichbar gemacht (Holland et al. 2018).

$$\text{Kapitalwert Jahr 0} = \text{Investitionsauszahlung Jahr 0} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{Barwerte der Jahre}}{(1+\text{Zinssatz})^{\text{Jahre}}}$$

#### 4. Gesamtkapitalrendite

Die Gesamtkapitalrendite oder auch ROI stellt den Einzahlungsüberschuss einer Investition in Relation zum gesamten eingesetzten Kapital unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer dar (Breuer und Breuer 2018 a). Die Berechnungsformel der Gesamtkapitalrendite lautet (Heesen 2020, S. 9):

$$\text{Gesamtkapitalrendite (ROI)} = \frac{\text{Gewinn} + \text{Fremdkapitalzinsen}}{\text{investiertes Kapital}} \times 100$$

Je nach Literaturquelle sind unterschiedlich viele und komplexe Investitionskennzahlen in Verwendung, sodass eine allgemeingültige Vorgabe nicht zwingend notwendig ist. Neben den vorgestellten Investitions-KPIs kann eine Vielzahl weiterer statischer oder dynamischer Investitionskennzahlen auf Basis der Ergebnisse der Bewertungssystematik ermittelt und als Grundlage für den Investitionsentscheid verwendet werden.

Die Kalkulation der Investitionskennzahlen erfolgt für alle identifizierten Trendszenarien, sodass eine breite Basis hinsichtlich Investitionsentscheid gegeben ist. Im praktischen Umfeld werden hierzu üblicherweise zentral durch das Finanzcontrolling vorgegebene Amortisationszeiten, ROIs oder Kapitalwerte als Instrument für eine Genehmigung oder Ablehnung von Geldern genutzt (Kruschwitz und Lorenz 2019, S. 292).

Sofern die ermittelten Kennzahlen des pessimistischsten Trendszenarios die vorgegebenen Zielwerte des Finanzcontrollings erfüllen, ist die Investition direkt zu genehmigen. Der übliche Entscheidungsprozess bezieht sich jedoch auf die Ergebnisse der realistischen Trendszenarien unter Einbeziehung der Auswirkungen und Eintrittswahrscheinlichkeit des optimistischen und pessimistischen Trendszenarien und muss im Rahmen von Diskussionsrunden geführt werden. Somit ist es möglich, die absolute Vorteilhaftigkeit einer Investition für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik zu ermitteln.

Das Ergebnis des projektspezifischen Entscheidungsprozesses muss jedoch nochmals kritisch im Rahmen des Projektportfolioprozesses diskutiert werden. Hierbei gilt es unter anderem die Frage nach der Vergabe des vorhandenen Finanzbudgets für die unterschiedlichen Industrie 4.0 Projekte im Bereich oder Unternehmen zu klären (Angermeier 2016). Als Wechselwirkung können verschärfte Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der Industrie 4.0 Lösungen resultieren, die unter Umständen zu einer Neukalkulation führen.

## 4.6 Zwischenergebnis: Vorgehensmodell zur ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik

In Kapitel 4 wurden die fünf aus der Literatur abgeleiteten Forschungsfragen beantwortet. Die hierzu gewählte Forschungssystematik setzt sich, wie in Kapitel 4.1 vorgestellt, aus einer Kombination von Experteninterviews, einer Focus Group und einer qualitativen Literaturanalyse zusammen.

Die Beantwortung von Forschungsfrage 1 nach den relevanten Kosten- und Nutzenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen sowie deren Bedeutung basiert im ersten Schritt auf einer qualitativen Literaturanalyse zu den Nutzenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik. Im zweiten Schritt wurde auf Basis der identifizierten sechsunddreißig Nutzenaspekte leitfadengeführte Experteninterviews mit neununddreißig Projektleitern von Industrie 4.0 Vorhaben durchgeführt, um die absolute und relative Bedeutung der identifizierten Kosten- und Nutzenaspekte zu ermitteln. Die Auswertung ergab, dass zweiunddreißig der sechsunddreißig Nutzenaspekte als relevant für die Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen einzustufen sind. Vier Nutzenaspekte sind als Grundvoraussetzung deklariert und somit eliminiert worden. In Bezug auf die relevanten Kostenaspekte konnten insgesamt siebzehn Aspekte aus vier Kategorien identifiziert werden.

Die Beantwortung von Forschungsfrage 2 nach dem Aufbau eines geeigneten Ordnungsrahmens zur Systematisierung der Nutzenaspekte mit dem Ziel der Komplexitätsreduzierung für operative Anwender erfolgt mittels Focus Group Ansatz. Dabei diskutierten acht Teilnehmer aus unterschiedlichen Fachbereichen in Form von vier moderierten Ganztagesworkshops diese Fragestellung. Im ersten Schritt konnten durch eine Redundanzprüfung die Anzahl der Nutzenaspekte von zweiunddreißig auf sechsundzwanzig gesenkt werden. Da eine Auswahlunterstützungslogik für Projektleiter von Industrie 4.0 Lösungen mit sechsundzwanzig zur Auswahl stehenden Nutzenaspekten als zu unpraktikabel eingestuft wurde, musste an weiteren Vereinfachungen gearbeitet werden. Hierzu fand eine Gegenüberstellung der identifizierten Systematisierungslogiken von Nutzenaspekten aus der Literatur statt, wodurch eine unter dem Gesichtspunkt der Praktikabilität geeignete Logik ausgewählt werden konnte. Dadurch sinkt die Anzahl der zur Auswahl stehenden Nutzenaspekte durch die Einführung einer hierarchischen Systematisierungslogik, bestehend aus Steuer- und Ergebnisgrößen, von sechsundzwanzig auf elf. Zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 nach der Quantifizierung und Monetarisierung von relevanten Kosten- und Nutzenaspekten sowie dem Aufbau entsprechender Bibliotheken konnte das Verfahren der

Wirkungskettenanalyse in Kombination mit dem Monetarisierungsverfahren als geeignete Methodik herausgearbeitet werden. Eine Aufbereitung der Kosten- und Nutzenaspekte findet durch Bibliotheken in Form von Steckbriefen mit allen relevanten Inhalten statt. Diese sind in Anhang 4 nachzuschlagen. Die Kernaussage zu Forschungsfrage 3 umfasst die Erkenntnis, dass alle Kosten- und insbesondere Nutzenaspekte mittels der gewählten Vorgehensweise quantifiziert und auch monetarisiert werden können, sodass die klassische, noch häufig in der Literatur zu findende Einteilung in qualitative und quantitative Nutzenaspekte überwunden werden kann. Die insgesamt zweiunddreißig Quantifizierungsmöglichkeiten der Nutzenaspekte sind in vier Kategorien eingeteilt. Für die identifizierten Quantifizierungsmöglichkeiten der Kostenaspekte konnten ebenfalls vier Kategorien identifiziert werden.

Um Forschungsfrage 4 nach der Bedeutung der Kosten- und Nutzenaspekte bei Industrie 4.0 Lösungen in direkten und indirekten Bereichen und der damit verbundenen möglichen Anpassung einer Kosten-/Nutzenanalyse gezielt zu beantworten, fand vor den Experteninterviews eine entsprechende Auswahl von Industrie 4.0 Projekten statt. Hierbei wurden zwanzig Industrie 4.0 Projekte aus direkten und neunzehn aus indirekten Bereichen ausgewählt, sodass die Bedeutung der Kosten- und Nutzenaspekte analysiert werden konnte. Die absolute Bedeutung der Kosten- und Nutzenaspekte bei Industrie 4.0 Projekten aus direkten und indirekten Bereichen ist als gleich einzustufen. Da somit die Inhalte der Bibliotheken gleich sein können, ist es nicht erforderlich eine separate Kosten-/Nutzenanalyse für Projekte aus direkten und indirekten Bereichen aufzubauen. Ob der absoluten Übereinstimmung der Aspekte war es jedoch möglich, starke Unterschiede in der relativen Bedeutung, insbesondere der Nutzenaspekte, festzustellen.

Eine qualitative Literaturanalyse von dreiundzwanzig bestehenden Bewertungsansätzen zur Investitionsbewertung für Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Lösungen diente als Grundlage für die Ableitung relevanter Bewertungsschritte und Verfahren einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik, deren Entwicklung zugleich Gegenstand von Forschungsfrage 5 ist. Dabei wurde darauf geachtet, dass ein detaillierter Abgleich zwischen den Schritten und Verfahren der dreiundzwanzig Bewertungsansätze und den literaturbasierten Anforderungen an eine ex-ante Bewertungssystematik erfolgte, um ein möglichst gesamtheitliches Vorgehensmodell zu entwickeln. Das entwickelte Vorgehensmodell für eine ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investition in Produktion und Logistik umfasst sieben Bewertungsschritte:

Schritt 1 stellt eine Vorprüfung der Industrie 4.0 Lösung dar. Dabei sind Informationen zu

Projekttitel, Problemstellung, Zielstellung, Nutzerkreis und Zielgruppe, Zeitschiene und Meilensteine, Aufwand/Nutzen, IT-Systemlandschaft sowie Prämissen und Annahmen zusammenzustellen, um einen geeigneten Reifegrad des Vorhabens als Eingangsgröße für die weiteren Bewertungs-schritte sicherzustellen.

Schritt 2 beinhaltet eine um die system- und datenseitigen Anforderungen von Industrie 4.0 Lösungen erweiterte Prozessanalyse 4.0. Das Ziel der Prozessanalyse liegt in der Entwicklung eines weitestgehend digitalisierten Soll-Prozesses sowie der Identifikation quantitativer Kennzahlen für die spätere Kosten-/Nutzenanalyse.

Eine Capability Analyse in Schritt 3 sorgt für die Einordnung der zu bewertenden Industrie 4.0 Lösung in die bestehende IT-System- und Hardwarelandschaft des Unternehmens. Ziel hierbei stellen sowohl die Verhinderung von asynchronen Systemlandschaften durch Fehl- und Doppelentwicklungen als auch die Identifikation technischer Rand- und Rahmenbedingungen dar.

Auf Basis der Erkenntnisse der Capability Analyse findet in Schritt 4 eine Technologiebewertung und -auswahl in Bezug auf die zu bewertende Industrie 4.0 Lösung statt. Je nachdem ob eine komplett neue Lösung entwickelt oder die vorherrschenden Systeme zur Umsetzung genutzt oder erweitert werden können, kommt diesem Schritt eine unterschiedlich große Bedeutung zu.

Erst nachdem der Entwicklungsumfang sowie die IT-technischen Rand- und Rahmenbedingungen der zu bewertenden Industrie 4.0 Lösungen erarbeitet wurden, kann eine detaillierte Kosten-/Nutzenbetrachtung in Schritt 5 erfolgen. Dabei stehen umfangreiche Bibliotheken zu den relevanten Kosten- und Nutzenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen als Auswahlhilfe für das Projektteams zur Verfügung. Diese umfassen Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten, sodass eine ausschließlich monetäre Ermittlung der Kosten- und Nutzen möglich ist.

Schritt 6 greift auf die Ergebnisse der Kosten-/Nutzenanalyse zurück und ermittelt im Rahmen der Szenarienmethode unterschiedliche Umweltzustände sowie Risikofaktoren, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie Auswirkungen auf die Kosten-/Nutzenverläufe im Projektverlauf. Ziel hierbei stellt die Auseinandersetzung mit möglichen Projektrisiken und deren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit als Eingangsgröße für die abschließende Investitionsbewertung dar.

Schritt 7 des Bewertungsansatzes beinhaltet im ersten Schritt die Kosten- und Nutzenverlaufsplanung über die gesamte Projektlaufzeit auf Grundlage der entwickelten Szenarien. Darauf folgt die Kalkulation von investitionsrelevanten Kennzahlen, die als Basis für die abschließende Freigabe oder Ablehnung des Investitionsvorhabens auf Basis von vorgegebenen finanzwirtschaftlichen Schwellwerten dienen.

## 5 Validierung der ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen an zwei Beispielen aus der Industrie

Der in Kapitel 4.5 erläuterte ex-ante Bewertungsansatz für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik wird im folgenden Kapitel am Beispiel von zwei Industrie 4.0 Projekten zur teil- bzw. voll automatisierten Szenarienplanung von Montagelinien sowie einem schwarmintelligenten Transportsystem für fertige Fahrzeuge im Versandvorbereitungsprozess validiert. Um das jeweilige unternehmensinterne Prozess Know-how zu schützen, sind Teile der Analyse vereinfacht und anonymisiert dargestellt. Die grundsätzliche Vorgehensweise, Ergebnisse und Erkenntnisse durch den Praxiseinsatz des entwickelten ex-ante Bewertungsansatzes sind jedoch klar herausgearbeitet, um die Praxistauglichkeit nachzuweisen.

### 5.1 Praxisprojekt 1: Digitales Planungswerkzeug

Im folgenden Kapitel findet an einem aus finanzieller Sicht größten Industrie 4.0 Projektes der indirekten Zentralplanung eines Produktionsunternehmens die Validierung der entwickelten ex-ante Bewertungssystematik statt. Das DES wird im Produktionsplanungsumfeld des Gewerks Montage umgesetzt. Das DES erfüllt alle im Rahmen dieser Arbeit definiert Kriterien an eine Industrie 4.0 Lösung: Vernetzung von Systemen, Systemgestützte Datenerfassung, Algorithmengestützte Datenverarbeitung, verbesserte Reaktionsfähigkeit und Flexibilität bei Prozessveränderungen und Ressourceneffizienz.

#### 5.1.1 Schritt 1: Vorprüfung

##### **1. Projekttitle**

Da sich das vorliegende Projekt mit der teil- bzw. voll automatisierten Szenarienplanung von Endmontagelinien beschäftigt, ist der Name „Digital Assembly Planner“ (DAP) vom Projektteams als Projektname definiert worden.

##### **2. Problemstellung**

Die Planung von Endmontagen stellt einen äußerst anspruchsvollen Aspekt innerhalb der Produktentstehungsprozesse in der Industrie dar und weist eine Vielzahl gegenwärtiger und zukünftiger Herausforderungen auf (Küber 2017, S. 1 f.). Die Komplexität dieses Bereichs ergibt sich aus der umfangreichen Menge an Informationen, die benötigt werden, um einen reibungslosen und effizienten Ablauf des Prozesses sicherzustellen. Hierzu zählen beispielsweise Informationen über Anlagen, Werkzeuge, Arbeitsvorgänge, Bauteile,

Bauräume, Ergonomie, Mitarbeiterzahl, Laufwege, Materialbereitstellung und Qualitätskriterien. Das eigentliche Problem liegt darin, dass diese Informationen zwar einzeln vorhanden sind, jedoch in einer Vielzahl von isolierten Systemen und Datenspeichern abgelegt werden, die nur teilweise miteinander verknüpft sind. Um eine integrierte Planung zu realisieren, müssen die erforderlichen Informationen größtenteils manuell erfasst, verarbeitet und visualisiert werden, was als ineffizient und nicht nachhaltig betrachtet wird. Üblicherweise erfolgt die Planung in Excel oder PowerPoint unter rudimentären Standardisierungsvorgaben. Als Konsequenz daraus ist der Ressourcenbedarf für die Erstellung verschiedener Szenarien erheblich. Fehler bei der mühsamen und zeitaufwendigen Konsolidierung der Daten führen zu einem erhöhten Abstimmungsbedarf und einem Mangel an Aktualität der bearbeiteten Stände, was zu unnötiger Doppelarbeit führt.

### **3. Zielstellung**

Im Hinblick auf eine Lösungsstrategie wird primär die Entwicklung einer Industrie 4.0-Anwendung in Erwägung gezogen, die einen umfassenden Zugriff auf sämtliche relevante Quelldatensysteme ermöglicht. Dadurch sollen dem Montageplaner die erforderlichen Informationen auf einer zentralen Plattform zur Verfügung gestellt werden. Hierbei findet das Konzept des „Single Source of Truth“ (SSOT) als essenzielle Kerntechnologie im Kontext von Industrie 4.0 Anwendung (WZL 2018). Mithilfe von bidirektionalen Schnittstellen erfolgt ein automatisierter Datenaustausch zwischen den Ursprungssystemen und dem Daten- und Analyse-Plattform, um das Ziel einer Minimierung von Fehlern im Datenmanagement zu erreichen (c-place 2020).

Diese SSOT eröffnet neuartige Möglichkeiten für die algorithmengestützte Datenverarbeitung, welche dem Planer in Form von Assistenzfunktionen unterstützend zur Seite stehen. Diese Funktionen entlasten den Planer von nicht wertschöpfenden Planungsaufgaben oder können alternative Planungsvorschläge unterbreiten. Der finale Entwicklungsstand des Systems generiert, basierend auf den Planungsvorgaben und den aktuellen Planungsdaten vollautomatisch eine festgelegte Anzahl von Taktungsszenarien. Diese können im Anschluss vom verantwortlichen Planer angepasst, mit allen involvierten Prozessbeteiligten besprochen und abschließend entschieden werden.

Die Dokumentation sämtlicher entwickelter Szenarien sowie die begleitenden Entscheidungsprozesse werden in elektronischer Form zentral abgelegt. Hierdurch wird eine nachhaltige Wissensspeicherung und Erfahrungsakkumulation geschaffen, die als Grundlage für zukünftige Projekte dienen kann (Schiffer und Autenrieth 2019, S. 19).

#### **4. Nutzerkreis und Zielgruppen**

Die zentrale Nutzergruppe ist im Bereich der Montage- und Anlagenplanung angesiedelt. Konkret handelt es sich um ca. einhundertfünfzig Personen an zentraleuropäischen Produktionsstandorten. Da die Planung von Montagelinien jedoch die Integration unterschiedlichster Fachbereiche umfasst, sind weitere Nutzergruppen bspw. das Industrial Engineering, der betreibende Montagebereich, die Qualitätssicherung, die Logistikplanung sowie externe Dienstleister indirekt eingebunden.

#### **5. Zeitschiene und Meilensteine**

Gemäß der ersten Abschätzung einer interdisziplinären Projektgruppe, bestehend aus Fachbereich, IT und externen Entwicklungsdienstleistern ergab eine Grobplanung von dreieinhalb bis vier Jahren Entwicklungszeit. Dabei konnten drei Lieferstufen identifiziert werden. Stufe eins, auch als DAP V1.0 bezeichnet, soll nach einem Jahr fertiggestellt sein. Dabei handelt es sich lediglich um die Entwicklung der SSOT. Stufe zwei, DAP V2.0, umfasst die Entwicklung von Assistenzfunktionen zur gezielten Unterstützung des Planers und soll nach zwei Jahren produktiv nutzbar sein. Für die abschließende DAP V3.0 werden weitere eineinhalb bis zwei Jahre veranschlagt. Das Ziel hierbei stellt die vollautomatische Erstellung von Planungsszenarien dar.

#### **6. Kosten/Nutzen Schätzung**

Im Rahmen der Grobplanung konnten auch erste Abschätzungen zu den entstehenden Kosten getroffen werden. Hauptkostentreiber sind die externen Entwicklungskosten für alle Lieferstufen von ca. 2 Millionen Euro, die internen Personalkosten von ca. 1,2 Millionen Euro sowie Hardware und Betriebskosten in Höhe von ca. 100.000 Euro. Dadurch entsteht ein Aufwand von ca. 3,3 Millionen Euro.

Die Nutzenseite bildet hauptsächlich die Reduzierung der manuellen Tätigkeiten der Planer sowie Doppelarbeiten und Abstimmungsprozesse durch das automatisierte Datenhandling innerhalb der Applikation ab. Zur Ermittlung wurde anhand von Expertenschätzungen das Reduzierungspotenzial, auf Basis der aktuellen, nicht wertschöpfenden Tätigkeiten im Planungsprozess geschätzt. Als Ergebnis können Mitarbeiterkapazitäten in Form von Beschäftigungsjahren (BJ) in Höhe von 3,8 Millionen Euro für anderweitige, wertschöpfende Tätigkeiten freigesetzt werden.

#### **7. IT-Systemanalyse**

Eine grobe Analyse der bekannten Systemlandschaft im Umfeld der Montageplanung ergab, dass die relevanten Quellsysteme zwar einen Großteil der singulären Funktionalitäten des DAP

abdeckten, diese jedoch zumeist auf einer veralteten Architektur basierten, die bspw. nicht mit Cloud-Technologien kompatibel waren. Zudem können bei systemspezifischen Einzel-fähigkeiten keine synergetischen Optimierungen, basierend auf übergreifenden Daten-verarbeitungsprozessen, generiert werden. Daher schlug das Projektteam eine vollständige Neuentwicklung vor.

## **8. Prämissen und Annahmen**

Da bei einer vierjährigen Entwicklungszeit und einer parallelen Inbetriebnahme für ein Industrie 4.0 Projekt im aktuellen betrieblichen Kontext eine Vielzahl an administrativen und operativen Unvorhersehbarkeiten und Schwierigkeiten möglich sind, wurden folgende allgemeine Prämissen und Annahmen formuliert:

- Interne Ressourcen für die Entwicklung stehen über die gesamte Projektlaufzeit zur Verfügung und sind in ihrer Besetzung möglichst stabil.
- Der Gesamtnutzen kann nur durch eine durchgängige Finanzierung, insbesondere externer Entwicklungsdienstleister erzielt werden.
- Um den Gesamtnutzen erzielen zu können, muss der DAP in den Arbeitsalltag der Montageplaner nachhaltig integriert sein.
- Strategische Richtungsveränderungen, insbesondere bei den Themen Technologie, Plattform und Architektur sind auf ein Minimum zu begrenzen.

### 5.1.2 Schritt 2: Prozessanalyse 4.0

#### **1. Erfassung des Ist-Zustands**

Der aufgenommene gegenwärtige Prozess hat seinen Ursprung in einem Planungsauftrag, der vom Projektleiter an die Planer innerhalb des IT-Systems eins zugewiesen wird. Die bereitgestellten Informationen umfassen die Planungsgrundlagen, das verfügbare Budget sowie die zeitliche Begrenzung für die Planumsetzung. Aus diesen Daten resultiert die Berechnung einer Soll-Taktzeit für die Montagelinie durch den Fachplaner, wobei handgeschriebene Notizen und Papier verwendet werden.

Als Basis für die eigentliche Szenarienplanung erfolgt die Anpassung der bestehenden Taktungsdokumente und Betriebsmittelverzeichnisse sowie die Ermittlung relevanter Prozesszeiten durch den Fachplaner. Hierbei werden ausschließlich Excel-Listen und das IT-System zwei genutzt. In einem folgenden Schritt werden Arbeitsvorgänge von vorhandenen Bauteilen den Montagearbeitsplätzen zugeordnet, was ebenfalls mithilfe einfacher Excel-Berechnungen und dem System drei durch den Fachplaner erfolgt.

Anschließend erfolgt die Analyse der Arbeitsplatzbelegung und gegebenenfalls die Erstellung neuer Arbeitsplätze oder die Verlagerung von Arbeitsvorgängen. Auch diese Berechnungen basieren auf Excel. Aufgrund der signifikanten Rolle ortsfester Großanlagen für die Layoutplanung wird eine Kapazitätsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse haben erheblichen Einfluss auf die Gesamtplanung, da Modifikationen an den Großanlagen mit beträchtlichem finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden sind.

Im vorletzten Schritt der Planung erfolgt die Zuweisung von Materialien in System vier durch den Fachplaner. Als Ergebnis dieses Prozesses entsteht ein Planungsszenario, typischerweise in Form einer PowerPoint-Präsentation. Dieses Szenario wird mit Vertretern aus dem Bereich Industrial Engineering, Logistikplanung und dem operativen Linienbetrieb abgestimmt und schließlich vom Projektleiter in System eins genehmigt. Die Dokumentation dieser Entscheidungen basiert auf den erstellten PowerPoint-Präsentationen der Planungsszenarien, ohne eine einheitliche Ablagestrategie.

Die benötigte Zeit für die Erstellung eines Planungsszenarios liegt im aktuellen Zustand durchschnittlich bei etwa 61,45 Stunden. Dabei entfallen lediglich 2,75 Stunden auf wertschöpfende Tätigkeiten, während die nicht wertschöpfenden Prozesszeiten 58,58 Stunden ausmachen. Dies führt Prozesszykluseffizienz (engl. „Process Cycle Efficiency“ - PCE), von 4,69 Prozent. Abbildung 38 stellt den gegenwärtigen Prozess grafisch dar.

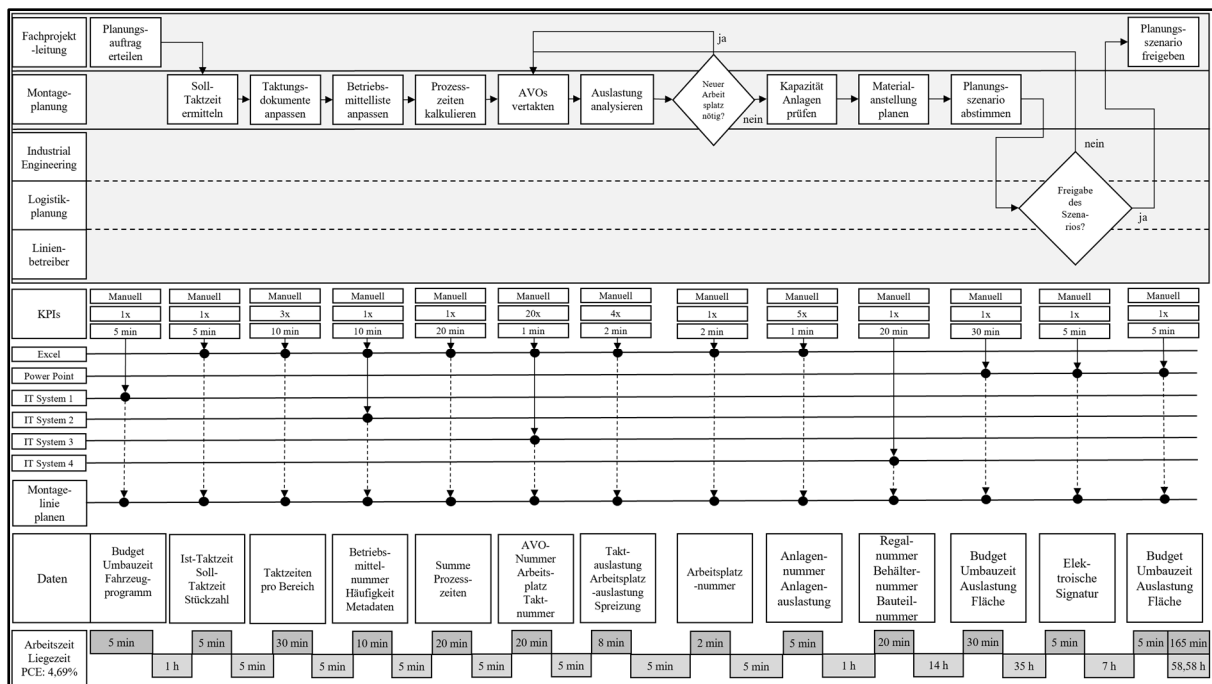


Abbildung 38: Ist-Prozessaufnahme des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner

## 2. Bewertung des Ist-Zustands

Die identifizierten Schwachstellen des Ist-Zustands werden mittels einer Visualisierung im Swimlane-Diagramm in Abbildung 39 für alle beteiligten Prozessakteure transparent dargestellt. Der erste Systembruch (1) tritt auf, wenn der Übergang von einem elektronischen Planungsauftrag zu einer manuellen, papierbasierten Kalkulation erfolgt, was zur Bestimmung der Soll-Taktzeit führt. In den nachfolgenden drei Prozessabschnitten treten erneut Systembrüche (2) aufgrund des Wechsels von Excel zum System zwei auf. Dabei werden erhebliche manuelle Aufwände für die Datenverarbeitung (3 und 18) notwendig. Des Weiteren besteht das Risiko der Verwendung nicht aktueller Daten (4), da die Excel-Tabellen dezentral abgelegt sind. In den darauffolgenden zwei Prozessstufen entstehen erneut hohe Aufwände für die manuelle Datenverarbeitung (5) und die Möglichkeit von manuellen Fehlberechnungen (7), die weitreichende Auswirkungen auf spätere Änderungskosten im Serienprozess haben können. Ein weiterer Systembruch (6) ergibt sich durch die Verwendung von System drei. In späteren Phasen des Prozesses sind zusätzliche Systembrüche (10) erkennbar, zum Beispiel bei der Planung der Materialanstellung in System vier, begleitet von ressourcenintensiven, da manuellen Datenaufbereitungsschritten (9) für das Planungsszenario.

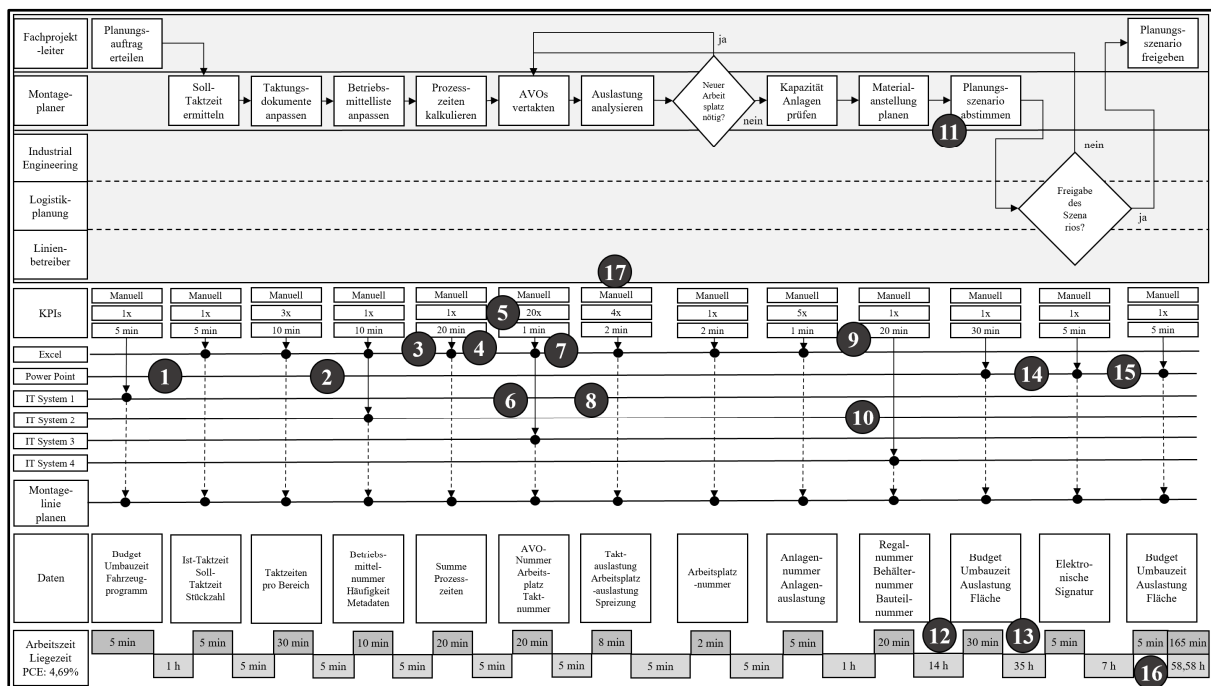


Abbildung 39: Schwachstellenanalyse des Ist-Prozesses des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner

Die mangelnde kontinuierliche Abstimmung des Planungsszenarios mit anderen Fachplanern führt zu Doppellarbeit (11). Die langen Verzögerungen des Plans vor der eigentlichen Abstimmung, Freigabe oder Ablehnung stellen zusätzliche Schwachstellen im Prozess dar (12 und 13). Schlussendlich weist die fehlende standardisierte Dokumentations- und

Ablagestrategie in PowerPoint-Formaten auf Defizite hin, die zu Verlusten von Fachwissen (14) führen können, und in Einzelfällen sogar zu Doppelparbeit aufgrund fehlender Nachweisbarkeit der Entscheidungsgrundlage (15). Nicht zuletzt ist die Durchlaufzeit des Prozesses mit 8,8 Tagen als nicht ressourceneffizient einzustufen (16). Des Weiteren ist der gesamte Planungsprozess von manuellen Aktivitäten geprägt, was Mitarbeiterressourcen bindet und zusätzliche Fehlerpotenziale birgt (17).

An diesem Beispiel wird der Mehrwert der Erstellung einer Prozessanalyse 4.0 deutlich. Der Großteil der Schwachstellen liegt im Bereich der Daten und Systeme, wohingegen im klassischen Prozessablauf kaum Optimierungspotenziale identifizieren werden konnten.

### 3. Erstellung des Soll-Zustands

Im Zuge der gezielten Ausrichtung auf eine umfassende Digitalisierung des Planungsprozesses ergeben sich vielfältige Optimierungspotenziale im vorgestellten Verlauf der Montageplanung. Eine maßgebliche Optimierung manifestiert sich in der Etablierung eines einheitlichen und nahtlosen Industrie 4.0-Systems, das als Single Source of Truth (SSOT) für die Erstellung von Planungsszenarien fungiert und den Namen „Digital Assembly Planner“ (DAP) trägt. Abbildung 40 stellt den entworfenen Idealprozess dar. Der DAP greift mittels „Application Programming Interfaces“ (APIs) auf die einschlägigen Quellsysteme zu, wodurch nahezu alle Systembrüche eliminiert werden können.

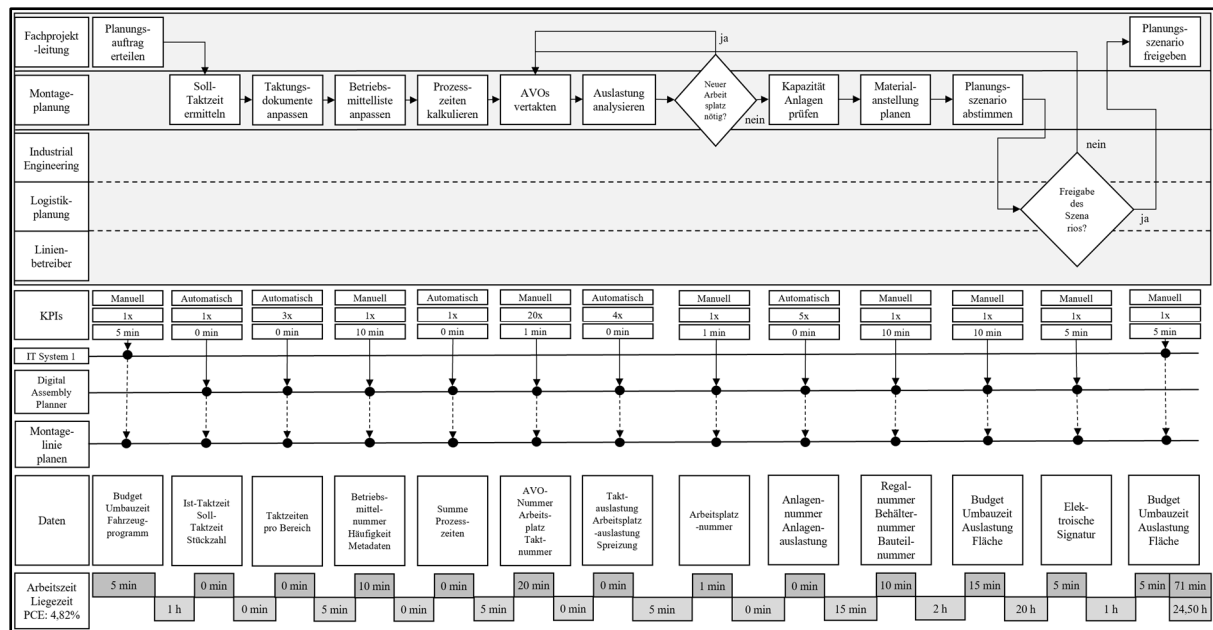


Abbildung 40: Entwickelter Soll-Prozess des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner

Mittels umfassender, algorithmengestützter Datenverarbeitung ist das System in der Lage, Planungsoperationen teilweise oder sogar gänzlich autonom auszuführen. Als Beispiel bedarf die Berechnung der Soll-Taktzeit keiner manuellen Ermittlung mehr. Diese Aufgabe wird automatisch im DAP durchgeführt. Auch eine automatische Aktualisierung der Taktungsdokumente erfolgt im System. Während fehlende Betriebsmittel nach wie vor manuell hinzugefügt werden müssen, geschieht dies jetzt innerhalb des DAP, ohne Informationen aus andere IT-Systeme sammeln zu müssen.

Die relevanten Prozesszeiten werden dem Planer im DAP als Vorschlag präsentiert, wobei eine manuelle Anpassung möglich ist. Im Hinblick auf die Zuweisung von Arbeitsvorgängen zu den Arbeitsplätzen stellt der DAP dem Planer eine intuitive Benutzeroberfläche zur Verfügung, die mit automatischen Auslastungsberechnungen für jeden Arbeitsplatz sowie für die relevanten ortsfesten Großanlagen ausgestattet ist. Die Planung der Materialanstellung kann von System vier im Rahmen eines 2D Layouts in ein 3D Layout im DAP überführt werden. Das erstellte Planungsszenario wird automatisch in standardisierter Form erstellt und beinhaltet die Ergebnisse aller relevanten Prozessschritte. Durch die vollständige und standardisierte Dokumentation ist eine signifikante Verkürzung des Abstimmungsprozesses möglich.

Auf Basis des abgestimmten Planungsszenarios im DAP erfolgt die finale Freigabe der Planung sowie die zentrale Datenablage. Der DAP wird dabei so konzipiert, dass die Ergebnisse früherer Planungsszenarios als Wissen- und Erfahrungsbasis in neue Planungen integriert werden. Geplant ist hierbei eine KI-gestützte Assistenzfunktion, die sich auf Grundlage der Nutzereingaben weiterentwickelt und im Endausbauzustand ein vollautomatisches, ganzheitlich optimiertes Planungsszenario entwickelt. Dieses kann der Planer entweder direkt oder nach manuellen Anpassungen freigeben, sodass eine abschließende hierarchische Freigabe theoretisch nicht nötig ist.

Die Gesamtdurchlaufzeit des Soll-Prozesses beträgt 25,68 Stunden. Davon sind 1,18 Stunden wertschöpfende Planungstätigkeit und 24,50 Stunden nicht wertschöpfende Liegezeit. Die PCE beträgt im Soll-Zustand 4,82 Prozent.

#### **4. Vergleich von Ist- und Soll-Zustand**

Der visuelle als auch der KPI-basierte Vergleich von Ist- und Soll-Zustand offenbart erhebliche Effizienzsteigerungen durch die Entwicklung und Implementierung des DAP. So kann die Gesamtdurchlaufzeit von 61,45 auf 25,68 Stunden um ca. 68 Prozent reduziert werden, was die Flexibilität und Reaktionsfähigkeit bei Planungsanfragen deutlich steigert. Dadurch ist auch der Ressourceneinsatz aufseiten der Planung signifikant von 2,75 auf 1,18 Stunden pro Planungsauftrag reduziert worden. Die hauptsächliche Ursache dafür liegt in der

Automatisierung von zuvor manuellen Datenhandlingstätigkeiten des Planers. Hinzu kommen Assistenzfunktionen, die zu weniger Fehlern und schnelleren Planungsoperationen führen. Der reduzierte Abstimmungsaufwand durch die systemgestützte Szenarienerstellung und Dokumentation führt zu weiteren erheblichen Verbesserungen im Gesamtprozess. Die Gesamtheit der Optimierungen zeigt sich auch in der Prozesszykluseffizienz, die sich von 4,69 auf 4,82 Prozent steigern lässt. Im Vergleich zum stark manuell getriebenen Ist-Zustand erfolgt die Szenarienerstellung im Soll-Zustand weitgehend systemgestützt. Zentraler Digitalisierungseffekt ist zudem die Durchführung des gesamten Planungsprozesses im DAP ohne Systembrüche. Dieser Umstand bedeutet insbesondere auf der Seite der laufenden Kosten eine Erhöhung, die durch erhebliche Betriebskosten für Software, Hardware, Support und Wartung entstehen. Zudem basiert der Planungsprozess auf einem standardisierten Workflow, welcher die Prozesseffektivität deutlich steigert.

### 5.1.3 Schritt 3: Capability Analyse

Aus der vorgestellten Prozessanalyse lassen sich die Capabilities des DAP ableiten. Die Hauptfähigkeit der Lösung besteht in der Planung von Montagelinien. Daher sind die ersten beiden Ebenen der Capability Map mit Planung durchführen und Montagelinien planen definiert. Hierarchisch darunter angesiedelt, sind die Teilprozesse aus dem Soll-Prozess auf Ebene drei visualisiert. Diese sind: Anlagen planen, Materialanstellung planen, Arbeitsvorgänge planen, Taktung planen, Mitarbeiterauslastung planen und Planung absichern. Die Analyse der bestehenden, stark lückenhaften Capability Map im Unternehmen ergab, dass bereits alle identifizierten Capabilities einem zumeist monolithischen IT-System<sup>38</sup> zugeordnet waren, jedoch keine zentralisierte Datenzusammenführung existierte. Was wieder bedeuten würde, dass ein neues IT-System in erster Instanz nicht nötig gewesen wäre, da kein „Weißer Fleck“ in der Systemlandschaft identifiziert werden konnte. Das SSOT-Konzept stellt jedoch eine neue Dimension des systemübergreifenden Datenmanagements dar (DelVecchio 2020) und bietet dadurch die Entwicklung serviceorientierter Systemarchitekturen<sup>39</sup>. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde innerhalb des Architekturboards eine eingehende Diskussion über die Relevanz einer solchen Industrie 4.0 Lösung geführt.

Nach umfangreichen Abstimmungen wurde die architektonische Freigabe des DAP unter der Auflage bewilligt, dass keine bidirektionalen Schnittstellen zu den Quellsystemen

---

<sup>38</sup> Monolithische Systeme sind stets als untrennbare Einheit gestaltet, die keine Gliederung in Teilsysteme beinhaltet und somit Anpassungen nur mit großem Aufwand ermöglicht (Fink 2012).

<sup>39</sup> Microservices sind kleinere Funktionseinheiten von Applikationen, die über APIs miteinander kommunizieren und modular zur Softwareentwicklung herangezogen werden können (Easy Software 2019).

implementiert werden. Der Grund dafür ist auf die aufwendigen arbeitsprozessualen Veränderungen in Bezug auf die Datenpflege im DAP anstelle der alten Quellsystemen zurückzuführen. Durch diese Entscheidung musste zwar eine zentrale Funktionalität der Software zurückgezogen werden, jedoch konnte auf Basis der Capability Analyse ein einheitliches Verständnis und eine abgestimmte Entscheidung für die Industrie 4.0 Lösungen erzeugt werden. Zudem sanken die Kosten um ca. 500.000 Euro und ca. ein Jahr Entwicklungszeit.

#### 5.1.4 Schritt 4: Technologiebewertung/-auswahl

Da der DAP eine vollständige Neuentwicklung mit einer grundlegend neuen Systemarchitektur darstellt, begann ein zweimonatiges, internes wie externes Technologiescouting. Die Anforderungen der internen IT- und Systemarchitekten an die Technologie waren dabei:

##### **1. Cloudfähigkeit**

Zur Sicherstellung eines zukunftsorientierten, effizienten und unternehmensweit standardisierten Datenmanagements wurde eine Anbindung an die im Aufbau befindliche interne digitale Datenplattform als Entwicklungsprämisse festgesetzt. Die Entkopplung von der bisherigen Form der Datenspeicherung und -verarbeitung soll dabei kostenintensive Individualhardware reduzieren und gleichzeitig Performance und Verfügbarkeit steigern (Bachmann 2020).

##### **2. Serviceorientierte Systemarchitektur**

Serviceorientierte Systemarchitekturen erlauben die Verknüpfung von Prozessen und Systemen mittels Webservices. Die identifizierten Teilprozesse des fachlichen Soll-Zustands, werden als Microservices entwickelt und stehen somit anderen Softwareentwicklungsprojekten als modulare, echtzeitfähige Elemente zur Verfügung (BMW i und BMBF 2020).

##### **3. Schnittstellenfähigkeit**

Durch sogenannte „Application Programming Interfaces“, kurz APIs, findet eine vereinheitlichte Datenübergabe zwischen Programmteilen statt. Eine API verbindet Software- und Hardwarekomponenten und ist die Grundlage für eine effiziente Wartung und Fehlerbehebung (Hery-Moßmann 2018). Für den DAP sind standardisierte APIs zwischen den Modulen definiert worden.

#### **4. Multi-Device-Fähigkeit**

Hierbei kann die entwickelte Applikation auf unterschiedlichen Endgeräten gleichermaßen verwendet werden und bietet dem Nutzer so größtmögliche Flexibilität (Schäftner 2018). Der DAP muss auf Windows-basierten Desktop PCs und Laptops sowie IOS basierten Smartphones und Tablets lauffähig sein.

#### **5. Mehrsprachigkeit**

Für die Applikationsnutzung innerhalb eines global agierenden Industrieunternehmens besteht die Notwendigkeit der Mehrsprachigkeit. Hierbei arbeitet der DAP mit externen Ressourcen-dateien im XML-Format. Diese können leicht übersetzt und ausgetauscht werden.

#### **6. Multimandantenfähigkeit**

Bei einer potenziellen Nutzeranzahl von hundertfünfzig Montageplanern ist eine effiziente und gemäß Datenschutzgrundverordnung konforme Verwaltung der einzelnen Nutzer auf Basis von Nutzerkonten und -daten unabdingbar. Multimandantensysteme arbeiten diesbezüglich mit plattformbasierten Softwarelösungen eines Serviceanbieters, die mehreren Endnutzern zur Verfügung gestellt werden (Kerkhoff 2010).

#### **7. Moderne Programmiersprache:**

Im Vordergrund stand hierbei der Vergleich der beiden Webframeworks „Angular“ und „React“. Da „Angular“ jedoch ein von Google 2010 entwickeltes Framework darstellt und als Open Source Software publiziert wird, wurde aus IT-Sicherheits- und Lizenzrechtsgründen das Java Script-basierte, von Facebook 2013 entwickelte Webframework „React“ als Programmiersprache festgelegt (Daityari 2020).

##### **5.1.5 Schritt 5: Kosten-/Nutzenanalyse**

Zur umfassenden Ermittlung der relevanten Kosten- und Nutzenaspekte wurden Fachexpertenworkshops initiiert, bei denen Teilnehmer aus den Bereichen Montage, Montageplanung, Digitalisierung, Facharchitektur und Finanzcontrolling involviert waren. Die Strukturierung dieser moderierten Workshops basierte auf dem im Rahmen dieser Forschungsarbeit ausgearbeiteten Vorgehensmodell. Die einzelnen Nutzenaspekte wurden mittels ihrer charakteristischen Beschreibungen als Grundlage für Diskussionen und Entscheidungen herangezogen.

Für eine präzise Nutzenquantifizierung war es unerlässlich, Prämissen und Basiskennzahlen für die detaillierten Berechnungen festzulegen. Die nachfolgenden Kosteneinsparungen beruhen auf einer Annahme von fünfunddreißig Wochenstunden, zweiundvierzig Arbeitswochen pro

Jahr, einem Personalkostensatz von 120.000 Euro jährlich und einer durchschnittlichen Nutzerzahl von einhundertfünfzig bzw. einhundertsechundsechzig Personen, wobei das maximale Nutzerpotenzial bei dreihundert Personen liegt.

Die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells für die Kosten-Nutzen-Analyse erbrachte im Vergleich zur initialen Vorabschätzung eine detailliertere, wenn auch geringere finanzielle Einsparung. Die Ergebnisse der Capability-Analyse, die insbesondere die Eliminierung von bidirektionalen Schnittstellen beinhaltete, führten zu einer wesentlichen Reduzierung des finanziellen Aufwands für Entwicklung und Projektlaufzeit, was sich positiv auf die Gesamtkalkulation auswirkte.

In der ursprünglichen Nutzenabschätzung waren lediglich die Reduzierung manueller Tätigkeiten, die Beseitigung von Doppelarbeit und die Verminderung von Abstimmungsbedarf für Einsparungen von 3,8 Millionen Euro verantwortlich. Nach der detaillierten Analyse basiert die errechnete Einsparung von 2,9 Millionen Euro auf acht Steuergrößen und elf Quantifizierungsoptionen.

Der kalkulierte Nutzen basiert zwar nach wie vor teilweise auf Expertenschätzungen, stellt jedoch eine plausiblere und ausführlichere Grundlage für Entscheidungen dar. Die Erstellung dieses Nutzenmodells erforderte die Mitarbeit eines Teams erfahrener Mitarbeiter über einen Zeitraum von circa vier Wochen. Zudem verdeutlicht die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells zur Kosten-Nutzen-Ermittlung, dass durch die gewählten Steuergrößen sämtliche fünfzehn Ergebniskennzahlen abgedeckt werden.

Tabelle 9 beinhaltet die detaillierte Schätzung der Entwicklungs-, Implementierungs- und Betriebskosten für den DAP. Dabei ergeben sich sechs Kostenkategorien, die zu Gesamtaufwendungen in Höhe von 2,4 Millionen Euro für die dreijährige Entwicklungs- und Implementierungsphase führen. Die dominierenden Positionen stellen hierbei die Entwicklungskosten sowie die internen Personalkapazitäten dar.

Nutzenaspekt	Quantifizierung	Kalkulationsdetails	Nutzen
Nutzerfreundlichkeit	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	10 Minuten a 150 Planer x 42 Wochen	85.750 €
	Reduzierter Einarbeitungsaufwand	5 Minuten a 166 Planer x 42 Wochen	47.500 €
	Reduzierte Bedienzeit	5 Minuten a 166 Planer x 42 Wochen	47.500 €
Value Chain Integration	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	10 Minuten a 150 Planer x 42 Wochen	85.750 €
	Reduzierter Abstimmungsaufwand	10 Minuten a 150 Planer x 42 Wochen	85.750 €
	Reduzierte Doppelarbeit und Planungsaufwand	10 Minuten a 150 Planer x 42 Wochen	85.750 €
Modularisierung	Reduzierte Entwicklungskosten für Folgeprojekte	20% weniger Entwicklungskosten für 1 Folgeprojekt	100.000 €
Standardisierung	Reduzierter Einarbeitungsaufwand	2 Wochen weniger für 10 neue Planer pro Jahr	57.000 €
	Reduzierte Schulungskosten	für 10 Planer a 2.500€	25.000 €
Wissens- & Erfahrungsmanagement	Reduzierter Abstimmungsaufwand	5 Minuten a 166 Planer x 42 Wochen	47.500 €
	Reduzierter Nacharbeitsaufwand	5 Minuten a 166 Planer x 42 Wochen	47.500 €
	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	5 Minuten a 166 Planer x 42 Wochen	47.500 €
	Reduzierte Investitionskosten	10% weniger Fehlinvestitionen	1.000.000 €
Assistenzsysteme	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	45 Minuten a 150 Planer x 42 Wochen	427.000 €
	Reduzierter Personaleinsatz in der Fertigung	5 Personen pro Montagelinie	585.500 €
Datenkonsistenz	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	10 Minuten a 150 Planer x 42 Wochen	85.000 €
	Reduzierte Doppelarbeit	5 Minuten a 166 Planer x 42 Wochen	47.500 €
Arbeitsergonomie	Reduzierte Fluktuationsquote	5 Personen pro Jahr, dadurch kein Anlernprozess nötig	12.500 €
<b>Gesamtnutzen</b>			<b>2.920.000 €</b>
<b>Kostenaspekt</b>			
	<b>Rubrik</b>	<b>Kalkulation</b>	<b>Kosten</b>
Entwicklungskosten	Neuentwicklung Software	3 Jahre a 300.000 €	900.000 €
	Personalkosten	3 Jahre a 3 Personen	1.080.000 €
Inbetriebnahmekosten	Reisekosten	3 Personen a 10.000 € pro Jahr	90.000 €
	Qualifizierungskosten	4 Stunden pro Planer a 150 Planer	49.800 €
Betriebskosten	Intern	50.000 € pro Jahr	150.000 €
	Service-/Wartungskosten inklusive Supportkosten	50.000 € pro Jahr	150.000 €
<b>Gesamtkosten</b>			<b>2.419.800 €</b>

Tabelle 9: Kosten-/Nutzenanalyse des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner

### 5.1.6 Schritt 6: Risiko- und Unsicherheitsanalyse

Die Definition zukünftiger Umweltzustände und potenzieller Einflussfaktoren für die ökonomische Analyse, die als Grundlage für die Entwicklung von Szenarien dient, gestaltete sich als komplex. Obwohl eine Vielzahl möglicher Einflussfaktoren identifiziert werden konnte, gestaltete sich die Zuweisung von Eintrittswahrscheinlichkeiten und ihre tatsächliche Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit als problematisch, da die Bewertungen der involvierten Prozessexperten stark voneinander abwichen.

Daher wurden im Rahmen des TEI-Ansatzes nur wenige Einflussfaktoren und Umweltzustände vorab definiert, wobei lediglich grobe Prozentwerte für die Auswirkungen auf die Kosten- und Nutzenentwicklung berücksichtigt wurden (CioWiki 2018).

Dies entspricht auch den praxisorientierten Bewertungsverfahren, die von Kesten et al. (2006) als Kombination aus Szenario- und Risikozuschlagsanalyse definiert wurden (Kesten et al. 2006, S. 23). Die Details der einzelnen Szenarien sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Das pessimistische Szenario basiert auf der Annahme, dass lediglich 75 Prozent der möglichen einhundertfünfzig Nutzer das Produkt verwenden und gleichzeitig die Entwicklungskosten um 25 Prozent steigen. Infolgedessen führt dies zu einem negativen Business Case. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Szenarios beträgt 0,15, was näher am realistischen Szenario liegt als die optimistische Variante. Diese geht von einer Kostenreduzierung von lediglich 10 Prozent und einer 25-prozentigen Erhöhung des Nutzerkreises aus, was einen Überschuss von etwa 1,7 Millionen Euro ergibt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wurde auf 0,1 festgelegt. Hingegen unterscheidet sich das realistische Planungsszenario 2 nur minimal von der ursprünglichen Kosten-Nutzen-Kalkulation. Es wurden lediglich 10 Prozent Puffer sowohl für die Kosten als auch für den Nutzen berücksichtigt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Szenarios liegt mit 0,35 nur geringfügig unter der des realistischen Szenarios 1.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das realistische Szenario 1 einen stabilen Business Case darstellt. Eine geringfügige Reduzierung des Nutzens um 10 Prozent in Verbindung mit einer leichten Kostensteigerung um ebenfalls 10 Prozent führt jedoch nahezu zu einem Nullsummenspiel. Darüber hinaus befindet sich die Eintrittswahrscheinlichkeit des pessimistischen Szenarios mit 0,15 in einem kritischen Bereich.

	Kosten	Erhöhung/ Reduzierung	Nutzen	Erhöhung/ Reduzierung	Erwartungs- wert
Pessimistisches Szenario	3.000.000 €	25%	2.180.000 €	-25%	0,15
Realistisches Szenario 1	2.420.000 €	0%	2.920.000 €	0%	0,4
Realistisches Szenario 2	2.650.000 €	10%	2.620.000 €	-10%	0,35
Optimistisches Szenario	2.170.000 €	-10%	3.880.000 €	25%	0,1

Tabelle 10: Risiko- und Unsicherheitsanalyse des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner

Um die Fortschritte im Projektverlauf regelmäßig kontrollieren zu können, wurde ein intensives, drei-monatiges Reporting in einem interdisziplinären Steuerkreis vereinbart. Das Ziel dieser Maßnahme bestand in der Sicherstellung von Personalkapazitäten und Geldmitteln, sowie in der Möglichkeit, situativer Entscheidungen über die weiteren Entwicklungsschritte. Zudem wurde vereinbart, dass die Geldmittel in Jahresscheiben und in Abhängigkeit der drei Entwicklungsstufen freigegeben werden.

### 5.1.7 Schritt 7: Investitionsbewertung

Die in Tabelle 10 dargestellten absoluten Kosten- und Nutzenwerte der einzelnen Szenarien sind in Tabelle 11 auf die einzelnen Jahresscheiber der geplanten Projektlaufzeit von drei Jahren heruntergebrochen. Die Kostenverläufe weisen zumeist konstante Werte pro Jahr auf, da von einer stetigen Entwicklung mit gleichbleibenden Ressourcen ausgegangen wird. Lediglich im optimistischen Szenario wird von einer Reduzierung der Kosten im dritten Jahr ausgegangen. Dahingegen weisen die Nutzenverläufe je Szenario unterschiedliche Strukturen auf. Grundlage dafür ist die Annahme, dass die Nutzengenerierung zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgt. So beginnt der Nutzeinsatz der pessimistischen Variante erst im zweiten Jahr und die Nutzenkurve verläuft flacher als bspw. im Vergleich zum optimistischen Szenario.

	2020	2021	2022	Summen
<b>Pessimistisches Szenario</b>				
Kosten	1.000.000 €	1.000.000 €	1.000.000 €	3.000.000 €
Nutzen	- €	750.000 €	1.430.000 €	2.180.000 €
<b>Realistisches Szenario 1</b>				
Kosten	806.600 €	806.600 €	806.600 €	2.419.800 €
Nutzen	150.000 €	900.000 €	1.870.000 €	2.920.000 €
<b>Realistisches Szenario 2</b>				
Kosten	883.300 €	883.300 €	883.300 €	2.649.900 €
Nutzen	- €	870.000 €	1.750.000 €	2.620.000 €
<b>Optimistisches Szenario</b>				
Kosten	800.000 €	800.000 €	570.000 €	2.170.000 €
Nutzen	250.000 €	1.250.000 €	2.380.000 €	3.880.000 €

Tabelle 11: Kosten-/Nutzenverlauf der vier Trendszenarien des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner

Die Kalkulationsergebnisse der vier Investitionskennzahlen: Statische Amortisationsdauer, Dynamische Amortisationsdauer, Kapitalwert und Kapitalrendite je Szenario sind in Tabelle 12 aufgeführt. Als Grundlage für die Kennzahlenermittlung wurde ein Kapitalzinssatz von 9 Prozent verwendet. Seitens des Finanzcontrollings bestand die Vorgabe, für Industrie 4.0 Investitionen eine Amortisationsdauer von zwei Jahren nicht zu überschreiten.

	Statische Amortisation	Dynamische Amortisation	Kapitalwert	Kapitalrendite
Pessimistisches Szenario	>2	>2	- 564.000 €	-
Realistisches Szenario 1	1,5	1,6	212.000 €	35%
Realistisches Szenario 2	>2	>2	- 107.000 €	-
Optimistisches Szenario	1,1	1,1	901.000 €	127%

Tabelle 12: Investitionskennzahlen der vier Trendszenarien des Industrie 4.0 Projekts Digital Assembly Planner

Als Basis für die finale Investitionsbewertung wurde das realistische Szenario 1 herangezogen. Im Laufe der Diskussion konnte durch die ermittelten Kennzahlen auf Grundlage der unterschiedlichen Szenarien eine transparente und zielgerichtete Bewertung des DAPs

erfolgen. Bei der abschließenden Genehmigung der Investition war den involvierten Parteien bewusst, dass ein solider Business Case vorliegt, jedoch die Möglichkeit für eine Negativverschiebung im Verlauf des Projekts aufgrund zahlreicher unvorhersehbarer Einflussfaktoren durchaus signifikant war. Trotz dieser Erkenntnis wurde eine positive Investitionsentscheidung getroffen, die von sämtlichen Projektbeteiligten, einschließlich Portfoliomanagement und Controlling, unterstützt wurde.

## 5.2 Praxisprojekt 2: Autonomes Flurförderzeug

Im folgenden Kapitel findet an einem CPS aus dem direkten Bereich des innerbetrieblichen Transports des Gewerks Logistik eines Produktionsunternehmens die Validierung der entwickelten ex-ante Bewertungssystematik statt. Das FTS Projekt wurde ausgewählt, da der Vergleich von Ist- und Soll-Zustand einen der höchsten Automatisierungs- bzw. Digitalisierungsgrade im Gewerk Logistik des gesamten Unternehmens aufweist. Das CPS in Form eines FTS (Endres und Sejdic 2018, S. 347 f.) erfüllt alle im Rahmen dieser Arbeit definiert Kriterien an eine Industrie 4.0 Lösung: Vernetzung von Systemen, Systemgestützte Datenerfassung, Algorithmengestützte Datenverarbeitung, verbesserte Reaktionsfähigkeit und Flexibilität bei Prozessveränderungen und Ressourceneffizienz.

### 5.2.1 Schritt 1: Vorprüfung

#### **1. Projekttitle**

Da sich das vorliegende Projekt mit dem automatisierten innerbetrieblichen Transport von Fahrzeugen im Bereich des Fahrzeugversands beschäftigt, wurde der Projektname „Autonomous Delivery Unit“ (ADU) festgelegt.

#### **2. Problemstellung**

Im Bereich des Fahrzeugversands, insbesondere bei der manuellen Zuweisung von Fahrzeugen zu Verladezielen per Bahn oder LKW, wird heutzutage eine große Anzahl von Mitarbeitern eingesetzt. Diese Mitarbeiter legen täglich weite Strecken zwischen den Quellen und Zielen der Aufträge zurück. Die Kommunikation erfolgt größtenteils mittels Handheld-Geräten, Telefonen und physischen Versandscheinen. Diese Vorgehensweise führt häufig zu unzureichender Abstimmung, Fehlern bei der Buchung und einem erhöhten Bedarf an Planung und Steuerung. Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzorte, sei es in geschlossenen Hallen, halboffenen Parkhäusern oder in freiliegenden Flächen, sind die Mitarbeiter den vielfältigsten

klimatischen Einflüssen ausgesetzt, die sich im Tages- und Jahresverlauf ändern. Dies geschieht unter Umständen ohne ausreichenden Schutz vor den Witterungseinflüssen.

Zusätzlich zu den klimatischen Bedingungen müssen die Mitarbeiter lange Laufstrecken zurücklegen und während des Transports auf wenig ergonomisch eingestellten Fahrzeugsitzen Platz nehmen. Darüber hinaus ist der Transport der Fahrzeuge über mehrere Stunden hinweg eine wenig herausfordernde und monotone Tätigkeit. Ein weiterer Aspekt ist, dass der Fahrzeugversand ein Termingeschäft ist, bei dem es teilweise zu starken Schwankungen in der Arbeitsbelastung für die Mitarbeiter kommen kann. Wenn unerwartete Faktoren wie Mitarbeiterausfälle aufgrund von Krankheit oder anderen unvorhergesehenen Ereignissen auftreten, erhöht sich die Arbeitsbelastung für die verbleibenden Mitarbeiter. Dies kann sogar zu Verzögerungen bei der Lieferung der Fahrzeuge führen.

### **3. Zielstellung**

Zur Bewältigung der zuvor beschriebenen Herausforderungen wird vorgeschlagen, eine Flotte autonomer Flurförderfahrzeuge einzusetzen, die sämtliche erforderlichen Transportaufträge unter Berücksichtigung von Schwarmintelligenz automatisch abwickelt. Die Transportaufträge werden elektronisch an die dezentrale Steuerungseinheit der autonomen Flurförderfahrzeug-Flotte übermittelt und können verschiedene Quellen und Zielorte im Transportbereich betreffen. Die Recheneinheit der ADU ermittelt anhand von Faktoren wie Beladungszustand, Fortschritt der Auftragsabwicklung, Position, Energielevel und Entfernung den am besten geeigneten ADU für jeden Transportauftrag. Dieser Auftrag wird in Echtzeit an das entsprechende Flurförderfahrzeug übertragen.

Die ADU navigiert eigenständig zum Ort des versandbereiten Fahrzeugs und nimmt dieses mithilfe eines Hubkonzepts mit vier Gabeln an Vorder- und Hinterachse auf, ähnlich einem Gabelstapler. Der Transport zum Zielort erfolgt vollautomatisch und sensorbasiert, ohne manuelle Eingriffe. Während des Transports wird bereits der nächste Auftrag in die Planung einbezogen und die ADU setzt ihre Bewegung ohne Unterbrechung zum nächsten Fahrzeug fort. Der Einsatz von ADUs ermöglicht die Einsparung von Mitarbeiterressourcen und die Übertragung unergonomischer operativer Tätigkeiten auf steuernde und planende indirekte Aufgabenprofile. Dank der hohen Verfügbarkeit und der intelligenten Schwarmflotte der ADUs können Kapazitätsspitzen effektiver bewältigt und unnötige Kommunikationsschleifen eliminiert werden.

#### **4. Nutzerkreis und Zielgruppen**

Der Nutzerkreis umfasst die Logistikplanung, die regelmäßig die eingesetzten ADU-Kapazitäten in Abhängigkeit des Dispositionsvolumens anpassen muss. Dies erfolgt zwar im Rahmen der Schwarmintelligenz des Systems automatisch, bedarf bei größeren Schwankungen aber menschlicher Anpassung. Zum Nutzerkreis gehören ebenfalls die operativen Betreiber der ADUs, welche die tägliche Steuerung übernehmen und den Betrieb sicherstellen. Da die Einführung manuelle durch automatisierte Transporte ersetzen soll, sind die operativen Logistikmitarbeiter durch den Wegfall ihrer Tätigkeit am stärksten betroffen.

#### **5. Zeitschiene und Meilensteine**

Die Projektlaufzeit wurde mit drei Jahren zwischen 2020 und 2022 angesetzt. Die drei Meilensteine spiegeln die Jahresscheiben wider. Der erste lauffähige Prototyp sollte Ende 2020 fertiggestellt sein. Der Roll-out von vier ADUs mit einer Tageskapazität von ca. 350 Fahrzeugen war bis Ende 2021 geplant. Der Endausbauzustand bis Ende 2022 umfasst die Abdeckung des kompletten Transportbereichs und Transportvolumens mit acht ADUs und einer Tagetransportmenge von ca. 600 Fahrzeugen.

#### **6. Kosten/Nutzen Schätzung**

Die Nutzenaspekte des Projektes liegen in erster Linie in der Einsparung von Mitarbeiterkosten, die durch den effizienteren und kostengünstigeren Einsatz der ADUs vollständig eliminiert werden. Die Kosten eines Logistikmitarbeiters liegen in Summe bei ca. 90.000 Euro pro Jahr. Zudem ermöglichen die ADUs eine Steigerung der Prozesseffizienz durch kontinuierlich optimierte Transportrouten, was zu einer Erhöhung der Umschlagleistung pro Stunde führt. Die sensorbasierte Navigation der ADUs trägt dazu bei, Schäden an den Fahrzeugen während der Be- und Entladung sowie des Transports zu minimieren. Die vorläufige Berechnung des erwarteten Nutzens summiert sich auf ungefähr 3,0 Millionen Euro über die Dauer des Projekts. Die größten Kostenaspekte bilden der Kaufpreis und die laufenden Betriebs-, Service- und Wartungskosten. Zur Überwachung der Systeme ist ein zusätzlicher, höher qualifizierter Mitarbeiter erforderlich. Ferner sind Anpassungen an der Infrastruktur erforderlich, damit die ADUs problemlos operieren können. Die Grobkalkulation der Kosten beläuft sich auf ca. 2,6 Millionen Euro über die Projektlaufzeit.

#### **7. IT-Systemanalyse**

Eine grobe Analyse der vorherrschenden Hardware- und Systemlandschaft im Umfeld der Transportlogistik ergab, dass bisher keine vergleichbare Lösung im Unternehmen existiert und somit eine vollständige Neuintegration notwendig wurde.

## 8. Prämissen und Annahmen

Für die drei Jahre Projektlaufzeit der ADU Integration wurden folgende allgemeine Prämissen und Annahmen durch das Projekt formuliert:

- Interne Ressourcen für die Betreuung der Integration stehen über die gesamte Projektlaufzeit zur Verfügung und sind in ihrer Besetzung möglichst stabil.
- Der Gesamtnutzen kann nur durch eine durchgängige Finanzierung, insbesondere externer Dienstleister erzielt werden.
- Die technologische Basis sowie der Anbieter der ADUs bleibt im Projektverlauf gleich. Lediglich Weiterentwicklungen von Hard- und Software sind als Anpassungen einzuplanen.
- Der Einsatzbereich wird einmalig räumlich definiert und im Projektverlauf nicht mehr verändert.
- Um den Gesamtnutzen am Projektende erzielen zu können, müssen die finanziellen Einsparungen durch die Reduzierung von operativen Mitarbeitern umgesetzt werden.

### 5.2.2 Schritt 2: Prozessanalyse 4.0

#### 1. Erfassung des Ist-Zustands

Der dargestellte Ist-Prozess in Abbildung 41 umfasst drei wesentliche Akteure: die Logistikplanung, den operativen Logistikmitarbeiter und den Verloader. Der Prozessbeginn erfolgt mit der Erstellung eines Transportauftrags in System eins, wobei die Transportdisposition eine überwachende und gegebenenfalls korrigierende Rolle einnimmt. Anschließend wird der Transportauftrag überwiegend elektronisch an die Handheld-Geräte des operativen Logistikmitarbeiters übermittelt, wobei vereinzelt auch noch auf Ausdrucke zurückgegriffen wird. Der Mitarbeiter wird durch eine Benachrichtigung informiert und öffnet entweder den digitalen oder liest den auf Papier vorliegenden Transportauftrag.

Ein zentraler Aspekt für den Transport ist die Identifizierung des Standorts des zu verladenden Fahrzeugs. Nach Festlegung der Parkposition begibt sich der Logistikmitarbeiter zum Ort des Fahrzeugs. Häufig auftretende Standortunsicherheiten führen zu zeitaufwändigen Suchvorgängen seitens des Mitarbeiters. Angekommen am Standort, erfolgt das Scannen des Barcodes des Fahrzeugs mittels Handheld. Hierbei kommt es regelmäßig zu Verzögerungen, da ungünstige Witterungsbedingungen oder sich ändernde Lichtverhältnisse die direkte Erfassung des Barcodes behindern können. Anschließend steuert der Logistikmitarbeiter das Fahrzeug zum vorgegebenen Verladebereich. Bei der Ankunft erfolgt ein weiterer,

fehleranfälliger Scan-Vorgang mit dem Handheld, um das Fahrzeug systemseitig der entsprechenden Verladefläche zuzuordnen.

Die Übergabe der standardisierten Versanddokumente sowie etwaiger spezifischer Zusatzdokumente für beispielsweise grenzüberschreitende Transporte erfolgt an den Verloader. Dieser prüft die Dokumente auf Vollständigkeit und Richtigkeit, bestätigt den Empfang und vervollständigt den Prozess. Abschließend quittiert der Logistikmitarbeiter den erledigten Transportauftrag über das Handheld.

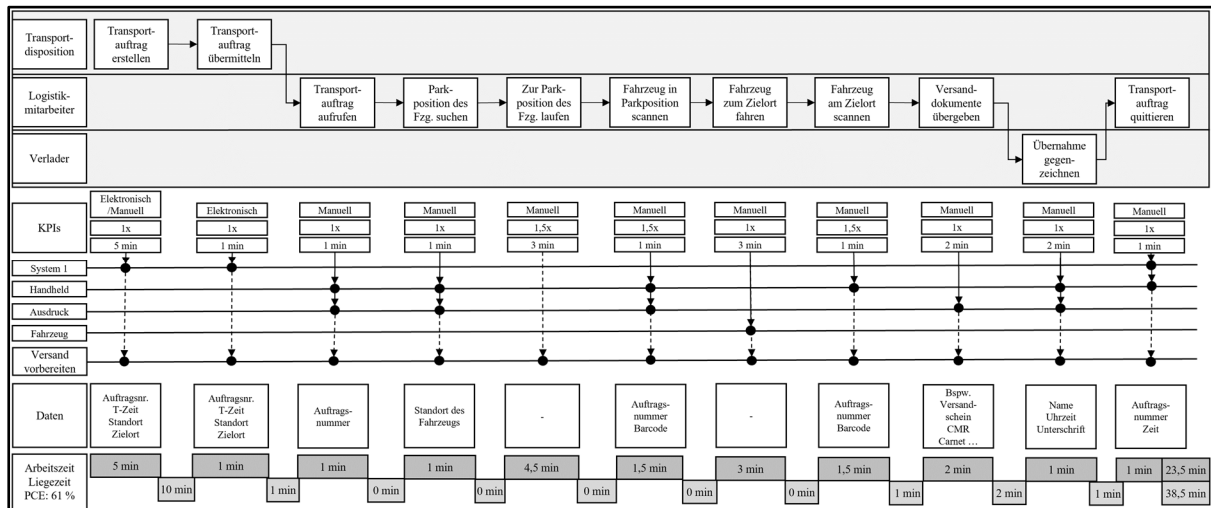


Abbildung 41: Ist-Prozessaufnahme des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit

## 2. Bewertung des Ist-Zustands

Der vorliegende Ist-Prozess zeigt insgesamt dreizehn Schwachstellen auf, die durch die Einführung einer Industrie 4.0-basierten Transportlösung adressiert werden sollen und in Abbildung 42 anschaulich dargestellt werden.

Die erste Schwachstelle betrifft den Systembruch (1) zwischen der Auftragsübermittlung in System eins und der anschließenden Darstellung des Auftrags auf dem Handheld-Gerät des Logistikmitarbeiters. Eine noch gravierendere Schwachstelle stellt der Systembruch (2) zwischen System eins und dem Transportauftrag sowie den physischen Versanddokumenten dar. Dieser Zustand birgt das Risiko, dass Dokumente entweder gar nicht, unvollständig oder verspätet übergeben werden, was die gesamte Durchlaufzeit des Transportprozesses negativ beeinflusst. Der nachfolgende Punkt drei (3) steht in Verbindung mit Punkt vier (4). Hierbei führen die elektronischen Informationen auf dem Handheld in Kombination mit einer Vielzahl von ausgedruckten Dokumenten zu unnötigen Suchprozessen.

Das manuelle Laufen des Logistikmitarbeiters zum Fahrzeug (5) erweist sich als eine der größten Schwachstellen im Prozess und kann als ineffiziente Ressourcennutzung betrachtet werden. Da die tatsächlichen Parkpositionen häufig von den systemseitigen Informationen

abweichen (6), ergeben sich wiederholt überflüssige Suchaktivitäten seitens des operativen Mitarbeiters. Der fehleranfällige Scan-Prozess mittels Barcode-Technologie (7 und 9) führt dazu, dass dieser Schritt in einigen Fällen mehrfach ausgeführt werden muss. Die größte Schwachstelle des Prozesses ist die manuelle Fahrt zum Zielort (8). Das Fahrzeug wird manuell vom Mitarbeiter gesteuert, was zu unnötigen Laufleistungen und Beschädigungspotenzialen führt. Die damit verbundene Treibstoffverbrennung belastet zudem die Umwelt. Die wiederholten Ein- und Ausstiege während des Transports stellen in Anbetracht der hohen Frequenz eine unergonomische Belastung für den Mitarbeiter dar.

Die Übergabe von Versanddokumenten in physischer Form an den Verloader (10) ist als fehleranfällig einzustufen und muss eliminiert werden. Die manuelle Übernahme, Prüfung und Unterzeichnung der Versand- und Zusatzdokumente in Papierform (11, 12 und 13) bringt ebenfalls vielfältige Fehlerquellen mit sich. Dies führt zu vergleichsweise langen Durchlaufzeiten dieses Prozessschrittes.

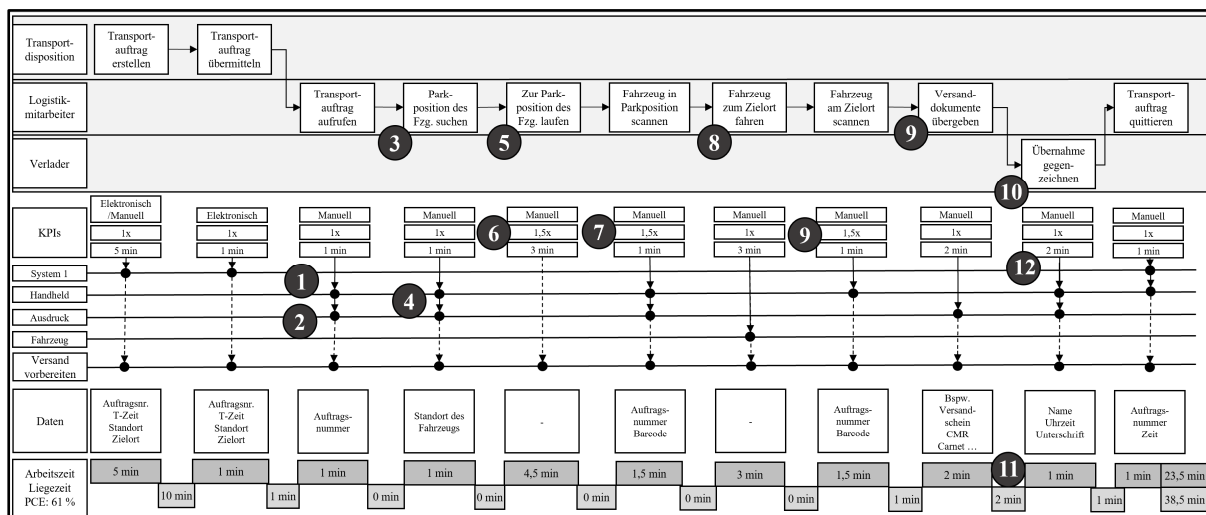


Abbildung 42: Schwachstellenanalyse des Ist-Prozesses des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit

### 3. Erstellung des Soll-Zustands

Mit dem Ziel der umfassenden Automatisierung und Digitalisierung des Transports sowie der Dokumentenübergabe ergeben sich vielfältige Optimierungsmöglichkeiten im beschriebenen Versandvorbereitungsprozess. Eine zentrale Maßnahme zur Optimierung besteht in der Implementierung eines einheitlichen autonomen Transportsystems, das die menschlichen Transportaktivitäten ersetzt. Zusätzlich wird eine Anpassung in System ein vorgenommen, um die Dokumentenverwaltung zukünftig elektronisch abzuwickeln.

Wie in Abbildung 43 veranschaulicht, ändern sich die grundlegenden Prozessschritte nur geringfügig, während gleichzeitig die prozessualen Verantwortlichkeiten zwischen den drei Prozessbeteiligten angepasst werden. Wo im Ist-Prozess noch Übergänge zwischen

elektronischen und manuellen oder papiergestützten Abläufen vorhanden sind, wird im optimierten Prozess die gesamte Abwicklung durch elektronische Systeme realisiert. Diese Umstellung ermöglicht eine schnellere und fehlerfreie Kommunikation zwischen den Beteiligten. Der Mitarbeiter wird im optimierten Prozess durch das ADU ersetzt.

Auffällig ist, dass die Prozessschritte Transportauftrag aufrufen, Fahrzeug in Parkposition scannen, Fahrzeug am Zielort scannen und Transportauftrag quittieren mit einer Durchlaufzeit von 0 Minuten bewertet sind. Während der Logistikmitarbeiter diese Schritte sequenziell ausführt, kann das ADU diese parallel zum Transport ausführen, wodurch die Prozesszeit in der Transportzeit aufgeht. Die reduzierte Transportgeschwindigkeit der ADUs führt jedoch zu einer längeren Durchlaufzeit für die reinen Transportprozesse. Dadurch verringert sich durch den Einsatz der ADUs jedoch das Risiko für Fahrzeugbeschädigungen.

Weiterhin können durch den Einsatz der ADUs Treibstoff eingespart und Emissionen reduziert werden. Die Überarbeitung von System eins ermöglicht die elektronische Übermittlung der Versand- und Zusatzdokumente sowie die elektronische Prüfung und Bestätigung des Empfangs durch den Verlager. Diese Maßnahme spart ebenfalls Zeit im Gesamtprozess ein.

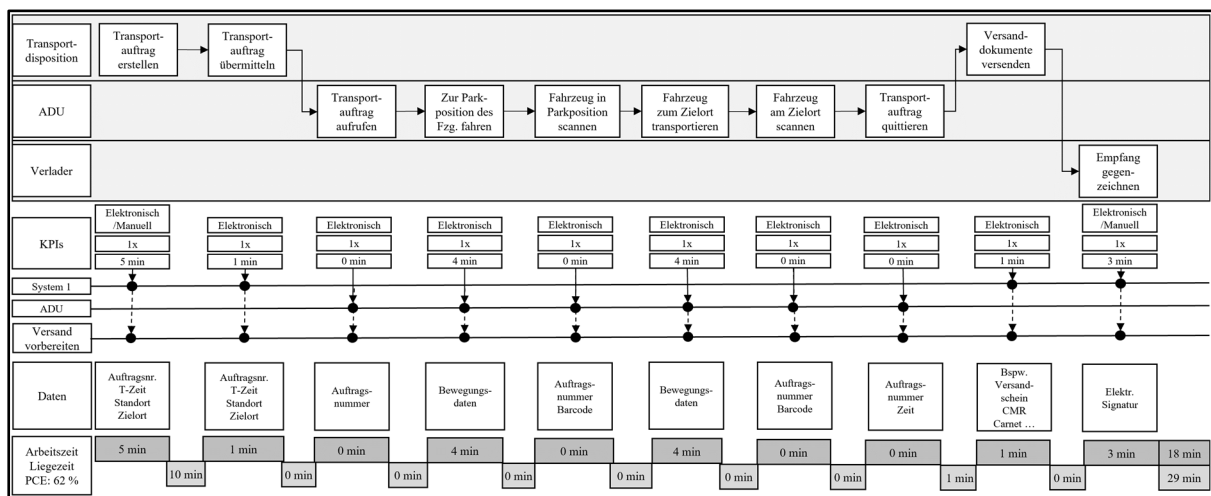


Abbildung 43: Entwickelter Soll-Prozess des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit

#### 4. Vergleich von Ist- und Soll-Zustand

Der direkte Vergleich von Ist- und Soll-Prozess zeigt, dass insbesondere die Bearbeitungszeit im Prozess von 23,5 Minuten um ca. 24 Prozent auf 18 Minuten reduziert werden konnte, was in erster Linie der konsequenten Nutzung der ADUs zuzuschreiben ist. Die Gesamtdurchlaufzeit des Versandvorbereitungsprozesses sinkt von 38,5 Minuten um ca. 25 Prozent auf 29 Minuten. Das Verhältnis von Bearbeitungs- und Gesamtdurchlaufzeit zwischen Ist- und Soll-Prozess verändert sich nur leicht. Die PCE steigt von 61 auf 62 Prozent. Bis auf die stichprobenbasierten manuellen Kontrollprozesse im ersten und letzten Schritt verändert sich

der Prozess grundlegend. Die menschliche Komponente des Logistikmitarbeiters wird vollständig durch eine Automatisierungslösung ersetzt, was prozessual betrachtet vielfältige Vorteile bringt.

### 5.2.3 Schritt 3: Capability Analyse

Aus der vorgestellten Prozessanalyse lassen sich die Capabilities des Versandvorbereitungsprozesses ableiten. Die Hauptfähigkeit der Industrie 4.0 Lösung besteht in dem Transport von Fahrzeugen zur Verladezone. Daher sind die ersten beiden Ebenen der Capability Map mit Transportprozess durchführen und Versandprozess vorbereiten definiert. Hierarchisch darunter angesiedelt sind die Teilprozesse aus dem Soll-Prozess auf Ebene drei. Diese sind: Transportauftrag erstellen, Transportprozess durchführen, Fahrzeugposition scannen, Transportauftrag quittieren und Versanddokumente versenden.

Die Analyse der bestehenden, für diesen Teilprozess teilweise vorhandenen logistischen Capability Map im Unternehmen ergab, dass lediglich eine identifizierte Capability eine Zuordnung zu einem IT-System (System 1) besaß. Da System eins inhaltlich und funktional weiterentwickelt werden sollte, konnte kein Handlungsbedarf bzgl. eines Potenzials für eine asynchrone IT-Systemlandschaft festgestellt werden. Die Analyse der zugehörigen Hardwarelösungen im Bereich der Flurförderzeuge in der Unternehmenslogistik ergab, dass im Unternehmen keine vergleichbare Lösung im Einsatz war. Somit konnte ein ausführlicher Technologieevaluierungs und -auswahlprozess gestartet werden.

Auf Basis der Capability Analyse fand eine Diskussion im Architektur- und Technologieboard des Unternehmens über die Notwendigkeit einer ADU-basierten Industrie 4.0 Lösung für den Versandvorbereitungsprozess statt. Da durch die Capability Analyse aufgezeigt werden konnte, dass keine vergleichbare Lösung im Unternehmen existiert und die Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit durch die Fachabteilungen nachweisbar war, erhielt das Projekt die formale Freigabe. Es erging jedoch die Auflage, dass der Projektfortschritt sowie die weitere Umsetzungsroadmap quartalsweise in Architektur- und Technologieboard vorzustellen sind, um bei Scopeveränderungen des Projekts Asynchronitäten der IT-Systemlandschaft und operativen Logistikhardware langfristig verhindern zu können.

### 5.2.4 Schritt 4: Technologiebewertung/-auswahl

Im ersten Schritt der Suche nach einer geeigneten Technologie und einem geeigneten Hersteller stellte das Projektteam die relevanten Kriterien für die Bewertung der möglichen Lösungen zusammen. Wie Abbildung 44 zeigt, konnten insgesamt sieben Bewertungskriterien mit

unterschiedlichen Gewichtungen identifiziert werden, deren Bewertung anhand einer Skala von eins bis drei erfolgte. Die Bewertungskriterien sind: Verfügbarkeit, Transportleistung, Präzision und Navigation, Anschaffungskosten, Betriebskosten und -aufwand, Wartung- und Servicekosten, Ladedauer.

Basierend auf den vorgegebenen Bewertungskriterien wurde über einen Zeitraum von vier Monaten in Zusammenarbeit mit einer Technologieberatung eine Reihe bereits am Markt vorhandener Lösungen evaluiert. Diese wurden mit der Option einer Eigenentwicklung verglichen. Aufgrund des hohen Reifegrads der bestehenden Lösungen wurde die Option einer Eigenentwicklung aus Kostengründen frühzeitig ausgeschlossen. Jedoch wurde erkannt, dass die kommerziell verfügbaren Lösungen nicht sämtliche Anforderungen erfüllten. Infolgedessen wurde eine zusätzliche Analyse des Weiterentwicklungspotenzials der einzelnen Lösungen durchgeführt. Da die identifizierten Lösungen ähnliche Potenziale zur Weiterentwicklung zeigten, war keine zusätzliche Bewertungskategorie erforderlich.

Kriterien	Gewichtung	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3
Verfügbarkeit	30%	2	3	1
Transportleistung	25%	1	3	2
Präzision & Navigation	15%	2	3	1
Anschaffungskosten	10%	2	1	2
Betriebskosten/-aufwand	10%	2	1	2
Wartung & Servicekosten	5%	3	2	2
Ladedauer	5%	3	3	2
<b>Ergebnis:</b>	<b>100%</b>	<b>1,85</b>	<b>2,55</b>	<b>1,55</b>

Abbildung 44: Ergebnis der Technologieauswahl des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit

In einem Pilotbereich mit vergleichbaren Rand- und Rahmenbedingungen wie dem beabsichtigten Einsatzbereich wurden insgesamt drei technische Lösungen evaluiert. Die Ergebnisse dieser Evaluierung sind in Abbildung 44 veranschaulicht. Es wird deutlich, dass Lösung 2 klar als bevorzugte Variante hervorgeht. Insbesondere in den hoch gewichteten Bewertungskriterien erzielt Lösung 2 jeweils die maximale Punktzahl von drei Punkten. Obwohl bei dieser Lösung im Vergleich zu den anderen beiden höhere Anschaffungs- und Betriebskosten anfallen, haben diese Kosten aufgrund ihrer geringeren Gewichtung nur

einen geringfügigen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Nach dem Abschluss des Technologieauswahlprozesses wurde eine Implementierungsroadmap bzgl. der Integration der technischen Lösung in die Infrastruktur des Unternehmens sowie relevanter Freigaben in Unternehmensgremien erstellt.

#### 5.2.5 Schritt 5: Kosten-/Nutzenanalyse

Zur umfassenden Ermittlung der relevanten Kosten- und Nutzenaspekte wurden Expertenworkshops durchgeführt, an denen Teilnehmer aus den Bereichen Logistikplanung, Technikplanung, IT-Infrastrukturplanung und -betrieb sowie operative Logistik beteiligt waren. Diese Workshops wurden gemäß dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehensmodell strukturiert und moderiert. Die Steckbriefe der individuellen Nutzenaspekte dienten als Grundlage für Diskussionen und Entscheidungsfindungen.

Um den Nutzen im Detail darstellen zu können, war es notwendig, Annahmen und Grundwerte für die einzelnen Berechnungen festzulegen. Alle nachfolgend aufgeführten Einsparungen basieren auf einer fünfunddreißig Stunden Woche, zweiundvierzig Arbeitswochen pro Jahr, einem Personalkostensatz von 120.000 Euro pro Jahr für indirekte Mitarbeiter und 90.000 Euro pro Jahr für direkte Mitarbeiter sowie einem Drei-Schicht-System.

Wie in Tabelle 13 veranschaulicht, liefert die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells zur Kosten-/Nutzenermittlung unter Berücksichtigung der Steuergrößen ein differenzierteres Bild im Vergleich zur Vorabprüfung. Die Kosten- und Nutzenwerte weichen von den groben Planungen ab. Die durchgeführte Capability-Analyse zeigte keine Einschränkungen oder Abhängigkeiten auf, wodurch auch keine signifikanten Anpassungen der Kosten-/Nutzenanalyse notwendig waren.

Die ursprüngliche Schätzung des Nutzens bezog sich hauptsächlich auf die Reduzierung der Anzahl operativer Mitarbeiter, die Verringerung der Durchlaufzeit durch umfassende Prozessdigitalisierung und die Minderung von Fahrzeugbeschädigungen während des Transports, was zu geschätzten Einsparungen von 3,0 Millionen Euro führte. Eine detaillierte Analyse dieser drei Nutzenaspekte ergab deutlich abweichende Werte im Vergleich zur groben Kalkulation.

<b>Nutzenaspekt</b>	<b>Quantifizierung</b>	<b>Kalkulation</b> (pro Jahr)	<b>Nutzen</b>
Echtzeitsteuerung	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	210 Minuten x 2 Mitarbeiter	327 €
	Reduzierte Stillstandskosten	840 Minuten x 2 Mitarbeiter	1.314 €
Value Chain Integration	Reduzierter Planungsaufwand	420 Minuten x 1 Mitarbeiter	327 €
	Reduzierter Abstimmungsaufwand		
Standardisierung	Reduzierter Einarbeitungsaufwand	5 Mitarbeiter pro Jahr a 5 Tage	7.500 €
	Reduzierter Schulungsaufwand	5 Mitarbeiter pro Jahr a 2 Tage	3.000 €
Autonome Systeme	Reduzierte Flächenkosten	1300 m <sup>2</sup> x 50 € pro Quadratmeter	195.000 €
	Reduzierte Nacharbeitskosten	100 Fzg. x 850 €	255.000 €
	Reduzierter Mitarbeiterereinsatz (DLZ)	9,5 Minuten x 250 Transporte x 240 Tage	445.314 €
	Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	10 x 90.000 €	2.700.000 €
Datenkonsistenz	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	1260 Minuten x 2 Mitarbeiter	2.625 €
	Reduzierte Doppelarbeit	420 Minuten x 2 Mitarbeiter	593 €
<b>Gesamtnutzen</b>			<b>3.611.000 €</b>
<b>Kostenaspekt</b>	<b>Kostenart</b>	<b>Kalkulation</b>	<b>Kosten</b>
Entwicklungskosten	Anpassungskosten Hardware	Kostenschätzung des Herstellers	100.000 €
	Personalkosten	3 Jahre a durchschnittlich 1 Mitarbeiter	360.000 €
Inbetriebnahmekosten	Personalkosten	5 Wochen Support a 1 Mitarbeiter	2.500 €
	Qualifizierungskosten	1 Mitarbeiter pro Jahr a 5 Tage	1.500 €
Beschaffungskosten	Hardwarekosten	8 x 284.375 €	2.275.000 €
Betriebskosten	Personalkosten	3 Jahre a durchschnittlich 0,7 Mitarbeiter	263.750 €
	Service-/Wartungskosten inklusive Supportkosten	3 Jahre a 20.000 €	60.000 €
	Energiekosten	8 x 9 kWh x 16 Stunden x 240 Tage x 0,15 € pro kWh	41.250 €
<b>Gesamtkosten</b>			<b>3.104.000 €</b>

Tabelle 13: Kosten-/Nutzenanalyse des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit

Nach der Detailanalyse basiert das Einsparungsergebnis von 3.611.000 Euro auf fünf Steuergrößen und zwölf Quantifizierungsoptionen. Der kalkulierte Nutzen basiert teilweise auf Expertenschätzungen, da für einige Nutzenaspekte keine konkreten Sekundärdaten zur Verfügung standen. Nichtsdestotrotz bildet der so ermittelte Nutzen eine glaubwürdigere, weil detailliertere Entscheidungsbasis. Mit der Erstellung war das interdisziplinäre Team ca. drei Wochen beschäftigt. durch die getroffene Auswahl an Steuergrößen alle fünfzehn Ergebnisgrößen abgebildet sind.

Tabelle 13 beinhaltet zudem die detaillierte Kostenschätzung für die Entwicklungs-, Inbetriebnahme-, Beschaffungs- und Betriebskosten der ADUs. Dabei fallen acht Kostenrubriken an, die Gesamtkosten für die dreijährige Entwicklungs- und Implementierungsphase in Höhe von 3.104.000 Euro erzeugen. Die größten Blöcke stellen hierbei die Hardwarekosten für die ADUs und die Infrastrukturmaßnahmen sowie die internen Personalkapazitäten dar. Die ermittelten Kosten liegen auch hier deutlich über den initial ermittelten Werten der Vorprüfung.

## 5.2.6 Schritt 6: Risiko und Unsicherheitsanalyse

Analog dem ersten Validierungsbeispiel stellte die Definition zukünftiger Umweltzustände und möglicher Einflussfaktoren für die Wirtschaftlichkeitsbewertung eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Obwohl eine Vielzahl potenzieller Einflussfaktoren identifiziert werden konnte, gestaltete sich die Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie ihrer tatsächlichen Auswirkungen als herausfordernd. Dies war auf die Notwendigkeit von Expertenschätzungen und die mangelnde Übereinstimmung der Schätzwerte innerhalb des Projektteams zurückzuführen. Basierend auf dem TEI-Ansatz wurden daher nur einige wenige Einflussfaktoren und Umweltzustände vorab festgelegt, deren Auswirkungen auf die Kostenentwicklung lediglich in groben Prozentwerten erfasst wurden. Im Rahmen dieses Validierungsbeispiels wurden ebenfalls vier Szenarien von dem Projektteam entworfen. Die Einzelheiten dieser Szenarien sind in Tabelle 14 veranschaulicht.

Der initiale Zustand der Kosten-/Nutzenanalyse wird im realistischen Szenario 1 beschrieben. Die Eintrittswahrscheinlichkeit beträgt 0,3. Ausgehend von diesem Szenario entwickelte das Team drei alternative Ansätze. Das pessimistische Szenario geht von einer Kostensteigerung um 15 Prozent und einer Nutzenreduzierung um 10 Prozent im Vergleich zum realistischen Szenario 1 aus. Aufgrund einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,1 ist dieses Szenario als wenig wahrscheinlich einzustufen. Infolgedessen resultiert in diesem pessimistischen Szenario ein negativer Business Case. Das realistische Szenario 2 umfasst eine Kostensteigerung um 5 Prozent und eine gleichzeitige Nutzenreduzierung um ebenfalls 5 Prozent. Mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,5 ist dieses Szenario am wahrscheinlichsten und weist einen leicht positiven Business Case auf. Im optimistischen Szenario wird angenommen, dass die Kosten um 10 Prozent niedriger sind als ursprünglich geplant und der Nutzen um 5 Prozent höher ist als im realistischen Szenario 1. Dadurch ergibt sich ein deutlich positiver Business Case. Das optimistische Szenario weist mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,1 einen geringen Wert auf.

	Kosten	Erhöhung/ Reduzierung	Nutzen	Erhöhung/ Reduzierung	Erwartungs- wert
Pessimistisches Szenario	3.569.000 €	15%	3.250.000 €	-10%	0,1
Realistisches Szenario 1	3.104.000 €	0%	3.611.000 €	0%	0,3
Realistisches Szenario 2	3.259.000 €	5%	3.431.000 €	-5%	0,5
Optimistisches Szenario	2.794.000 €	-10%	3.792.000 €	5%	0,1

Tabelle 14: Risiko- und Unsicherheitsanalyse des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die beiden realistischen Szenarien mit den höchsten Eintrittswahrscheinlichkeiten zwar einen wirtschaftlich positiven, jedoch relativ schwache Business Case darstellen. Insbesondere das wahrscheinlichste Szenario 2 verzeichnet bereits ohne Einbeziehung eines Kapitalkostenzinssatzes über die dreijährige Projektlaufzeit einen Überschuss von lediglich 172.000 Euro.

### 5.2.7 Schritt 7: Investitionsbewertung

Die in Tabelle 14 dargestellten absoluten Kosten- und Nutzenwerte der entwickelten Szenarien sind in Tabelle 15 auf die einzelnen Jahresscheiben der geplanten Projektlaufzeit von drei Jahren heruntergebrochen. Die Kostenverläufe der Szenarien steigen im ersten Jahr aufgrund der initialen Investitionen für die Hardware stark an und flachen in den beiden Folgejahren deutlich ab. Dieser grundlegende Kostenverlauf ist allen Szenarien gemein.

	2020	2021	2022	Summen
<b>Pessimistisches Szenario</b>				
Kosten	2.950.000 €	350.000 €	269.000 €	3.569.000 €
Nutzen	250.000 €	1.050.000 €	1.950.000 €	3.250.000 €
<b>Realistisches Szenario 1</b>				
Kosten	2.200.000 €	750.000 €	154.000 €	3.104.000 €
Nutzen	950.000 €	1.356.000 €	1.305.000 €	3.611.000 €
<b>Realistisches Szenario 2</b>				
Kosten	2.500.000 €	500.000 €	259.000 €	3.259.000 €
Nutzen	750.000 €	1.150.000 €	1.531.000 €	3.431.000 €
<b>Optimistisches Szenario</b>				
Kosten	1.950.000 €	450.000 €	394.000 €	2.794.000 €
Nutzen	1.150.000 €	1.285.000 €	1.357.000 €	3.792.000 €

Tabelle 15: Kosten-/Nutzenverlauf der vier Trendszenarien des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit

Im Gegensatz dazu verzeichnen die Nutzenverläufe pro Szenario eine entgegengesetzte Dynamik und erreichen erst im dritten Jahr das Höchstniveau. Nur das optimistische Szenario plant nahezu kontinuierliche Nutzensteigerungen. Die Nutzenverläufe der anderen drei Szenarien beruhen auf der Annahme, dass die ADUs im ersten Jahr signifikant höhere Kosten als Nutzen generieren, da die neue Technologie eingeführt und ausführlich erprobt werden muss. Erst in den nachfolgenden Jahren ist es möglich, im Rahmen eines stabilen Serienbetriebs größere Einsparungen zu realisieren.

Die Ergebnisse der Kalkulation für die vier Investitionskennzahlen - statische Amortisationsdauer, dynamische Amortisationsdauer, Kapitalwert und Kapitalrendite - für jedes Szenario sind in Tabelle 16 detailliert aufgeführt. Bei der Berechnung der Kennzahlen wurde ein Kapitalzinssatz von 9 Prozent zugrunde gelegt. Das Finanzcontrolling hatte die Vorgabe

definiert, dass Investitionen im Bereich Industrie 4.0 eine statische Amortisationsdauer von unter 2 Jahren aufweisen müssen. Infolgedessen erfüllt das pessimistische Szenario diese Anforderung nicht, und auch Szenario 2 überschreitet mit einer dynamischen Amortisationsdauer von 2,1 Jahren knapp diese Grenze. Zusätzlich weisen die Kapitalwerte für diese beiden Szenarien negative Werte auf. Das ursprüngliche realistische Planungsszenario 1 erfüllt mit 1,6 bzw. 1,7 Jahren die Amortisationsvorgabe und weist mit einem Kapitalwert von 179.000 Euro und einer Kapitalrendite von 23 Prozent solide Kennzahlen auf.

	Statische Amortisation	Dynamische Amortisation	Kapitalwert	Kapitalrendite
Pessimistisches Szenario	>2	>2	- 418.000 €	-
Realistisches Szenario 1	1,6	1,7	179.000 €	23%
Realistisches Szenario 2	1,9	>2	- 54.000 €	6%
Optimistisches Szenario	1	1	505.000 €	74%

Tabelle 16: Investitionskennzahlen der vier Trendszenarien des Industrie 4.0 Projekts Autonomous Delivery Unit

Da die Einführung der ADUs soziale, prozessuale und auch technologische Herausforderungen bedeutet und das Unternehmen keine Erfahrungswerte in diesem Bereich der Industrie 4.0 Lösungen aufwies, wurde das realistische Szenario 2 als Entscheidungsgrundlage herangezogen. Da bei diesem Szenario bei zwei von vier Kennzahlen die Vorgaben nicht erreicht werden konnten, wurde die Investition abgelehnt. Im Laufe der Diskussion konnte durch die ermittelten Kennzahlen auf Basis der unterschiedlichen Szenarien eine transparente und zielgerichtete Wirtschaftlichkeitsbewertung des ADUs erfolgen. Bei der finalen Ablehnung der Investitionen war allen Akteuren klar, dass kein solider Business Case besteht, dessen weitere Negativverschiebung im Projektverlauf auf Basis einer Vielzahl an Unvorhersehbarkeiten als sehr wahrscheinlich einzustufen war.

### 5.3 Zwischenergebnis: Anwendbarkeit und Erkenntnisgewinn

Die Validierung des entwickelten ex-ante Bewertungsansatzes für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik wurde auf Basis von zwei Industrie 4.0 Projekten vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Vorgehensweise im betrieblichen Umfeld effizient eingesetzt werden kann und die erwarteten Ergebnisse erzeugt.

**Schritt 1** konnte von interdisziplinären Projektteams innerhalb von zwei bis vier Wochen abgearbeitet werden. Die zentrale Erkenntnis aus der Erarbeitung des Projektsteckbriefs im Rahmen der Vorprüfung bestand darin, dass Industrie 4.0 Lösungen sehr komplexe Strukturen aufweisen und somit allein mit dem Know-how aus dem auftraggebenden Fachbereich nicht ausreichend beschreibbar sind. Neben Vertretern aus dem Fachbereich sind Teilnehmer aus der IT, der Facharchitektur und der Digitalisierung, sowie idealerweise dem Entwicklungs-

dienstleister notwendig. Die Abarbeitung der acht Vorprüfungsschritte erzeugt einen ausreichenden Reifegrad einer Projektgrobbeurteilung, um die weiteren Bewertungsschritte zielführend bearbeiten zu können. Es stellte sich weiterhin heraus, dass die Informationsbeschaffung in Schritt 1 zeitlich zu begrenzen und durch eine designierte Person zu strukturieren und zu monitoren ist. Alle Projektmitglieder sind regelmäßig darauf hinzuweisen, dass in diesem Schritt eine grobe Bewertung der Industrie 4.0 Lösung im Mittelpunkt steht und die strukturierte Analyse in den Folgeschritten erfolgt.

**Schritt 2** wurde von den teilnehmenden Personen zeitlich stark unterschätzt. Die geplanten zwei bzw. vier Workshoptage reichten für die Bearbeitung der Prozessanalyse 4.0 nicht aus. Insgesamt benötigte das Projektteam sechs bzw. acht Wochen um die Prozessanalyse abzuschließen. Wichtige Erkenntnisse bestanden darin, dass die Digitalisierung des Prozesses nicht vollumfänglich möglich ist und dass ein Großteil der Durchlaufzeit auf internen Abstimmprozessen basiert, die nur bedingt beeinflussbar sind. Die Einbeziehung eines neutralen Moderators ist als zwingend erforderlich einzustufen. Für die Sammlung der relevanten Systeme und Prozessdaten ist ausreichend Recherchezeit und Personalressourcen einzuplanen. Zudem ist darauf zu achten, dass Zielzustände entwickelt werden, die im jeweiligen Unternehmenskontext realisierbar sind.

Um **Schritt 3** effizient abarbeiten zu können, ist eine vollständige Capability Map des Unternehmens als Vergleichsgrundlage erforderlich, was sich in der Praxis bei beiden Validierungsprojekten als Herausforderung zeigte. Zusätzlich müssen die fachlichen und technischen Capabilities unternehmensweit standardisiert beschrieben sein, sodass eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Auch diese Anforderung war bei beiden Projekten nicht durchgängig gegeben, sodass die Projektteams bei der Verortung der Industrie 4.0 Lösungen in der IT-System- und Hardwarelandschaft nach bestem Wissen und Gewissen vorgehen mussten. Bei der Komplexität der IT-Systemlandschaft großer Unternehmen oder Konzerne empfiehlt sich die Erfassung, Abbildung und Steuerung der Capability Map in einem spezialisierten IT-System, welches in den Unternehmen der Validierungsprojekte noch im Aufbau befindlich war. Unvollständige Capability Maps können auch nur unvollständige Informationen bzgl. der Einordnung der zu entwickelnden Industrie 4.0 Lösung in die bestehende IT-System- und Hardwarelandschaft liefern, was die Ableitung von Anforderungen für beide Projektteams erschwerte.

Da der DAP und die ADUs ein komplett neues Entwicklungs- bzw. Integrationsprojekt darstellen, benötigte das Projektteam jeweils mehrere Wochen für die Auswahl der geeigneten und zukunftsfähigen Technologie in **Schritt 4** unter Zuhilfenahme einer externen

Technologieberatung, deren Unterstützung als sehr hilfreich einzustufen ist. Die Kernerkenntnis nach der Abarbeitung von Schritt 4 ist, dass die Auswahl einer geeigneten Technologie für Industrie 4.0 Lösungen als komplex einzustufen ist, da neben technischen und prozessualen Faktoren auch strategische, architektonische und soziale Aspekte zu berücksichtigen sind, die im Rahmen einer klassischen Nutzwertanalyse nur rudimentär berücksichtigt werden können.

Die Nutzung der Steckbriefe der relevanten Kosten- und Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen für die anschließende Kosten-/Nutzenbewertung wurde von den Teammitgliedern als leicht verständlich, gut strukturiert und hilfreich eingestuft. Die Schritt für Schritt Durchsprache der Steckbriefe förderte das Bewusstsein für die umfangreichen Wirkungen von Industrie 4.0 Lösungen sowie deren Messbarkeit und ermöglichte Diskussionen zu Nutzenpotenzialen, die sonst keine Berücksichtigung gefunden hätten. Auf Basis der Steckbriefe konnte eine Erstbewertung innerhalb weniger Stunden erstellt werden. Die größte Herausforderung lag jedoch in der Ermittlung der konkreten Zahlenwerte für die Quantifizierungsmöglichkeiten. Aus diesem Grund verlängerte sich die Bearbeitung von **Schritt 5** bei beiden Projekten um mehrere Wochen und fußte schlussendlich teilweise auf Expertenschätzungen. Als weitere Optimierung des Ansatzes ist die Rückmeldung der Teammitglieder in Bezug auf die große Anzahl an Quantifizierungsmöglichkeiten der Nutzenaspekte zu sehen. Hier ist eine erneute Betrachtung und sinnvolle Konsolidierung je Nutzenaspekt wünschenswert. Zudem ist die Einteilung der Nutzenaspekte in Steuer- und Ergebnisgrößen für die Nutzer verständlich und aus Gründen der Komplexitätsreduzierung theoretisch sinnvoll, jedoch konnten sich die Mitglieder der Projektteams auch eine Auflösung der hierarchischen Abhängigkeit vorstellen, sodass alle sechszwanzig Steckbriefe als Hilfestellung für die Kosten-/Nutzenbewertung genutzt werden können.

In **Schritt 6** wurde schnell klar, dass bei den vorliegenden Use Cases sowohl die Umweltzustände am Ende der drei Jahre Entwicklungs- bzw. Integrationszeit als auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten schwer zu bestimmen waren. Die Teams führten lange Diskussionen ohne konkrete Ergebnisse. Auch die Formulierung von Gegenmaßnahmen für die identifizierten Risiken und Unsicherheiten gerät schnell zu einer schwierigen Aufgabe, da viele Einflussfaktoren nicht oder nur schwer beeinflussbar sind und in der Peripherie des Geschäftsbereichs oder gar des Unternehmens liegen. Hierbei ist es zwingend erforderlich, sich auf die Risiken zu konzentrieren, die durch das Projektteam und die Fachabteilung beeinflussbar sind, um den Fokus der Diskussion zu wahren. Die Konzentration auf wenige Umweltzustände sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten in Verbindung mit einer

pauschalen, prozentualen Veränderung der Kosten- und Nutzenverläufe führte zu zielgerichteten Diskussionen.

Für die abschließende Investitionsbewertung in **Schritt 7** lagen alle notwendigen Informationen vor, um die Investitionskennzahlen effizient ermitteln zu können. Unter Zuhilfenahme der Ergebnisse der vorangegangenen Bewertungsschritte konnte eine zielgerichtete Diskussion mit dem Unternehmenscontrolling und dem Portfoliomanagement geführt und jeweils eine einstimmige Entscheidung getroffen werden. Insbesondere die ausschließlich monetäre Bewertung des Investitionsvorhabens wurde durch das Finanzcontrolling als positiv bewertet.

## 6 Zusammenfassung und kritische Würdigung

Im letzten Kapitel der Arbeit werden die erarbeiteten Erkenntnisse zur ex-ante Bewertung von Industrie 4.0 Investition in Produktion und Logistik zusammengefasst und kritisch gewürdigt. Zudem erfolgt die Formulierung des weiteren Forschungsbedarfs im Themenfeld sowie von Handlungsempfehlungen zur Anwendung des entwickelten Ansatzes in der Praxis.

### 6.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Das Ziel der vorliegenden Dissertation bestand in der Entwicklung einer praxistauglichen ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik, die auf Basis von ausschließlich monetär bewertbaren Kosten-/Nutzenkalkulationen erfolgt, um das Dilemma der fehlenden Vergleichbarkeit von monetären und nicht-monetären Nutzenaspekten zu überwinden. Dabei sollte als zentraler Forschungsschwerpunkt die Frage nach der Quantifizierbarkeit und Monetarisierbarkeit von Nutzenaspekten in Kombination mit der anwendergerechten und praxistauglichen Aufbereitung der Ergebnisse beantwortet werden, um operative Anwender bei der Kosten-/Nutzenanalyse gezielt zu unterstützen. Der ausschlaggebende Impuls für die Beschäftigung mit diesem Thema stammt aus der betrieblichen Praxis und basiert auf der Erkenntnis, dass lediglich monetär messbare Nutzenaspekte in die Investitionsbewertung Einzug finden. Qualitative Nutzenaspekte werden stets genannt, finden jedoch häufig keine Berücksichtigung.

Basierend auf der Erkenntnis, dass eine Vielzahl an Herausforderungen bei der Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen besteht, die durch eine einfache Kosten-/Nutzenanalyse nicht abgedeckt werden können, stellte sich zusätzlich die Frage nach einem phasenorientierten Vorgehensmodell, welches alle Herausforderungen adressiert und strukturiert methodische Lösungen aufzeigt.

Aus der Praxis für die Praxis, bestand die zentrale Anforderung an eine gesamtheitliche Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik in der Praxistauglichkeit und dem nutzerzentrierten Endanwenderfokus des entwickelten Vorgehensmodells.

Insgesamt konnten durch die Auswertung der relevanten wissenschaftlichen Literatur und der existierenden Bewertungsansätze für Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Investitionen fünf Forschungsfragen abgeleitet werden, deren Beantwortung im weiteren Verlauf des Kapitels in Form einer Zusammenfassung erfolgt.

***Forschungsfrage 1: Welche Kosten- und Nutzenaspekte sowie deren Bedeutung können für Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik identifiziert und validiert werden?***

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden insgesamt neununddreißig Experteninterviews mit Projektleitern von Industrie 4.0 Projekten geführt. Dabei stammten zwanzig Projekte aus indirekten und neunzehn aus direkten Unternehmensbereichen. Eine Vorauswahl der in Kapitel 2.1.3 definierten Kriterien für Industrie 4.0 Projekte stellte sicher, dass ausschließlich relevante Projekte aus den Bereichen Produktion und Logistik berücksichtigt wurden. Im Rahmen der Experteninterviews fand eine sequenzielle Abfrage nach den projektspezifisch relevanten Kosten- und Nutzenaspekten je Industrie 4.0 Lösung statt. Die Projektleiter konnten hierbei aus einem Katalog von insgesamt sechsunddreißig Referenznutzenaspekten auswählen. Die im Rahmen einer qualitativen Literaturrecherche in Kapitel 2.1.4 ermittelten sechsunddreißig Nutzenaspekte sind:

- Komplexitätsreduzierung
- Verbesserung der Reaktionsfähigkeit
- Standardisierung
- Modularisierung
- Value Chain Integration
- Usability/Nutzerfreundlichkeit
- Autonome Systeme
- Wissens- und Erfahrungsmanagement
- Assistenzsysteme
- Durchlaufzeitreduzierung
- Automatisierung
- Produktqualität
- Variantenflexibilität
- Volumenflexibilität
- Mitarbeiterinsatzflexibilität
- Engpasserkennung
- Individualisierung der Bedienoberfläche
- Mitarbeitervernetzung
- Mitarbeiterakzeptanz
- Arbeitsergonomie
- Virtuelle Absicherung
- Ausfallsicherheit
- Ressourceneffizienz
- Prozessqualität
- Skalierbarkeit
- Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen
- Echtzeitsteuerung
- Informationsverfügbarkeit
- Lernfähigkeit von Systemen
- Vernetzung der Systeme
- Datenkonsistenz
- Prozesseffektivität
- Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit
- Termintreue
- Bedarfsglättung
- Prozesstransparenz

Sobald ein Nutzenaspekt als zutreffend eingestuft werden konnte, zielten weitergehende Fragen auf den jeweiligen Nutzensauslöser und die Quantifizierungsmöglichkeiten ab, welche als Input für die Beantwortung von Forschungsfrage 3 Verwendung fanden. Als Dokumentationsformat der Ergebnisse der Interviews sind Steckbriefe der jeweiligen Nutzenaspekte entstanden (siehe Anhang 4), welche die zuvor erfragten Inhalte aggregiert abbilden und den operativen Anwendern als Bewertungsunterstützungsinstrument bei der Kosten-/Nutzenanalyse bereitstehen.

Die Auswertung der Interviewergebnisse ergab, dass vier von sechsunddreißig Nutzenaspekten zwar als Grundvoraussetzung für die Erreichung eines Nutzens gesehen werden, per se jedoch keinen Nutzen generieren und somit nicht weiter als Nutzenaspekt zu führen sind:

- Ausfallsicherheit
- Vernetzung der Systeme
- Lernfähigkeit von Systemen
- Mitarbeiterakzeptanz

Insgesamt reduzierte sich dadurch die Anzahl der relevanten Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik von sechsunddreißig auf zweiundzwanzig. Da aus einer praxisorientierten Sicht heraus zweiunddreißig komplexe Nutzenaspekte für eine effiziente Unterstützungslogik zur Nutzenbewertung für Projektleiter als zu viele einzustufen waren, folgte die weitere Optimierung der Nutzenaspektstruktur im Rahmen einer Focus Group. Hierbei konnte durch eine Redundanzprüfung festgestellt werden, dass sechs weitere Nutzenaspekte in anderen aufgehen und diese somit nicht weiter als separate Aspekte zu führen sind:

- Informationsverfügbarkeit geht auf in Datenkonsistenz
- Individualisierung der Bedienoberfläche geht auf in Usability/Nutzerfreundlichkeit
- Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen geht auf in Assistenzsysteme und Autonome Systeme
- Mitarbeitervernetzung geht auf in Value Chain Integration, Datenkonsistenz und Wissens- und Erfahrungsmanagement
- Automatisierung geht auf in Assistenzsysteme und Autonome Systeme
- Virtuelle Absicherung geht auf in Assistenzsysteme und Autonome Systeme

Nach Auswertung der Experteninterviews sowie der Focus Group können sechsundzwanzig relevante Nutzenaspekte für Industrie 4.0 Anwendungen dokumentiert werden:

- Komplexitätsreduzierung
- Verbesserung der Reaktionsfähigkeit
- Standardisierung
- Modularisierung
- Value Chain Integration
- Nutzerfreundlichkeit
- Autonome Systeme
- Wissens- und  
Erfahrungsmanagement
- Assistenzsysteme
- Durchlaufzeitreduzierung
- Produktqualität
- Variantenflexibilität
- Volumenflexibilität
- Arbeitsergonomie
- Ressourceneffizienz
- Prozessqualität
- Skalierbarkeit
- Echtzeitsteuerung
- Datenkonsistenz
- Prozesseffektivität
- Anforderungs- und  
Fertigungsgerechtigkeit
- Termintreue
- Bedarfsglättung
- Prozesstransparenz
- Mitarbeitereinsatzflexibilität
- Engpasserkennung

Bei den relevanten Kostenaspekten für Industrie 4.0 Projekten konnte bereits früh im Interviewprozess festgestellt werden, dass die konkrete Benennung, Definition und Quantifizierung für die Projektleiter keine vergleichbare Herausforderung darstellte, wie sie bei den Nutzenaspekten festgestellt werden konnte. Insgesamt konnten sechzehn Kostenaspekte, systematisiert durch vier Kostenarten, dokumentiert werden. Da die Ergebnisse zu den Kostenaspekten ausreichend strukturiert und als praxistaugliche Unterstützungslogik einzustufen sind, fand an dieser Stelle keine weitere Systematisierung statt. Die im Rahmen der Experteninterviews identifizierten relevanten Kostenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen in Produktion und Logistik sind:

- Informations- und  
Datenhandlingskosten
- Service-/ Wartungskosten
- Supportkosten
- Mietkosten
- Lizenzkosten
- Hardwarekosten
- Flächenkosten
- Energiekosten
- Beschaffungskosten Hardware
- Beschaffungskosten Software
- Anpassungskosten Hardware
- Anpassungskosten Software
- Neuentwicklungskosten Hardware
- Neuentwicklungskosten Software
- Personalkosten
- Reisekosten
- Qualifizierungskosten

***Forschungsfrage 2: Wie muss ein geeigneter Ordnungsrahmen zur Systematisierung der Nutzenaspekte aufgebaut sein, um zur Komplexitätsreduzierung bei der Kosten- und Nutzensauswahl beizutragen?***

Die Herangehensweise der Focus Group zur Optimierung der Nutzenaspektstruktur, mit dem Ziel einer Steigerung der Praxistauglichkeit, bestand zum einen in der bereits vorgestellten Konsolidierung und somit Eliminierung von sich inhaltlich überschneidenden oder ineinander aufgehenden Nutzenaspekten. Zum anderen stellte sich bei der Menge von sechsundzwanzig zur Auswahl stehenden Aspekten die Frage nach einer Systematisierung der Nutzenaspekte, um den Auswahlprozess für den Endanwender zu vereinfachen.

Die Frage nach der Systematisierung konnte von den Teilnehmern der Focus Group durch eine hierarchische Abhängigkeit beantwortet werden. Es existieren unter den Nutzenaspekten zwei Kategorien. Sogenannte Steuergrößen wie bspw. Standardisierung erzeugen einen direkten Nutzen. Ergebnisgrößen wie bspw. Ressourceneffizienz hingegen erzeugen keinen direkten Nutzen, sondern sind stets als aggregiertes Ergebnis von einzelnen Steuergrößen zu betrachten. Demzufolge sind lediglich die Steuergrößen durch die Projektleiter von Industrie 4.0 Lösungen direkt zu bewerten. Der Übertrag zu den zugehörigen Ergebnisgrößen erfolgt auf Basis der Übereinstimmung der ermittelten Quantifizierungsmöglichkeiten. Durch die Integration dieser Systemisierungslogik konnte die Anzahl der zur Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen relevanten Nutzenaspekten auf elf Steuergrößen reduziert werden. Die Zuordnung der Nutzenaspekte zu den Steuer- und Ergebnisgrößen ist wie folgt:

**Steuergrößen:**

- Modularisierung
- Value Chain Integration
- Standardisierung
- Echtzeitsteuerung
- Wissens- und Erfahrungsmanagement
- Usability/Nutzerfreundlichkeit
- Datenkonsistenz
- Arbeitsergonomie
- Bedarfsglättung
- Assistenzsysteme
- Autonome Systeme

**Ergebnisgrößen:**

- Produktqualität
- Engpasserkennung
- Prozessqualität
- Skalierbarkeit
- Prozesseffektivität
- Termintreue
- Ressourceneffizienz
- Reaktionsfähigkeit
- Mitarbeiterereinsatzflexibilität
- Variantenflexibilität
- Volumenflexibilität

### **Ergebnisgrößen:**

- Durchlaufzeitreduzierung
- Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit
- Prozesstransparenz
- Komplexitätsreduzierung

Ein Vorgehensmodell zur Kosten-/Nutzenanalyse für Projektteams von Industrie 4.0 Lösungen mit elf zur Auswahl stehenden Nutzenaspekten und sechzehn Kostenaspekten ist sowohl von den Teilnehmern der Focus Group als auch aufgrund der erfolgreichen Validierung an zwei Projekten aus dem betrieblichen Umfeld als praxisorientiert einzustufen.

***Forschungsfrage 3: Wie lassen sich die identifizierten Nutzenaspekte quantifizieren, monetär messbar machen und anwendergerecht sowie praxistauglich aufbereiten?***

Forschungsfrage 3 beschreibt den initialen Auslöser für die Beschäftigung mit dem Thema Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Lösungen. Im praktischen Umfeld üblich, finden lediglich monetär messbare Nutzenaspekte Eingang in die Investitionsbewertung. Qualitative Nutzenaspekte werden zwar genannt, aber häufig nicht berücksichtigt, was auf das grundlegende Dilemma der fehlenden Vergleichbarkeit von quantitativen und qualitativen Nutzenaspekten zurückzuführen ist.

Zur Beantwortung der Frage wurde im Rahmen der Experteninterviews die Methode der Wirkkettenanalyse in Kombination mit dem Monetarisierungsverfahren verwendet, um die monetär messbaren Wirkungen der einzelnen Nutzenaspekte zu ermitteln. Der Wirkungskettenanalyseansatz basiert auf der Erkenntnis, dass der direkte Nutzen häufig nicht messbar und nur durch weiterführende Analysen der Folgewirkungen ein monetär messbarer Nutzen ermittelbar ist. Hierbei ist darauf zu achten, dass nicht zu viele Folgewirkungen betrachtet werden, da sonst der Bezug zur eigentlichen Nutzengröße verloren gehen kann.

Es konnten für die relevanten sechsundzwanzig Nutzenaspekte sowohl projektspezifische Beispiele, Nutzensauslöser im Kontext Industrie 4.0 sowie Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten gefunden werden. Über alle Nutzenaspekte hinweg konnten insgesamt dreiunddreißig Quantifizierungsmöglichkeiten identifiziert werden, die in vier Kategorien unterteilt sind. Eine detaillierte Aufstellung der Quantifizierungsmöglichkeiten ist in Kapitel 4.2.2 nachzulesen. Dadurch kann als allgemeingültiges Ergebnis dieser Arbeit festgehalten werden, dass die übliche Trennung in qualitative und quantitative Nutzenaspekte

nicht erforderlich ist und somit die damit verbundenen Herausforderungen bei der Vergleichbarkeit eliminiert werden können. Über die Methode der Wirkungskettenanalyse ist es möglich, jeden Nutzenaspekt zu quantifizieren und somit auch zu monetarisieren.

Die Frage nach der anwendergerechten und praxistauglichen Aufbereitung der Quantifizierungs- und Monetarisierungsergebnisse in Form von Nutzenbibliotheken wird durch die aggregierten Informationen in den Steckbriefen der einzelnen Nutzenaspekte beantwortet, die in Anhang 4 nachzuschlagen sind. Projektleiter müssen nicht länger zeitaufwändige Wirkungskettenanalysen individuell je Industrie 4.0 Projekt durchführen sondern können auf eine Bibliothek an Kosten-/Nutzenaspekten inklusive Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten zurückgreifen und somit den Aufwand für die Kosten-/Nutzenanalyse signifikant reduzieren.

***Forschungsfrage 4: Weisen Industrie 4.0 Lösungen in direkten und indirekten Unternehmensbereichen in Produktion und Logistik unterschiedliche Kosten-/Nutzenaspekte auf und stellen somit unterschiedliche Anforderungen an eine Kosten-/Nutzenanalyse?***

Da die Analyse der dreiundzwanzig Bewertungsansätze zur Investitionsbewertung von Industrie 4.0, Digitalisierungs- und IT-Lösungen in Bezug auf diese Fragestellung keinerlei Erkenntnisse hervorbrachte, wurde Forschungsfrage 4 als Untersuchungsschwerpunkt in den Umfang der Arbeit aufgenommen. Die Hypothese zu dieser Forschungsfrage basiert auf den starken strukturellen, ablauforganisatorischen sowie sozialen Unterschieden von direkten und indirekten Unternehmensbereichen, was zu unterschiedlichen Anforderungen an Investitionsbewertungsverfahren in Form von signifikant abweichenden Kosten- und Nutzenaspekten führen kann.

Zur Beantwortung der Frage wurde die Auswahl von Industrie 4.0 Projekten für die Experteninterviews gezielt aus direkten und indirekten Unternehmensbereichen vorgenommen, sodass zwanzig Projekte in indirekten und neunzehn Projekte in direkten Bereichen untersucht werden konnten. Der eigentliche Ablauf der Experteninterviews blieb stets unverändert, um ein vergleichbares Ergebnis zu erzeugen.

Die Auswertung der Experteninterviews ergab, dass signifikante Abweichungen insbesondere bei der Häufigkeit der Nutzenaspekte zwischen Projekten aus dem direkten und indirekten Bereich auftreten, was auf die unterschiedlichen Strukturen in den operativen und administrativen Bereichen zurückzuführen ist. Trotzdem wurden alle Kosten und Nutzenaspekte von mindestens einem Interviewpartner als relevant für die Bewertung von

Industrie 4.0 Lösungen definiert, was wiederum dazu führt, dass zwar Unterschiede in der relativen Häufigkeit bestehen, jedoch keine absoluten Abweichungen existieren. Daher kann eine einheitliche Bewertungssystematik für Projekte aus direkten und indirekten Bereichen entwickelt werden.

***Forschungsfrage 5: Welche Bewertungsschritte muss eine ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik umfassen, um allen Anforderungen zu entsprechen?***

Neben der Durchführung einer Kosten-/Nutzenanalyse sind bei der Bewertung von Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik weitere Prozessschritte zu betrachten, da Industrie 4.0 Anwendung bspw. aufgrund des gestiegen Vernetzungsumfangs neue Anforderungen aufweisen, die berücksichtigt werden müssen. Auf Basis einer qualitativen Literaturanalyse konnten sieben relevante Bewertungsschritte identifiziert und in den Modellrahmen für einen ex-ante Bewertungsansatz für Industrie 4.0 Investitionen überführt werden, der sowohl fachliche, finanzielle wie auch IT-seitige Anforderungen abdeckt. Somit ist es möglich, allen in der Literatur identifizierten Anforderungen zu entsprechen. Die sieben Bewertungsschritte gestalten sich inhaltlich wie folgt:

**1. Vorprüfung:**

Dieser Prozessschritt dient der groben Beschreibung des Investitionsvorhabens in Form eines Steckbriefs, welcher als Eingangsgröße für die folgenden sechs Schritte zu betrachten ist. Dadurch soll sichergestellt werden, dass eine detaillierte Beschreibung der Problemstellung und des Zielzustands vorhanden ist. Zudem sollen Fragen nach der Nutzergruppe, den Projektressourcen und geplanten Meilensteinen sowie einer ersten Kosten-/Nutzenkalkulation beantwortet werden. Ferner ist die Einordnung der zu entwickelnden Industrie 4.0 Lösungen in die IT-Landschaft des Unternehmens grob vorzunehmen. Der gesamte Prozessschritt dient der grundlegenden Qualitätssicherung der Eingangsgrößen für die folgende Investitionsbewertung.

**2. Prozessanalyse 4.0**

Eine in der Literatur zur Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen weit verbreitete Methode ist die Prozessanalyse. Da es als notwendig erachtet wird, eine umfassende Prozessanalyse durchzuführen, beinhaltet der zweite Schritt eine klassische Prozessanalyse, die um dokumentationsbezogene Aspekte im Bereich von Daten und Informationssystemen erweitert wird. Hierbei gilt es den Ist-Zustand eines Prozesses zu erfassen und zu bewerten.

Die im Rahmen der Bewertung identifizierten Schwachstellen sind bei der Erstellung des Soll-Prozesses weitestgehend zu eliminieren. Als Ergebnis entsteht der finale Zielzustand des Prozesses, den es finanziell zu bewerten gilt.

### **3. Capability Analyse**

Da Industrie 4.0 Lösungen stets einen IT-Anteil aufweisen, ist die Integration der zu bewertenden Lösungen in die bestehende IT-System- und Hardwarelandschaft des Unternehmens genauestens zu prüfen, um Redundanzen, Doppelentwicklungen und langfristig asynchrone Systemlandschaften zu vermeiden. Zudem können durch einen solchen Abgleich Anforderungen an die Technologie der zu entwickelnden Industrie 4.0 Lösung abgeleitet werden, die wiederum großen Einfluss auf die Kosten- und Nutzenstrukturen haben können.

### **4. Technologiebewertung/-auswahl**

Je nachdem wie die Ergebnisse der Capability Analyse ausfallen, kommt der Technologieauswahl eine unterschiedliche Rolle zu. Sofern bestehende Systeme, Technologien und Anbieter identifiziert wurden, auf denen die zu bewertende Industrie 4.0 Lösungen aufsetzen kann bzw. muss, ist ein Großteil der Rand- und Rahmenbedingungen bereits vorgegeben. Sofern eine komplette Neuentwicklung notwendig ist und im Unternehmen keine nutzbaren Strukturen vorherrschen, beginnt ein intensiver Technologieauswahlprozess. Dabei startet der Prozess mit einer Definition der Bewertungskriterien. Anschließend erfolgt die Identifikation geeigneter Technologien und deren Anbieter, sodass abschließend auf Basis der Bewertungskriterien eine Entscheidungsgrundlage erarbeitet werden kann. Abschließend findet die Technologieauswahl sowie eine Implementierungsplanung statt.

### **5. Kosten-/Nutzenanalyse**

Schritt fünf des Bewertungsansatzes befasst sich mit der Betrachtung der Kosten- und Nutzenaspekte der zu entwickelnden Industrie 4.0 Lösung. Zur Erleichterung des Bewertungsverfahrens stehen dem Projektteam hierzu Informationen in Form von steckbriefbasierten Kosten-/Nutzenbibliotheken zur Verfügung. Da der Nutzen von Industrie 4.0 Lösungen aufgrund fehlender Erfahrungswerte aus der Vergangenheit häufig schwer ermittelbar ist, stehen dem Projektteam insgesamt elf Steuergrößen mit ausführlichen Beschreibungen, Beispielen sowie praxistauglichen Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten zur Auswahl zur Verfügung, was den Bewertungsprozess deutlich vereinfacht. Neben den Nutzenaspekten sind auch sechzehn Kostenaspekte in das Vorgehensmodell integriert.

Eine separate Bewertung von qualitativen Nutzenaspekten findet nicht statt, da alle Nutzenaspekte mittels Wirkkettenanalysen quantifiziert wurden. Somit kann eine ausschließlich monetäre Bewertung der Kosten- und Nutzenseite einer Industrie 4.0 Investition erfolgen.

## **6. Risiko- und Unsicherheitsanalyse**

Da Industrie 4.0 Projekte häufig langfristig angelegt sind und somit erhebliche finanzielle Mittel sowie interne und externe Entwicklungsressourcen binden, dient eine Risiko- und Unsicherheitsbetrachtung der finanziellen Berücksichtigung von negativen wie positiven Einflussfaktoren über die Projektlaufzeit. Hierzu findet mittels Szenariotechnik die Ausarbeitung von mindestens vier zukünftigen Trendszenarien statt, deren Eintrittswahrscheinlichkeit geschätzt und Einfluss auf die Kosten-/Nutzenkalkulation ermittelt werden. Letztlich sorgt die Risiko- und Unsicherheitsanalyse für eine transparentere Entscheidungsgrundlage, da positive wie negative Einflussfaktoren gesammelt, bewertet und gesamtheitlich besprochen werden können.

## **7. Investitionsbewertung**

Der abschließende Schritt der Investitionsbewertung beinhaltet die Aggregation der Teilergebnisse der vorhergehenden Prozessschritte. Neben der Planung der Kosten- und Nutzenverläufe je Trendszenario erfolgt die Kalkulation der dynamischen und statischen Amortisationsdauer, des Kapitalwertes sowie der Gesamtkapitalrendite. Ein Abgleich mit den vom Finanzcontrolling vorgegebenen Rahmenbedingungen und Schwellwerten für diese Kennzahlen bietet die bestmögliche Grundlage für die abschließende Investitionsbewertung in Abstimmung mit dem Projektportfoliomanagement.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die entwickelte ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik die Anforderungen aus Kapitel 3.1 vollständig erfüllt. Somit existiert ein gesamtheitliches, phasenorientiertes Vorgehensmodell, welches operativen Anwendern im praktischen Umfeld zur effektiven und effizienten Investitionsbewertung zur Verfügung steht.

## **6.2 Handlungsempfehlungen für die praktische Umsetzung**

Die Handlungsempfehlungen für den Praxiseinsatz der entwickelten ex-ante Bewertungssystematik für Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik reduzieren sich durch die systematische Vorgehensweise sowie die Vorstellung der Erkenntnisse aus der Validierung aus

Kapitel 5.3 auf die zu schaffenden Rand- und Rahmenbedingungen zur erfolgreichen Nutzung und Durchführung.

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass die Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen, so unterstützend, intuitiv und effizient ein Vorgehensmodell auch sein mag, ein zeit- und ressourcenintensiver Prozess ist. Dies ist auf die gestiegene technische Komplexität und Weiterentwicklungsdynamik von Industrie 4.0 Lösungen zurückzuführen, sowie die mangelnde Erfahrung im Bewertungsprozess aufgrund fehlender Sekundärdaten. Daher ist es von zentraler Bedeutung, dass die Bewertung von einem interdisziplinären Team durchgeführt wird, das aus erfahrenen Vertretern des Fachbereichs, der IT- und Systemarchitekten sowie im weiteren Verlauf eines Repräsentanten des Technologie- oder Softwareanbieters besteht, um alle notwendigen Kompetenzen hinsichtlich einer gesamtheitlichen Investitionsbewertung zu vereinen.

Für den Schritt der Projektbeschreibung gilt, dass eine umfangreiche Vorbereitung und Dokumentation des zu bewertenden Projektes in Form des Steckbriefs im eigentlichen Bewertungsprozess Zeit und Kosten spart. Es ist dafür zu sorgen, dass eine abgestimmte und von allen relevanten Stakeholdern getragene Lösung beschrieben wird.

Erfahrungsgemäß zahlt sich die Beauftragung eines internen oder ggf. externen, jedoch stets unabhängigen Moderators für die Prozessanalyse positiv aus, da der Prozess von einem unabhängigen Dritten gesteuert wird und sich die Fachexperten auf die Prozesserfassung und -optimierung konzentrieren können. Je nach Erfahrungsstand des Projektteams empfiehlt sich bei der Soll-Prozesserstellung bereits die Einbindung eines internen oder externen Technologieexperten, welcher die möglichen Optionen aufzeigen und somit die effiziente Zielerreichung unterstützen kann.

Effektive Capability Analysen setzen eine bestehende Capability Map mit ganzheitlichen IT-System- oder Hardwarelandschaften voraus, um schnell sinnvoll verwendbare Ergebnisse erzeugen zu können. Hierbei ist die Kontaktaufnahme mit den verantwortlichen Stellen im Unternehmen so früh wie möglich sicherzustellen, da so unternehmensspezifische Vorgehensweisen frühzeitig berücksichtigt werden können. Der Systemarchitekt des Bewertungsteams muss hierbei die Kommunikation und Steuerung übernehmen.

Durch die gestiegene Anzahl der Softwarelösungen, Services und Anbieter für Industrie 4.0 Lösungen ist für einen umfassenden Technologieauswahlprozess auf externe Fachexperten zurückzugreifen, um kostspielige Fehlentscheidungen möglichst komplett zu vermeiden.

Für den zentralen Schritt der Kosten-/Nutzenanalyse gilt es, strukturiert die einzelnen Steckbriefe zu betrachten und auf Grundlage der Beispiele und Nutzenauslöser die

Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten zu diskutieren und mit belastbaren Zahlen zu hinterlegen. Häufig kommt es vor, dass die relevanten Quantifizierungsmöglichkeiten zwar als valide angesehen werden, jedoch keinerlei Daten für die monetäre Bewertung vorhanden sind. Um möglichst effizient vorzugehen, gilt es an dieser Stelle zu bewerten, ob eine zeitintensive Erhebung sinnvoll ist oder Annahmen, Äquivalente oder Expertenschätzungen verwendet werden können.

Neben der schwierigen und nicht immer genauen Ermittlung der Kosten- und Nutzenstrukturen über die Projektlaufzeit gilt es im Schritt der Risiko- und Unsicherheitsanalyse darauf zu achten, unnötige Diskussionen über zu komplexe Umweltzustände und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten zu vermeiden, die im Endeffekt zu einer Scheingenaugigkeit der Ergebnisse führen. Da der Blick in die Zukunft stets mit Ungenauigkeiten verbunden ist, müssen hier grundlegend plausible Ergebnisse erarbeitet werden, die als Entscheidungsunterstützungsinstrument dienen. Im Rahmen des Portfoliomanagements ist es zwingend notwendig die beschriebene Bewertungssystematik als standardisierte Vorgehensweise bei der Investitionsbewertung im Unternehmen auszurollen, sodass alle Projektvorhaben denselben Prozess durchlaufen und die Ergebnisse somit vergleichbar sind. Dadurch ist es möglich, die Basis für einen effektiven und effizienten Projektportfoliomanagementprozess zu etablieren.

### 6.3 Kritische Würdigung und weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegende Arbeit hatte die Entwicklung eines möglichst generischen Ansatzes zur Bewertung von Industrie 4.0 Lösungen in direkten und indirekten Bereichen zum Ziel. Da zudem der Themenkomplex Industrie 4.0 nach wie vor keiner wissenschaftlichen Eingrenzung unterliegt, war die Vielfalt der möglichen Ergebnisausprägungen dementsprechend groß, was zwangsläufig zu diskussionswürdigen Ergebnissen führt. Es ist anzunehmen, dass die genauere Eingrenzung auf bspw. direkte oder indirekte Unternehmensbereiche oder einzelne Technologien der Industrie 4.0 zu konkreteren und somit weniger komplexen Ergebnissen geführt hätte.

Die entwickelte ex-ante Bewertungssystematik basiert auf einer Datenbasis aus der Analyse von neununddreißig Industrie 4.0 Projekten, einer qualitativen Literaturanalyse zu den wissenschaftlichen Bewertungsansätzen für Industrie 4.0 Lösungen sowie einer Focus Group mit Fachexperten der Digitalisierung und weist somit aus Sicht der qualitativen Forschung eine ausreichende Daten- und Ergebnisstruktur auf, sodass die grundlegende Vorgehensweise eines sieben-stufigen Phasenmodells als hinreichend und nicht grundlegend überarbeitungswürdig einzustufen ist. Die in Kapitel 3.1 definierten Anforderungskriterien werden durch den

entwickelten Ansatz vollständig erfüllt. Jedoch gilt es über die Untersuchung weiterer Praxisprojekte, Literaturbeiträge sowie die Durchführung von Experteninterviews und Focus Groups eine quantitative Belegbarkeit sowie die damit einhergehende Bestätigung oder Anpassung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse zu erreichen. Zudem sind im Detail der einzelnen Schritte des Ansatzes weitere Forschungsschwerpunkte zu sehen.

Die Quantifizierung und Monetarisierung der Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen erfolgte mit dem klaren Ziel einer vereinfachten aber dennoch effizienten Nutzung der Aspekte im betrieblichen Umfeld. In der Fachliteratur existiert eine Vielzahl an zusätzlichen Kennzahlen, die komplex und unter betrieblichen Gesichtspunkten schwer kalkulierbar bzw. monetarisierbar sind, sodass die Praxistauglichkeit für eine Investitionsbewertung als gering einzustufen ist. An dieser Schnittstelle bieten sich zukünftige Forschungsmöglichkeiten an, um eine tiefere Integration von Praxis und Wissenschaft zu erreichen. In diesem Kontext bietet sich die Möglichkeit einer Überarbeitung und Integration komplexer oder schwer monetarisierbarer Kennzahlen unter Praktikabilitäts Gesichtspunkten an.

Neben den bereits betrachteten sechsunddreißig Nutzenaspekten aus der einschlägigen Literatur konnten im Nachgang der Bearbeitung der Forschungsfragen weitere Nutzenaspekte identifiziert werden, welche in die Betrachtung nicht mit eingeflossen sind. Hier gilt es den Untersuchungsrahmen neu zu definieren und die vorhandene Untersuchungsmethodik darauf anzuwenden, um möglichst viele Nutzenaspekte von Industrie 4.0 Lösungen zu berücksichtigen und in die Bewertungslogik zu integrieren. Ferner können dabei zur Erweiterung der nutzenaspektspezifischen Steckbriefe praxisorientierte Beispiele erfasst und dokumentiert werden, sodass eine gezielte Erweiterung der Beispielbibliotheken erfolgen kann.

In diesem Zuge gilt es gleichermaßen die Einordnung der neu zu bewertenden Nutzenaspekte in die hierarchische Systematisierungsstruktur nach Ergebnis- und Steuergrößen vorzunehmen. Für die identifizierte Systematisierung ist es empfehlenswert eine Forschungssystematik aufzubauen, welche die Abhängigkeiten zwischen Steuer- und Ergebnisgrößen statistisch belegbar beschreibt. Die Forschungssystematik dieser Arbeit ist zwar auf die Ermittlung einer quantitativen Beschreibung ausgerichtet und daher basiert die Abbildung der Abhängigkeiten auf einer datenbasierten, jedoch zumeist logisch beschreibbaren Abhängigkeit, welche durch subjektive Einschätzungen und Festlegungen von Fachexperten fußt. Um eine quantitative Anhängigkeit zwischen Steuer- und Ergebnisgrößen ermitteln zu können ist die Befragung größerer Personengruppen unter Signifikanz Gesichtspunkten mit dem Fokus auf die Beantwortung von Forschungsfrage 2 notwendig. Alternativ dazu ist eine Aggregation der identifizierten Steuergrößen auf Basis der finanziellen Nutzenwerte aus den Validierungen

weiteren Praxisprojekten denkbar, was Rückschlüsse auf die tatsächliche Abhängigkeit zu den Ergebnisgrößen ermöglicht.

Nachdem dies erfolgt ist, bietet sich eine nochmalige Überarbeitung der Struktur der Quantifizierungs- und Monetarisierungsmöglichkeiten mit dem Fokus einer stärkeren Konsolidierung zur erneuten Verbesserung der Praxistauglichkeit und Reduzierung von inhaltlich ähnlichen oder gleichen Auswahlmöglichkeiten an.

Als Alternative zur detaillierteren Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Steuer- und Ergebnisgrößen ist die Auflösung der hierarchischen Abhängigkeit, gemäß einigen Rückmeldungen aus der Validierung, ebenfalls denkbar. Daraus resultiert eine Erhöhung der Verfahrenskomplexität durch eine Verdopplung der zur Verfügung stehenden Nutzenaspekte bei der Kosten-/Nutzenbewertung. Die Auswirkungen auf die Praxistauglichkeit des Ansatzes sind hierbei zu untersuchen.

Als zusätzlicher Forschungsbedarf sind die weiterführende Validierung sowie konsequente Digitalisierung des Ansatzes durch die vermehrte Nutzung im praktischen Einsatz anzusehen. Dadurch können neue Rückschlüsse über die Relevanz und Bedeutung der Kosten- und Nutzenaspekte ermittelt werden. Zudem besteht die Möglichkeit der praxisorientierten Erweiterung der Kosten- und Nutzenaspektbibliotheken. Ferner ist es dadurch möglich, Detailoptimierungen innerhalb der Bewertungsschritte auf Basis von „Best Practice“ Vorgehensweisen vorzunehmen. Die Digitalisierung des Ansatzes kann durch die Implementierung einer Datenbank erfolgen, welche mit den relevanten Informationen aus den einzelnen Bewertungsschritten zu füllen ist, sodass der Aufbau eines softwaregestützten EUS erfolgen kann.

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 zu den relevanten Bewertungsschritten wurde eine qualitative Literaturanalyse verwendet. Die Durchführung von Experteninterviews mit geeigneten Personen aus dem betrieblichen Umfeld ermöglicht eine zusätzliche empirische Datenbasis. Somit würden die Ergebnisse sowohl auf empirischen als auch deduktiven Analysen basieren. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass alle Interviewexperten in das Forschungsfeld Industrie 4.0 umfassend einzuführen sind, um verwertbare Aussagen erzielen zu können.

Abschließend ließe sich der Untersuchungsrahmen dieser Arbeit, welcher die Industrie 4.0 Investitionen in Produktion und Logistik adressiert, auf andere Unternehmensbereiche erweitern. Die Evaluierung der entwickelten Bewertungssystematik kann in Geschäftsbereichen wie bspw. dem Vertrieb oder der Technischen Entwicklung möglicherweise zu neuen Erkenntnissen führen.

## 7 Literaturverzeichnis

- Aichele, C. (2006). Intelligentes Projektmanagement. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.
- Aldea, A., Iacob, M.-E., Daneva, M., & Masyhur, L. (2019). Multi-Criteria and Model-Based Analysis for Project Selection: An Integration of Capability-Based Planning, Project Portfolio Management and Enterprise Architecture. 23rd International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW), S. 128-135. IEEE: Paris.
- Aleatrati Khosroshahi , P., Hauder, M., Schneider, A., & Matthes, F. (2015). Enterprise Architecture Management Pattern Catalog V2. Tech. rep. München: TU München. Abgerufen am 22.07.2021 von <https://www.matthes.in.tum.de/pages/ugsyi19wmmvl/EAMPC-V2-Enterprise-Architecture-Management-Pattern-Catalog-V2>
- Amann, E. (2019). Entscheidungstheorie: Individuelle, strategische und kollektive Entscheidungen. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Andelfinger, V. P. (2017). Einführung. In: V. P. Andelfinger, & T. Hänisch (Hrsg.), Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern, S. 1-8. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Anderl, R., Anokhin, O., & Arndt, A. (2016). Effiziente Fabrik 4.0 Darmstadt – Industrie 4.0 Implementierung für die mittelständige Industrie. In: U. Sandler, Industrie 4.0 grenzenlos. S. 121-136. Heidelberg: Springer Verlag.
- Anderl, R., Haag, S., Schülzer, K., & Zancul, E. (2018). Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration. it – Information Technology, Band 3, Heft 60, S. 125-132.
- Angermeier, G. (2015). Business Model Canvas. Abgerufen am 21.03.2021 von <https://www.projektmagazin.de/glossarterm/business-model-canvas#ratings-and-comments>
- Angermeier, G. (2016). Bedarfsglättung. Abgerufen am 05.10.2019 von <https://www.projektmagazin.de/glossarterm/bedarfsgl%C3%A4ttung>
- Antoni, C. H. (2017). Gruppen- und Teamarbeit. In: E. Westkämper, D. Spath, H.-J. Bullinger, & H.-J. Warnecke (Hrsg.), Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation, S. 161-173. Berlin: Springer Verlag.

- Apfel, A. (2003). The Total Value of Opportunity Approach. Gartner Reserach. Abgerufen am 05.12.2020 von <https://www.csoonline.com/article/2116031/the-total-value-of-opportunity-approach.html>
- Apfel, A., & Smith, M. (2003). TVO Methodology: Valuing IT Investments via the Gartner Business Performance Framework. Gartner Research. Abgerufen am 06.01.2020 von <https://www.gartner.com/en/documents/387459/tvo-methodology-valuing-it-investments-via-the-gartner-bu>
- Auer, B. R., Rottmann, H., & Horn, G. (2018). endogene Variable . Abgerufen am 20.08.2019 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/variable-endogene-36552/version-260003>
- Augsten, S. (2017). Was gehört zum Software Rollout? Abgerufen am 20.10.2020 von <https://www.dev-insider.de/was-gehoert-zum-software-rollout-a-640448/>
- Aunkofer, B. (2008). Form der Kostenverläufe. Abgerufen am 31.10.2020 von <https://www.der-wirtschaftsingenieur.de/index.php/form-der-kostenverlaufe/>
- Aurelius & Partner. (2012). Geschäftsfähigkeitslandkarte (Business Capability Map). Abgerufen am 01.01.2019 von <http://www.lean-eam.de/2012/02/geschaeftsfahigkeitslandkarte-business.html>
- Awad, H., & Nassar, M. (2010). A broad-spectrum orientation of supply chain network integration challenges: an empirical investigation using PLS path modelling. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, S. 282. Abgerufen am 15.07.2021 von [https://www.researchgate.net/publication/220592040\\_A\\_broad-spectrum\\_orientation\\_of\\_supply\\_chain\\_network\\_integration\\_challenges\\_An\\_empirical\\_investigation\\_using\\_PLS\\_path\\_modelling](https://www.researchgate.net/publication/220592040_A_broad-spectrum_orientation_of_supply_chain_network_integration_challenges_An_empirical_investigation_using_PLS_path_modelling)
- Bachmann, A. (2020). 5 Schritte zur cloudfähigen Anwendungsarchitektur. Abgerufen am 13.10.2020 von [https://blog.adacor.com/5-schritte-zur-cloudfaehigen-anwendungsarchitektur\\_6902.html](https://blog.adacor.com/5-schritte-zur-cloudfaehigen-anwendungsarchitektur_6902.html)
- Balzert, H. (2011). *Lehrbuch der Softwaretechnik*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag

- Bauer, W., Schlund, S., & Ganschar, O. (2014). Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Berlin & Stuttgart: BITKOM & Fraunhofer IAO. Abgerufen am 14.07.2021 von <https://www.produktionsarbeit.de/content/dam/produktionsarbeit/de/documents/Studie-Industrie-4-0-Volkswirtschaftliches-Potential-fuer-Deutschland.pdf>
- Bauer, W., Schlund, S., Marrenbach, D., & Ganschar, O. (2014). Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Berlin-Mitte: BITKOM.
- Bauernhansl, T. (2017). Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4: Allgemeine Grundlagen, 2. Aufl., S. 1-32. Berlin: Springer.
- Becker, A. (2011). Nutzenpotenziale und Herausforderungen Serviceorientierter Architekturen. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Becker, J., Grob, H., Klein, S., Kuchen, H., Müller-Funk, U., Vosse, G., & vom Brocke, J. (2003). Advances in Information Systems and Management Science: Referenzmodellierung, Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen (2. Aufl.). Berlin: Logos Verlag.
- Becker, T. (2018). Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren (3. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.
- Becker, W., & Pflaum, A. (2019). Begriff der Digitalisierung - Extension und Intension aus betriebswirtschaftlicher Perspektive. In: W. Becker, B. Eierle, A. Fliaster, B. Levens, A. Leischnig, A. Pflaum, & E. Sucky (Hrsg.), Geschäftsmodelle in der digitalen Welt: Strategien, Prozesse und Praxiserfahrungen, S. 3-14. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Becker, W., Burggraf, A., & Martens, M. (2019). Geschäftsprozessmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken - Herausforderungen vor dem Hintergrund der Digitalisierung. In: W. Becker, B. Eierel, A. Fliaster, B. Ivens, A. Leischnig, A. Pflaum, & E. Sucky (Hrsg.), Geschäftsmodelle in der digitalen Welt: Strategien, Prozesse und Praxiserfahrungen, S. 167-190. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Beger, A., & Gutzeit, M. (2003). Der Mensch im Mittelpunkt von Veränderungsprozessen. Personal: Zeitschrift für Human Ressource Management, S. 28-31.

- Beisswenger, A. (2016). *Autonomie strategischer Entscheidungen: Komplexität im Unternehmen verstehen, analysieren und meistern*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Beitz, W., Grote, K.-H., Feldhusen, J., & Pahl, G. (2007). *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung (2. Aufl.)*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Bendel, O. (2019). *Cyber-physische Systeme*. Abgerufen am 29.11.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/cyber-physische-systeme-54077/version-369944>
- Benzinger, N. (2020). *Relevanz von Produktqualität bei radikalen Innovationen*. Essen: KCT KompetenzCentrum für Technologie- & Innovationsmanagement & FOM Hochschule für Ökonomie & Management. Abgerufen am 20.07.2021 von <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/225008/1/1734775661.pdf>
- Berndt, D., Gohla, M., Seidel, H., & Seiffert, U. (2015). *Produktionssysteme*. In: M. Schenk (Hrsg.), *Produktion und Logistik mit Zukunft: Digital Engineering and Operation*, S. 151-244. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Bertagnolli, F. (2020). *Lean Management: Einführung und Vertiefung in die japanische Management-Philosophie (2. Aufl.)*. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Besemann, L., Esplugas, X., & Halil, N. (2021). *Digitalisierung ist People Business*. *Manager Wissen - Ad Special im Harvard Business Manager*, Heft Mai, S. 6.
- Bhunja, P. (2017). *Singapore Smart Industry Readiness Index*. Abgerufen am 12.11.2020 von <https://www.edb.gov.sg/en/news-and-events/insights/manufacturing/singapore-smart-industry-readiness-Index.html>
- Biethahn, J., Mucksch, H. (2004). *Ganzheitliches Informationsmanagement: Grundlagen (6 Aufl.)*. München (u.a.): Oldenbourg Verlag.
- Bildstein, A., & Seidelmann, J. (2017). *Migration zur Industrie 4.0 Fertigung*. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhasl, & M. ten Hompel, *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1: Produktion*, 2. Aufl., S. 227-242. Berlin: Springer Verlag.
- Bing, Z., Xing, L. & XinXin, W. (2019). *From Digital Twin to Digital Engineering Modeling and Simulation Entering a New Era*. *Zeitschrift für Systemsimulation*, Band 31, Ausgabe 3, S. 369-376.

- Bitkom. (2016). Industrie 4.0 – Die neue Rolle der IT: Leitfaden. Berlin: Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.. Abgerufen am 15.07.2021 von <https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/160421-LF-Industrie-40-Die-neue-Rolle-der-IT.pdf>
- Bitkom. (2020). Lernen in immersiven Welten: Impulspapier. Berlin: Bitkom e.V.. Abgerufen am 17.07.2021 von [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/200515\\_impulspapier\\_lernen-in-immersiven-welten.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/200515_impulspapier_lernen-in-immersiven-welten.pdf)
- BMBF. (2018). Forschung und Innovation für die Menschen: Die Hightech Strategie 2025 . Abgerufen am 28.11.2020 von <https://www.hightech-strategie.de/>
- BMBF. (2020). Industrie 4.0. Abgerufen am 04.11.2020 von <https://www.bmbf.de/de/zukunft-sprojekt-industrie-4-0-848.html>
- BMWi & BMBF. (2018). Was ist Industrie 4.0? Berlin: BMWi / BMWF. Abgerufen am 14.07.2019 von <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>
- BMWi & BMBF. (2020). Serviceorientierte Architektur/Service-Oriented Architecture (SOA IEC18384). Abgerufen am 12.10.2020 von <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Standardartikel/Themen-und-Technologiekatalog/serviceorientierte-architektur.html>
- BMWi. (2015). Erschließung der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand. (J. Bischoff, Hrsg.) Mühlheim an der Ruhr: agiplan GmbH. Abgerufen am 21.07.2021 von [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.pdf?__blob=publicationFile&v=5)
- BMWi. (2018). Welche Kriterien müssen Industrie-4.0-Produkte erfüllen? Leitfaden 2018. Berlin: BMWi. Abgerufen am 15.07.2021 von [https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-produktkriterien.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-produktkriterien.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- BMWi (2021). Automobilindustrie. Abgerufen am 04.12.2021 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html>

- Bock, C. (2010). Vorteilhaftigkeit hybrider Finanzinstrumente gegenüber klassischen Finanzierungsformen unter Unsicherheit (1. Aufl.). Wiesbaden: Gabler - GWV Fachverlage GmbH.
- Bogaschewsky, R. (2019). Digitalisierung in Einkauf und Supply Chain Management, In: R. Obermeier (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation: Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen, S.140-164. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Bondel, G. (2020). Business Capability & Business Capability Map. Abgerufen am 20.09.2020 von <https://eam-initiative.org/pages/yg7qjgxv78f5/Business-Capability-Business-Capability-Map>
- Bortz, J., & Döring, N. (2005). Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler (3. Aufl.). Heidelberg: Springer Verlag.
- Bracht, U., Geckler, D., & Wenzel, S. (2018). Digitale Fabrik: Methodiken und Praxisbeispiele (2. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.
- Breuer, W., & Breuer, C. (2018 a). Rentabilität. Abgerufen am 29.09.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/rentabilitaet-45028/version-268328>
- Breuer, W., & Breuer, C. (2018 b). Cashflow. Abgerufen am 05.12.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/cashflow-29173>
- Breyer-Mayländer, T. (2018). Das Streben nach Autonomie: Reflexion zum digitalen Wandel. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft.
- Brosa-Abut, N. (2017). Business Case Kalkulator für innovative Geschäftsmodelle. Abgerufen am 14.08.2019 von [https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b2/einkauf\\_finanzen\\_supply\\_chain\\_management/produkte.html](https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b2/einkauf_finanzen_supply_chain_management/produkte.html)
- Brosa-Abut, N., & Parlings, M. (2017 ). Leitfaden Investitionskonzepte: Digitalisierung in der Praxis: Ihr Weg zum erfolgreichen Business Case. Abgerufen am 30.10.2020 von <https://www.digital-in-nrw.de/de/downloads>
- Burmann, C. (2002). Strategische Flexibilität und Strategiewechsel als Determinanten des Unternehmenswertes. Münster: Deutscher Universitätsverlag.

- bwcon/FSTI. (2016). Wirtschaftlichkeitsbewertung von Digitalisierungsprojekten: Das sind die Ergebnisse aus dem Mikroprojekt. Abgerufen am 24.01.2020 von <https://digitales-kompetenzzentrum-stuttgart.de/wirtschaftlichkeitsbewertung-von-digitalisierungsprojekten-das-sind-die-ergebnisse-aus-dem-mikroprojekt/>
- Capelli, P. (2020). Mitarbeiter sind keine Maschinen. Harvard Business Manager: Die New-Work-Lüge, Heft August, S. 35-41.
- Capgemini. (2018). Studie IT-Trends 2018; Digitalisierung: Aus Ideen werden Ergebnisse. Berlin: Capgemini. Abgerufen am 22.07.2021 von <https://www.capgemini.com/de-de/wp-content/uploads/sites/5/2018/02/it-trends-studie-2018.pdf>
- Carey, M. A., & Asbury, J.-E. (2016). Focus Group Research. London / New York: Routledge.
- Church, Z. (2017). Platform strategy, explained. Cambridge: MIT Sloan School of Management. Abgerufen am 29.11.2020 von <http://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/platform-strategy-explained>
- CioWiki. (2018). Total Economic Impact (TEI). Abgerufen am 01.01.2020 von [https://cio-wiki.org/wiki/Total\\_Economic\\_Impact\\_\(TEI\)](https://cio-wiki.org/wiki/Total_Economic_Impact_(TEI))
- Colbe v., W. B., & Witte, F. (2018). Investitionstheorie und Investitionsrechnung (5. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.
- cplace. (2020). Single Source of Truth (SSOT). Abgerufen am 03.10.2020 von <https://www.collaboration-factory.de/glossar/single-source-of-truth>
- Daityari, S. (2020). Angular vs React vs Vue: Which Framework to Choose in 2020. Abgerufen am 12.10.2020 von <https://www.codeinwp.com/blog/angular-vs-vue-vs-react/>
- Dawo, S. (2019). Software, Anschaffung und Abschreibung / 3.3 Aktivierungswahlrecht für selbst erstellte Software des Anlagevermögens. Abgerufen am 02.12.2020 von [https://www.haufe.de/finance/haufe-finance-office-premium/software-anschaffung-und-abschreibung-33-aktivierungswahlrecht-fuer-selbst-erstellte-software-des-anlagevermoegens\\_idesk\\_PI20354\\_HI13216504.html#:~:text=Finance%20Office%20Premium-,Software%2C%20An](https://www.haufe.de/finance/haufe-finance-office-premium/software-anschaffung-und-abschreibung-33-aktivierungswahlrecht-fuer-selbst-erstellte-software-des-anlagevermoegens_idesk_PI20354_HI13216504.html#:~:text=Finance%20Office%20Premium-,Software%2C%20An)
- DelVecchio, L. (2020). Single Source of Truth: Benefits for Data Management. Abgerufen am 05.03.2021 von <https://planergy.com/blog/single-source-of-truth-benefits/>

- Denman, J. (2011). Definition: business capability. Abgerufen am 26.04.2021 von <https://searcharchitecture.techtarget.com/definition/business-capability>
- Deuse, J., Bohnen, F. & Maschek, T. (2011). Leveling of low volume and high mix production based on a Group Technology approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol. 4, Issue 3, S. 247-251. Abgerufen am 25.05.2022 von <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S175558171100054X?token=ED020E406D8CBE6F8D45927107476647692F103868179D5E1EA3C41F6CB16874436CDCFF7CB1D716C3D4232376E81FE9&originRegion=euwest1&originCreation=20220525182417>
- Deuse, J., Günthner, W. A., Rammelmeier, T. & Weisner, K. (2012). Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiterbelastungen in Kommissioniersystemen. Forschungsbericht. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml).
- Deuse, J., Weisner, K., Hengstebeck, A., Busch, F. (2015). Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: A. Botthof & E. A. Hartmann (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0.*, S. 99-109. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Deuse, J., Lotter, B., & Lotter, E. (2016). *Die Primäre Produktion: Ein praktischer Leitfaden zur verschwendungsfreien Wertschöpfung*. Berlin: Springer Verlag.
- Deuse, J., Weisner, K., Busch, F. & Achenbach, M. (2018 a). Gestaltung sozio-technischer Arbeitssysteme für Industrie 4.0. In: H. Hirsch-Kreinsen, P. Ittermann & J. Falkenberg (Hrsg.), 2. Aufl., S. 195-214. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft.
- Deuse, J., Hengstebeck, A., Weisner, K., Rossmann, J. & Kuhlenkötter, B. (2018 b). Betriebliche Auswirkungen industrieller Servicerobotik am Beispiel der Kleinteilemontage. In: S. Wischmann & E. A. Hartmann (Hrsg.), S. 51-61. Berlin: Springer Verlag.
- Deuse, J., Scheckelmann, T., Weißkamp, V., Ermer, A.-K., Barthelmey, A. & Kaiser, M. (2019 a). Arbeitswissenschaftliche Bewertung von MRK-Planungsszenarien. In: F. Hees, S. Müller-Abdelrazeq, M. Voss, R. Schmitt, G. Hüttemann & K. Rook-Weiler (Hrsg.), *Projektatlas Kompetenz Montage. Kollaborativ und wandlungsfähig*, S. 222-223. Aachen: RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau.

- Deuse, J., Herst, D., Nöhring, F. & Wienzek, T. (2019 b). Kompass Digitalisierung – Ein Instrument zur Evaluation und Gestaltung von Arbeitssystemen. Frühjahrskongress. Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten. Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Dortmund (Hrsg.). Dresden. Abgerufen am 26.05.2022 von <https://gfa2019.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de/inhalt/C.3.6.pdf>
- Deuse, J., Dombrowski, U., Nöhring, F., Mazarov, J. & Dix, Y. (2022). Systematic combination of Lean Management with digitalization to improve production systems on the example of Jidoka 4.0. International Journal of Engineering Business Management. Vol. 12, No. 1, S. 1-9. Abgerufen am 24.05.2022 von <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1847979020951351>
- Dicke, K. (1996). Effizienz und Effektivität internationaler Organisationen. Darstellung und kritische Analyse eines Topos im Reformprozeß der Vereinten Nationen. In: Verfassung in Recht und Übersee, Heft 29, S. 380-383.
- Dickmann, P. (2015). Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen (3. Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Diemer, J. (2017). Sichere Industrie-4.0-Plattformen auf Basis von Community Clouds. In: B. Vogel-Heuser, M. ten Hompel, & T. Bauernhansl, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung, S. 177-204. Berlin: Springer.
- DIN ISO 19233. (1998). Leittechnik - Prozeßautomatisierung - Automatisierung mit Prozeßrechensystemen, Begriffe.
- Dombrowski, T. (2000). Gruppenarbeit und Entgeltsysteme: Ein Beitrag zur Untersuchung der Wirkung von Entgeltsystemen auf die Personaleinsatzflexibilität. Eine Fallstudienuntersuchung. München/Mering: Rainer Hampp Verlag.
- Dorst, W. (2017). Entwicklung und Ausblick von Industrie 4.0. In: T. Schulz (Hrsg.), Industrie 4.0: Potenziale erkennen und umsetzen, 1. Aufl., S. 337-338. Würzburg: Vogel Business Verlag Media GmbH
- Dr. Kraus & Partner. (2020). Prozessanalyse - Definition. Abgerufen am 22.10.2020 von <https://www.kraus-und-partner.de/wissen-und-co/wiki/prozessanalyse-prozess-analyse-beratung-berater>

- Easy Software. (2019). Microservices vs. Monolith - Paradigmenwechsel in der Software-Entwicklung. Abgerufen am 04.10.2020 von <https://easy-software.com/de/newsroom/microservices-vs-monolith/>
- Eichhorn, P., & Merk, J. (2016). Das Prinzip der Wirtschaftlichkeit: Basiswissen der Betriebswirtschaftslehre (4. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Eigner, M. (2016). Das Industrial Internet; In: U. Sandler (Hrsg.), Industrie 4.0 grenzenlos, S. 137-168. Heidelberg: Springer Verlag.
- Eigner, M. & Stelzer, R. (2016) Product Lifecycle Management (PLM): Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management (2. Aufl.). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Eisele, O., Jeske, T., & Lenning, F. (2021). Produktivitätsmanagement. In: T. Jeske, & F. Lennings (Hrsg.), Produktivitätsmanagement 4.0: Praxiserprobte Vorgehensweisen zur Nutzung der Digitalisierung in der Industrie, S. 7-42. Berlin: Springer Vieweg Verlag.
- Elkmann, N., Berndt, D., Leye, S., Richter, K., & Mecke, R. (2015). Arbeitssysteme der Zukunft. In: M. Schenk (Hrsg.), Produktion und Logistik mit Zukunft: Digital Engineering and Operation. S. 49-150. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Ematinger, R. (2018). Von der Industrie 4.0 zum Geschäftsmodell 4.0: Chancen der digitalen Transformation. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH.
- Endres, F., & Sejdic, G. (2018). Cyber-Physische Systeme in der Intralogistik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Band 113, Heft 5, S. 346-349.
- Ennemann, M., & Rückert, J. (2016). Mit validen Stammdaten in die Zukunft. Controlling & Management Review. Abgerufen am 17.06.2019 von <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12176-016-0036-5.pdf>
- Erlach, K. (2010). Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik (2. Aufl.). Stuttgart: Springer Verlag.
- Ernst, S. A. (2005). Wissenstransform: Wissensmanagement in gleichstellungsorientierten Netzwerken. Münster: LIT.
- Fach, P. (2021). Intelligent Automation - die Bots werden erwachsen. Manager Wissen - Ad Special im Harvard Business Manager, Heft Mai, S. 1-2.

- Fallenbeck, N., & Eckert, C. (2014). IT-Sicherheit und Cloud Computing. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologie, Migration*, S. 397-431. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag.
- Fausser, K., Ott, A., Böhm, L. & Wiedemann, S. (2017). *Industrie 4.0 - Anwendungsintegration im Zeitalter der Cloud*. In: V. P. Anderlfinger, & T. Hänisch (Hrsg.), *Industrie 4.0 - Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern*, S. 69-82. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Feldmann, S., & Vogel-Heuser, B. (2017). Diagnose von Inkonsistenzen in heterogenen Engineeringdaten. In: B. Vogel-Heuser, M. ten Hompel, & T. Bauernhansl (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, S. 315-335. Berlin: Springer Verlag.
- Fink, A. (2012). Monolithisches IT-System. Abgerufen am 04.10.2020 von <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/is-management/Systementwicklung/Softwarearchitektur/Architekturparadigmen/Monolithisches-IT-System>
- Fleig, J. (2020). SWOT-Analyse. Abgerufen am 17.07.2021 von <https://www.businesswissen.de/artikel/swot-analyse-so-wird-eine-swot-analyse-erstellt/>
- Fleig, J. (2021). PESTEL-Analyse. Abgerufen am 17.07.2021 von <https://www.businesswissen.de/hb/die-pestel-methode-in-der-uebersicht-mit-aufbau-und-anwendung/>
- Fleisch, E., Weinberger, M., & Wortmann, F. (2017). Geschäftsmodelle im Internet der Dinge, In: Rheinmeier (Hrsg.), *Industrie 4.0: Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele*, S.1-16. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Fleischle, F. (2014). Big-Data und Echtzeitsteuerung. *ZfK - Zeitschrift für kommunale Wirtschaft*, Heft 6, S. 9.
- Flückinger, M., & Rautenberger, G. (1995). *Komplexität und Messung von Komplexität*. ETH Zürich: Institut für Arbeitspsychologie. Abgerufen am 20.07.2021 von <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/4450548/588163.pdf>
- Fraunhofer IAO. (2018). IT-gestützte White-Spot-Analyse. Abgerufen am 14. 08. 2019 von [https://wiki.iao.fraunhofer.de/index.php/IT-gest%C3%BCtzte\\_White-Spot-Analyse](https://wiki.iao.fraunhofer.de/index.php/IT-gest%C3%BCtzte_White-Spot-Analyse)

- Fraunhofer IPK. (2023). Was ist modellbasiertes Systems Engineering?. Abgerufen am 06.08.2023 von <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/kompetenzen-und-loesungen/digital-engineering/modellbasiertes-systems-engineering/was-ist-model-based-systems-engineering.html>
- Fraunhofer IPT. (2018). Industrie 4.0 - Vernetzung, adaptive Produktion. Aachen: Fraunhofer IPT. Abgerufen am 21.07.2021 von <https://www.ipt.fraunhofer.de/content/dam/ipt/de/documents/Broschueren/Industrie%2040-Vernetze%20adaptive%20Produktion.pdf>
- Freitag, A., Matthes, F., Schulz, C., Nowobilska, A. (2011). A Method for Business Capability Dependency Analysis. München/Bonn: TU München und Detecon International GmbH. Abgerufen am 22.07.2021 von [https://www.matthes.in.tum.de/file/100js250slldo/sebis-Public-Website/Team/Andreas-Freitag/Final\\_INNOV\\_Capabilities\\_2011.pdf?details=true](https://www.matthes.in.tum.de/file/100js250slldo/sebis-Public-Website/Team/Andreas-Freitag/Final_INNOV_Capabilities_2011.pdf?details=true)
- Frenz, W. (2020). Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft. Berlin: Springer Verlag.
- Frick, H. (2009). Definition Inbetriebnahme. Abgerufen am 20.10.2020 von <https://www.ce-wissen.de/?p=1553>
- Friedrichsen, S. & Ahting, S. (2021). Investitions und Finanzierung im Baununternehmen: Grundlagen und Anwendungen mit Lehrvideos. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Fuhrer, K. (2013). EA Deliverables Teil 3 Geschäft und IT-Entwicklung. Abgerufen am 20.09.2020 von [http://docplayer.org/15747860-Enterprise-architecture-deliverables.html#tab\\_1\\_1\\_1](http://docplayer.org/15747860-Enterprise-architecture-deliverables.html#tab_1_1_1)
- Füermann, T. (2014). Prozessmanagement: Kompaktes Wissen, Konkrete Umsetzung, Praktische Arbeitshilfe. München: Carl Hanser Verlag.
- Gabler Wirtschaftslexikon. (2018). Gap-Analyse. Abgerufen am 28.11.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/gap-analyse-34738/version-258234>
- Gartner. (2020). Scalability. Abgerufen am 14.12.2020 von <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/scalability>
- Gausmann, O. (2008). Kundenindividuelle Wertschöpfungsnetzwerke: Gestaltungsempfehlungen unter Berücksichtigung einer auftragsorientierten Produktindividualisierung. Augsburg: Gabler / GWV Fachverlage GmbH.

- Geisberger, E., & Broy, M., Cengarle, M., Keil, P., Niehaus, J., Thiel, C., & Thönnißen-Fries, H.J. (2012). In: E. Geisberger, & M. Broy (Hrsg.), Agenda CPS – integrierte Forschungsagenda Cyber-Physische Systeme. München/Berlin: acatech. Abgerufen am 15.07.2021 von [https://www.researchgate.net/publication/277310481\\_Agenda\\_CPS\\_Integrierte\\_Forschungsagenda\\_Cyber-Physical\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/277310481_Agenda_CPS_Integrierte_Forschungsagenda_Cyber-Physical_Systems)
- Gerke, W. (2015). Technisches Assistenzsysteme: vom Industrieroboter zum Roboterassistenten. Berlin/München/Boston: Walter de Gruyter GmbH.
- Ghouat, M., Haddout, A., Benhadou, M. (2021). Impact of Industry 4.0 Concept on the Levers of Lean Manufacturing Approach in Manufacturing Industries. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. Vol. 18, No. 1, S. 8523-8530. Abgerufen am 20.12.2021 von <https://journal.ump.edu.my/ijame/article/view/2906/1129>
- Gizycki, V. v. (2002). Usability - nutzerfreundliches Web-Design. In: M. Beier, & V. von Gizycki, Usability: Nutzerfreundliches Web-Design, S. 1 -17. Heidelberg: Springer Verlag.
- Glaser, M. (1995). Wahrgenommene Produktqualität - Kritische Bestandsaufnahme zur marketingorientierten Qualitätsforschung. In: Der Markt, Heft 34. S. 13-21.
- Gliedmann, C. (2003). The Foundation of Sound Technology Investment: The Total Economic Impact Methodology. Abgerufen am 13.11.2020 von [http://faculty.uml.edu/dstephenso/n/technology\\_class/forrester\\_reports/forrester\\_tei\\_method.pdf](http://faculty.uml.edu/dstephenso/n/technology_class/forrester_reports/forrester_tei_method.pdf)
- Gloy, Y.-S. (2020). Industrie 4.0 in der Textilindustrie. Heidelberg: Springer Verlag.
- Gluchowski, P. (2018). Data Lake. Abgerufen am 08.12.2020 von <https://www.gabler-banklexikon.de/definition/data-lake-100267/version-337046>
- Gong, Y., & Janssen, M. (2021). Roles and Capabilities of Enterprise Architecture in Big Data Analytics Technology Adoption and Implementation. Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. Vol. 16, Issue 1, S. 37-51.
- Gorecky, D., Schmitt, M., & Loskyll, M. (2017). Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: B. Vogel-Heuser, M. ten Hompel, & T. Bauernhansl (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4: Allgemein Grundlagen, S. 217-235. Berlin: Springer Verlag.

- Göbel, E. (2018). Entscheidungstheorie (2. Aufl.). Konstanz/München: UVK Verlagsgesellschaft mbH.
- Götz, U. (2008). Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben (6. Aufl.). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Grande, M. (2013). 100 Minuten für Konfigurationsmanagement: Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Grimme, N. (2015). Die erfolgreiche Technologieauswahl: White Paper inkl. Best Practice Beispiel. Abgerufen am 23.09.2020 von [https://www.digitalforward.de/wp-content/uploads/digitalforward-whitepaper\\_technologieauswahl.pdf](https://www.digitalforward.de/wp-content/uploads/digitalforward-whitepaper_technologieauswahl.pdf)
- Gudehus, T. (2006). Dynamische Disposition: Strategien zur optimalen Auftrags- und Bestandsdisposition (2. Aufl.). Berlin [u.a]: Springer Verlag.
- Günter, A., Broza-Abut, N., Geßner, M., Kruse, B., Hauser, A. & Henke., M. (2021). Lohnt sich die Investition? - Ein Leitfaden ökonomischen Bewertung Industrie 4.0 Anwendungen, Digitalisierungsprojekten und innovativen Technologien, In: U.-H. Pradel, W. Süssenguth, J. Piontek & A.F. Schwolgin (Hrsg.), Praxishandbuch Logistik, Aktualisierungslieferung Nr. 98, S. 1-10. Köln: Deutscher Wirtschaftsdienst.
- Günthner, W., Klenk, E., & Tenerowicz-Wirth, P. (2017). Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4: Allgemeine Grundlagen, 2. Aufl., S. 96-123. Berlin: Springer Verlag.
- Haas, M., & Negele, K. (2018). Deutscher Industrie 4.0 Index 2018. Stuttgart: Staufen AG & der Staufen Digital Neonex GmbH. Abgerufen am 14.07.2021 von <https://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-Studie-Industrie-4.0-Index-2018-Web-DE-de.pdf>
- Haki, K., & Legner, C. (2021). The Mechanics of Enterprise Architecture Principles. Journal of the Association for Information Systems 22(5), S. 1334-1375.
- Halm, A., & Aehnelt, M. (2017). Produktionsprozesse effizienter planen und steuern: Virtuelle Absicherung durch Visual Computing. wt Werkstatttechnik, Heft 4, S. 280-281.

- Hartmann, A. (2016). Technologieauswahl: Kosten sparen mit agilem Vorgehen und Prototyping. Abgerufen am 25.10.2020 von <https://www.becompany.ch/en/blog/2016/09/12/agile-technologieevaluation>
- Hartmann, L., Meudt, T., Stefan, S., & Metternich, J. (2018). Wertstromdesign 4.0 - Gestaltung schlanker Wertströme im Zeitalter von Digitalisierung und Industrie 4.0. Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), 113(6), S. 393-397.
- Hauser, A. (2020). Smart Industry Readiness Index: Big strides into the fourth industrial revolution. Abgerufen am 26.11.2020 von <https://www.tuvsud.com/en/resource-centre/stories/smart-industry-readiness-index>
- Hämmerle, I., Jost, P., & Künz, A. (2018). Die Rolle des Menschen und der Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Industrie 4.0 Kontext. Dornbirn: Fachhochschule Vorarlberg, Forschungszentrum Nutzerzentrierte Technologien. Abgerufen am 14.07.2021 von [https://www.researchgate.net/publication/335453955\\_Die\\_Rolle\\_des\\_Menschen\\_und\\_der\\_Gestaltung\\_von\\_Mensch-Maschine-Schnittstellen\\_im\\_Industrie\\_40\\_Kontext](https://www.researchgate.net/publication/335453955_Die_Rolle_des_Menschen_und_der_Gestaltung_von_Mensch-Maschine-Schnittstellen_im_Industrie_40_Kontext)
- Hänisch, T. (2017). Grundlagen Industrie 4.0. In: V. P. Andelfinger, & T. Hänisch (Hrsg.), Industrie 4.0: Wie cyber physische Systeme die Arbeitswelt verändern, S. 9-32. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.
- Hees, F. (2019). Geleitwort der Redaktion des Atlas "Kompetenz Montage". In: F. Hees, S. Müller-Abdelrazeq, M. Voss, R. Schmitt, G. Hüttemann, K. Rook-Weiler (Hrsg.), Projektatlas Kompetenz Montage. Kollaborativ und wandlungsfähig, S. 6-7. Aachen: RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau.
- Heesen, B. (2020). Basiswissen Investition und Bilanzplanung im Krankenhaus. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Heister, M. (1962). Rentabilitätsanalyse von Investitionen. Köln: Westdeutscher Verlag.
- Helmold, M. (2021). Innovatives Lieferantenmanagement: Wertschöpfung in globalen Lieferketten, Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.

- Henke, M. (2017). How to successfully manage industry 4.0 along the supply chain and what it will mean for the industry by 2035. Abgerufen am 13.06.2021 von [https://www.pi.events/IPIC2017/sites/default/files/IPIC2017-Keynote%20Session%209\\_Michael%20Henke.pdf](https://www.pi.events/IPIC2017/sites/default/files/IPIC2017-Keynote%20Session%209_Michael%20Henke.pdf)
- Henke, M., Besenfelder, C., Kaczmarek, S., Hetterscheid, E. & Schlüter, F. (2018): Dortmund Management Model - a Contribution to Digitalization in Logistics and Supply Chain Management. In: BVL (Hrsg.): 9th International Scientific Symposium on Logistics. Magdeburg.
- Henke, M. (2019). Editorial. In: C. Hildebrand & A. Haas, VWI Fokusthema - Band 1: Management der Industrie 4.0 (S. 3). Berlin: Verband Deutscher Wirtschaftsingenieure e. V. (VWI). Abgerufen am 14.07.2021 von [https://www.vwi.org/wp-content/uploads/2019/04/VWI\\_Fokusthema\\_ManagementIndustrie40.pdf](https://www.vwi.org/wp-content/uploads/2019/04/VWI_Fokusthema_ManagementIndustrie40.pdf)
- Hennink, M. M. (2014). Focus Group Discussions. New York: Oxford University Press.
- Herrmann, W., Jasch, M., Jung, M., Marte, A., & Schuster, S. (2017). Welche neuen Arbeitsbereiche entstehen durch Industrie 4.0. In: V. P. Andelfinger, & T. Hänisch, Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern, S. 229-238. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.
- Hery-Moßmann, N. (2018). Was ist API? Einfach erklärt. Abgerufen am 12.10.2020 von [https://praxistipps.chip.de/was-ist-api-einfach-erklart\\_41370](https://praxistipps.chip.de/was-ist-api-einfach-erklart_41370)
- Hetterscheid, E. (2020). Beitrag zur digitalen Transformation von Planungs- und Steuerungsprozessen unter Einsatz von Cyber-Physischen Systemen. Dissertation. Dortmund: Praxiswissen Service UG.
- Heuer, J. P. (2013). Die Budgetierung der Bezirkshaushalte: Über die Grundlagen, Verfahren, Ergebnisse und Probleme des Systems der Finanzierung der Berliner Bezirke. Berlin: Kommunalpolitisches Forum (e.V).
- Hierzer, R. (2017). Prozessoptimierung 4.0: Den digitalen Wandel als Chance nutzen. Freiburg: Haufe Lexware GmbH & Co. KG
- Hill, T. (2020). Die Leistung von Fertigungsprozessen überwachen und optimieren - Schöpfen Sie das Potenzial von Industrie 4.0 und digitalen Prozesszwillingen aus. Berlin: Signavio GmbH.

- Hillmer, C. (2016). Prozessmanagement in indirekten Bereichen: Empirische Untersuchung und Handlungsempfehlungen. In: W. Becker, & P. Ulrich (Hrsg.), Unternehmensführung & Controlling. Wiesbaden: Springer Fachmedien. Abgerufen am 16.07.2021 von <https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-658-14917-8%2F1.pdf>
- Hilt, B. (2020). Bessere Produktqualität mit selbstlernender Künstlicher Intelligenz. IM+io Best & Next Practices aus Digitalisierung, Heft 3, S. 96-97.
- Hirsch-Kreinsen, H. (2014). Welche Auswirkungen hat „Industrie 4.0“ auf die Arbeitswelt?. Bonn: Friedrich-Ebert-Stiftung, Abteilung Wirtschafts- und Sozialpolitik. Abgerufen am 15.07.2021 von <http://library.fes.de/pdf-files/wiso/11081.pdf>
- Hirsch-Kreinsen, H., & Karacic, A. (2019). Autonome Systeme und Arbeit: Perspektiven, Herausforderungen und Grenzen der Künstlichen Intelligenz in der Arbeitswelt. Bielefeld: Transcript Verlag.
- Hoffmann, F. J. (2017). iBin – Anthropomatik schafft revolutionäre Logistiklösungen. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1: Produktion, S. 47-60. Berlin: Springer Verlag.
- Hohrath, P. A. (2013). Analyse der strategisch und strukturell induzierten Verwundbarkeit von Wertschöpfungsnetzwerken: eine empirische Untersuchung am Beispiel der Windenergieanlagenindustrie (1. Aufl.). Lohmar: Eul Verlag.
- Holland, H., Wagner, F., & Pape, U. (2018). Barwert. Abgerufen am 29.09.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/barwert-27685/version-251329>
- Homann, U. (2015). Business Capability Map Definitions. Abgerufen am 20.09.2020 von <https://www.capstera.com/business-capability-map-definitions/>
- Hoppe, G. (2017). High Performance Automation verbindet IT und Produktion. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung, 2. Aufl., S. 119-143. Berlin: Springer Verlag.
- Hornung, G. & Hofmann, K. (2018). Industrie 4.0 und das Recht: Drei zentrale Herausforderungen. In: G. Hornung (Hrsg.), Rechtsfragen der Industrie 4.0: Datenhoheit - Verantwortlichkeiten - rechtliche Grenzen der Vernetzung, 1. Aufl., S. 9-64. Baden-Baden: Nomos Verlag.

- Horvath, D., Stahlecker, T., Zenker, A., Lerch, C., & Mladineo, M. (2018). A conceptual approach to analysing manufacturing companies' profiles concerning Industry 4.0 in emerging economies. Abgerufen am 17.06.2019 von <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2351978918311818?token=E1058EE3E05CA54C8C3C3A92C274E8CF65D FE4F6535BDE83FAB1C2553D459A15ED571A290847A1DDEEF585DC128A71EA>
- Horvath, P., Michael, U., Gänßler, S. & Losbichler, H. (2015). Industrie 4.0: Controlling im Zeitalter der intelligenten Vernetzung. Abgerufen am 24.11.2021 von [https://www.icv-controlling.com/fileadmin/Assets/Content/AK/Ideenwerkstatt/Files/Dream\\_Car\\_Industrie4.0\\_DE.pdf](https://www.icv-controlling.com/fileadmin/Assets/Content/AK/Ideenwerkstatt/Files/Dream_Car_Industrie4.0_DE.pdf)
- Huber, A. S. (2013). Das Ziel Digital Enterprise: die professionelle digitale Abbildung von Produktentwicklung und Produktion. In: U. Seldler (Hrsg.), Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität im SysLM, S. 111-124. Heidelberg: Springer Verlag.
- Hung Vo, P. (2016). Die Automobilindustrie und die Bedeutung innovativer Industrie 4.0 Technologien. Hamburg: Diplomica Verlag GmbH.
- Hutchison, N., Pepe, K., Blackburn, M., Hoong Yan See, T., Verma, D., Whitcomb, C., Khan, R., Peak, R. & Baker, A. (2021). WRT-1006 Technical Report: Developing the Digital Engineering Competency Framework (DECF) Phase 2. Systems Engineering Research Center, Stevens Institute of Technology. Abgerufen am 05.08.2022 von <http://hdl.handle.net/10945/70133>
- Ilin, I. V., Levina, A., Dubgorn, A., & Abran, A. (2021). Investment Models for Enterprise Architecture (EA) and IT Architecture Projects within the Open Innovation Concept. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7, 69, S. 1-18.
- IPH. (2021). Industrie 4.0 und Digitalisierung. Abgerufen am 11.07.2021 von <https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/automatisierungstechnik/industrie-4.0/#>
- Jahn, M. (2017). Industrie 4.0 konkret: Ein Wegweiser in die Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

- Janik, M. & Weber, K. (2016) IT-Sicherheitsanalysen von PLM-Systemen. Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt. Abgerufen am 15.10.2022 von [https://www.researchgate.net/profile/Kristin-Weber/publication/309251607\\_IT-Sicherheitsanalysen\\_von\\_PLM-Systemen/links/58073db908aeb85ac85f697e/IT-Sicherheitsanalysen-von-PLM-Systemen.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Kristin-Weber/publication/309251607_IT-Sicherheitsanalysen_von_PLM-Systemen/links/58073db908aeb85ac85f697e/IT-Sicherheitsanalysen-von-PLM-Systemen.pdf)
- Jasperneite, J., Heymann, S., Fay, A., & Schröck, S. (2015). Beschreibung von Produktionsprozessen in modularisierten Produktionsanlagen für Industrie 4.0. 16. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik. Baden-Baden: VDI Verlag. Abgerufen am 15.07.2021 von [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-3452257.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3452257.pdf)
- Jonas, H. H. (1964). Investitionsrechnung. Berlin: Walter De Gruyter & Co Verlag.
- Joppe, R., von Enzberg, S., Kühn, A., & Dumetrescu, R. (2019). Investitionsentscheidung vor dem Hintergrund der Digitalisierung am Beispiel Schaltschrankbau. In: ZWF: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Heft 7/8, Vol. 114, S. 493-487.
- Jungbluth, V. (2017). Intelligente, vernetzte Lagersysteme für die Industrie 4.0. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd.3: Logistik, S. 139-150. Berlin: Springer Verlag.
- Kaddoumi, T. & Watfa, M. (2021). A foundational framework for agile enterprise architecture. International Journal of Lean Six Sigma. S. 1-20.
- Kagermann, H., Anderl, R., Gausemeier, J., Schuh, G., & Wahlens, W. (2016). Industrie 4.0 im globalen Kontext: Szenarien der Zusammenarbeit mit internationalen Partnern. Berlin: acatech. Abgerufen am 13.07.2021 von <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-im-globalen-kontext-strategien-der-zusammenarbeit-mit-internationalen-partnern/>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Frankfurt am Main: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. Abgerufen am 14.07.2019 von [https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen\\_Industrie4\\_0.pdf](https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf)
- Kahneman, D., Koller, T., Lovallo, D., & Uhlener, R. (2020). Mehr Risiko, mehr Rendite. Harvard Business Manger, Heft Oktober, S. 22-29.

- Kaiser, S. (2009). RFID-spezifische Extended Performance Analysis zur umfassenden Bewertung von RFID-Investitionen. München: ISIS Medien.
- Kamiske, G. F. (2009). Handbuch QM-Methoden. Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen. München: Carl Hansen Verlag.
- Kemper, H.-G., Koch, M., & Lasi, H. (2010). Prozesstransparenz: Erfolgsfaktor für produzierende Unternehmen. Productivity Management, Heft 1, S. 29-31.
- Kerkhoff, H. (2010). Multi-Tenant-Datenbanken für SaaS. Abgerufen am 12.10.2020 von [https://dbs.uni-leipzig.de/file/seminar\\_0910\\_kerkhoff\\_ausarbeitung.pdf](https://dbs.uni-leipzig.de/file/seminar_0910_kerkhoff_ausarbeitung.pdf)
- Kesten, R., Schröder, H., & Wozniak, A. (2006). Konzept zur Nutzenbewertung von IT-Investitionen. Arbeitspapiere der Nordakademie, No. 2006-03. Elmshorst: Nordakademie - Hochschule der Wirtschaft. Abgerufen am 10.05.2019 von <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/38607/1/521294096.pdf>
- Kesten, R., & Schröder, H. (2009). Wirtschaftlichkeitsprognose und kontrolle von IT Investitionen: Abschlussbericht und Fallbeispiel. Arbeitspapier der Nordakademie No. 2009-03. Elmshorn: Nordakademie - Hochschule der Wirtschaft. Abgerufen am 10.05.2019 von <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/38582/1/611498510.pdf>
- Ketkar, Y., & Gawada, S. (2021). Effectiveness of Robotic Process Automation for data mining using UiPath. International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). (S.864-867). IEEE. Abgerufen am 20.07.2021 von <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9396024>
- Kilicaslan, Y., Aytun, U. & Mecik, O. (2021). Global value chain integration and productivity: the case of Turkish manufacturing firms. Middle East Development Journal Vol. 13, No. 1, S. 150-171.
- Kirazli, A. (2017). Beitrag zur Analyse der Nutzenpotentiale von Industrie 4.0 in der Automobilindustrie – am Beispiel des Supply Chain Risikomanagements. Dortmund: Fakultät Maschinenbau - TU Dortmund.

- Kirsch, V. (2017). Wirtschaftlichkeitsanalyse am Beispiel eines Assistenzsystems für den Fertigungsbereich. Regensburg: Maschinenfabrik Rheinhausen GmbH. Abgerufen am 14.07.2021 von [https://www.haufe.de/finance/haufe-finance-office-premium/wirtschaftlichkeitsanalyse-am-beispiel-eines-assistenzsystems-fuer-den-fertigungsbereich\\_idesk\\_PI20354\\_HI9000075.html](https://www.haufe.de/finance/haufe-finance-office-premium/wirtschaftlichkeitsanalyse-am-beispiel-eines-assistenzsystems-fuer-den-fertigungsbereich_idesk_PI20354_HI9000075.html)
- Kistler. (2018). Modulare Industrie 4.0 Lösungen schaffen mehr Transparenz. Produktion, Heft 23, S. 30.
- Kleehaus, M., & Matthes, F. (2019). Challenges in Documenting Microservice-Based IT Landscape: A Survey from an Enterprise Architecture Management Perspective. 23rd International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC) (S. 11-20). IEEE: Paris.
- Kletti, J. (2015). Industrie 4.0: MES ermöglicht Dezentralisierung, Digital Manufacturing, Heft 1. S. 6-7.
- Kneuper, R. (2011). Was ist eigentlich Prozessqualität? Informatik 2011 - 41. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik. TU-Berlin: Gesellschaft für Informatik. Abgerufen am 20.07.2021 von <https://www.user.tu-berlin.de/komm/CD/paper/090712.pdf>
- Koch, V., & Geissbauer, R. (2014). Industrie 4.0. Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution. PwC, strategy& - Formerly Booz & Company. Abgerufen am 14.07.2021 von <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/industrie-teams/industriegueter/industrie-4-0-chancen/industrie-4-0.pdf>
- Kofner, S. (2016). Investitionsrechnung für Immobilien (4. Aufl.). Freiburg: Haufe-Lexware Verlag.
- Konrad, J., Weyer, J., Cepera, K., & Adelt, F. (2020). Echtzeitsteuerung Komplexer Systeme: eine Simulationsstudie, Soziologisches Arbeitspapier Nr. 57/2020. H. Hirsch-Kreinsen, & J. Weyer (Hrsg.). Dortmund: TU Dortmund. Abgerufen am 21.08.2021 von [https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/39082/1/AP57\\_Konrad-Weyer-Cepera-Adelt\\_Echtzeitsteuerung-komplexer-Systeme\\_04-2020.pdf](https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/39082/1/AP57_Konrad-Weyer-Cepera-Adelt_Echtzeitsteuerung-komplexer-Systeme_04-2020.pdf)
- Korhonen, J.-J., Halen, M. (2017). Enterprise Architecture for Digital Transformation. 19th Conference on Business Informatics (CBI). (S. 349-358) IEEE: Thessaloniki.

- Krebs, M. (1998). Die virtuelle Unternehmung als Wissensorganisation: Potentiale und Grenzen des Wissensmanagements. Wuppertal: Bergische Universität, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften.
- Krieger, W. (2018). Single Sourcing. Abgerufen am 22.09.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/single-sourcing-51929/version-275080>
- Krieger, C., & Müller, H. (2015). Ergonomie im Zeitalter von Industrie 4.0. MM: Maschinen Markt, Heft 8, S. 40-43.
- Krüger, J., Vick, A., Chemnitz, M., Rosenstrauch, M., Hügler, J., Fechteler, M., & Blankenburg, M. (2017). Daten, Information und Wissen in Industrie 4.0, In: G. Reinhart (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik, S. 89-110. München: Carl Hansen Verlag.
- Kruschwitz, L., & Lorenz, D. (2019). Investitionsrechnung (15. Aufl.). Oldenbourg: De Gruyter Verlag.
- Küber, C. (2017). Methode zur Planung modularer, produkt-flexibler Montagekonfigurationen in der Variantenreichen Serienfertigung. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Abgerufen am 24.07.2021 von [https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9382/1/Kueber\\_69.pdf](https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9382/1/Kueber_69.pdf)
- Kukartz, U. (2007). Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten (2. Aufl.). Wiesbaden: VS Verlag.
- Kuyumcu, A. (2013). Modellierung der Termintreue in der Produktion. Hamburg: Universität Hamburg-Harburg.
- Kühn, W. (2006). Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner. München/Wien: Carl Hansen Verlag.
- Langhoff, T., & Weber, U. (2017). Demografiewerkzeuge im Unternehmen. In: E. Westkämper, D. Spath, H.-J. Bullinger, & H.-J. Warnecke (Hrsg.), Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation, S. 587-600. Berlin: Springer Verlag GmbH Deutschland.

- Lanza, G., Rühl, J., Peters, S. (2009). Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität in der Produktion. ZWF: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Heft 11, S. 1039-1044.
- Lasi, H., Fettke, P., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industrie 4.0. Wirtschaftsinformatik, 56. Jahrgang. Heft 4 , S. 261-264.
- Laßmann, G., Busse von Colbe, W., & Witte, F. (2015). Investitionstheorie und Investitionsrechnung (4. Aufl.). Heidelberg: Springer Verlag.
- Laux, H., & Schabel, M. (2009). Subjektive Investitionsbewertung, Marktbewertung und Risikoteilung: Grenzpreise aus Sicht börsennotierter Unternehmen und individuellen Investoren im Vergleich. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Laux, H., Schenk-Mathes, H., & Gillenkirch, R. (2018). Entscheidungstheorie (10. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.
- LeanIX. (2020). Business Capabilities. Abgerufen am 20.11.2020 von <https://www.leanix.net/de/business-capability>
- Lechler, A., & Schlechtendahl, J. (2017). Steuerung aus der Cloud. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd.1: Produktion (S. 61-74). Berlin: Springer Verlag.
- Leupold, M., & Pirron, J. (2018). Die Zukunft der IT-Systemlandschaft, In: Jahrbuch Logistik 2018. Abgerufen am 23.10.2020 von <https://www.protema.de/fileadmin/content/aktuelles/veroeffentlichungen/jahrbuch-logistik-2018-artikel-zukunft-der-it-systemlandschaft-artikel-protema.pdf>
- Leymann, F., & Fehling, C. (2018). Cloud Computing. Abgerufen am 15.07.2021 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/cloud-computing-53360/version-276453>
- Liebetruth, T. (2005). Die Informationsbasis des Supply Chain Controllings: Forschungsstand, empirische Analyse, Gestaltungsempfehlungen. Köln: Kölner Wissenschaftsverlag.
- Liebrecht, C. (2020). Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz: Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

- Liebrecht, C., Krogmann, M., Stricker, N., & Lanza, G. (2019). Method toolbox for implementing Industry 4.0 - Development of a methodology for the identification and evaluation of Industry 4.0 potentials in medium-sized companies. WT: Werkstattstechnik. Vol. 109, Heft 4, S. 214 - 220.
- Liggismeyer, P., & Forstner, L. (2017). Safety in der Industrie 4.0, In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1: Produktion (2. Aufl., S. 107-124). Berlin: Springer Verlag.
- Lindner, A., Richter, I., Becker, P., Göhner, H., & Maier, R. (2019). Wertstromdesign (3. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag.
- Lindner, D. (2017). Tipps zur Methode Literaturanalyse. Abgerufen am 16.06.2021 von <https://agile-unternehmen.de/tipps-literaturanalyse/>
- Lipsitz, J. W., & Breslin, A. (2014). The Total Economic Impact of Microsoft Office 365: Enterprise Customers. Cambridge: Forrester Research. Abgerufen am 01.01.2020 von <https://www.innovativecomp.com/hubfs/Forrester-SMB-Total-Economic-Impact-Report-Microsoft-Office-365.pdf>
- Luber, S., & Litzel, N. (2016). Was ist Machine Learning? Abgerufen am 14.09.2020 von <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-machine-learning-a-592092/#:~:text=Machine%20Learning%20ist%20ein%20Teilbereich,k%C3%BCnstliches%20Wissen%20aus20Erfahrungen%20generiert.>
- Lucke, D., Defaranceski, M., & Adolf, T. (2017). Cyberphysische Systeme für die prädiktive Instandhaltung. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1: Produktion, 2. Aufl., S. 75-92. Berlin: Springer Verlag.
- Lunze, J. (2016). Automatisierungstechnik: Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme (4. Aufl.). Berlin/Boston: Walter De Gruyter Verlag.
- Lynn, R. (2020). Project Portfolio Management Capabilities for Changing Businesses. Abgerufen am 23.10.2020 von <https://www.planview.com/de/resources/guide/ppm-solution-guide-beginners/project-portfolio-management-capabilities/>

- Magenheimer, K. A. (2014). Lean Management in indirekten Unternehmensbereichen: Modellierung, Analyse und Bewertung von Verschwendung. München: Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik. Abgerufen am 16.07.2021 von <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1176987/1176987.pdf>
- Malone, T. W., & Crowston, K. (1994): The interdisciplinary study of coordination. In: ACM Computer Survey 26 (1), S. 87-119.
- Mankins, M. & Gottfredson, M. (2022) . Strategien für turbulente Zeiten. Harvard Business Manager, Heft Oktober, S. 18-27.
- Mascarella, G. (2005). Rapid Economic Justification Enterprise Edition: A Step-by-Step Guide to Optimizing IT Investments that Forge Alliances Between IT and Business. Redmond USA: Microsoft Corporation. Abgerufen am 14.07.2021 von [http://mbstrauch.com/wp-content/uploads/2013/03/Book\\_MSFT\\_REJ\\_Enterprise\\_.pdf](http://mbstrauch.com/wp-content/uploads/2013/03/Book_MSFT_REJ_Enterprise_.pdf)
- Martin, H. (2016). Transport- und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit (10. Aufl.). Wiesbaden: Springer Verlag.
- Matuschek, I., Kleemann, F., & Haipeter, T. (2018). Industrie 4.0 und die Arbeitsdispositionen der Beschäftigten: Zum Stellenwert der Arbeitenden im Prozess der Digitalisierung der industriellen Produktion. Düsseldorf: Forschungsinstitut für gesellschaftliche Weiterentwicklung e. V. (FGW). Abgerufen am 20.07.2021 von [https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/66369/ssoar-2018-matuschek\\_et\\_al-Industrie\\_40\\_und\\_die\\_Arbeitsdispositionen.pdf?sequence=1&isAllowed=y&lnkname=ssoar-2018-matuschek\\_et\\_al-Industrie\\_40\\_und\\_die\\_Arbeitsdispositionen.pdf](https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/66369/ssoar-2018-matuschek_et_al-Industrie_40_und_die_Arbeitsdispositionen.pdf?sequence=1&isAllowed=y&lnkname=ssoar-2018-matuschek_et_al-Industrie_40_und_die_Arbeitsdispositionen.pdf)
- Mayring, P. (2010). Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken (11. Aufl.). Weinheim: Beltz Verlag.
- Meier, S. (2014). Qualitative Inhaltsanalyse. Abgerufen am 14.10.2020 von <https://blogs.uni-paderborn.de/fips/2014/11/26/qualitative-inhaltsanalyse/>
- Mertens, P., Barbian, D., & Baier, S. (2017). Digitalisierung und Industrie 4.0 - eine Relativierung (1. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien.

- Metternich, J., Meudt, T., & Hartmann, L. (2018). Leitfaden Industrie 4.0 trifft Lean: Wertschöpfung ganzheitlich steigern. (VDMA, PTW, & FKM, Hrsg.) Frankfurt am Main: VDMA. Abgerufen am 21.07.2021 von [https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/26095707/Leitfaden\\_I40\\_Lean\\_1524489604061.pdf](https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/26095707/Leitfaden_I40_Lean_1524489604061.pdf)
- Meyer, L. & Seiz, M. (2019). Industrie 4.0: Auf der Agenda der Top-Entscheider angekommen. Abgerufen am 12.06.2021 von <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/mittelstand/contents/studie-industrie-4-0-mittelstand.html>
- Microsoft. (2019). Erstellen eines funktionsübergreifenden Flussdiagramms[...]. Abgerufen am 15.09.2020 von <https://support.microsoft.com/de-de/office/erstellen-eines-funktions%C3%BCbergreifenden-flussdiagramms-4a403033-9787-454f-b87e-b88452c47a21>
- microTOOL. (2018). Use Cases. Das System im Überblick. Abgerufen am 25.09.2019 von <https://www.microtool.de/wissen-online/was-sind-use-cases/>
- Mieg, H., & Näf, M. (2005). Experteninterviews: in den Umwelt- und Planungswissenschaften. Eine Einführung und Anleitung. (2. Aufl.). ETH Zürich: Institut für Mensch-Umwelt-Systeme (HES). Abgerufen am 11.10.2020 von [http://www.metropolenforschung.de/download/Mieg\\_Experteninterviews.pdf](http://www.metropolenforschung.de/download/Mieg_Experteninterviews.pdf)
- Moormann, J. (2018). Cloud Computing. Abgerufen am 08.12.2020 von <https://www.gabler-banklexikon.de/definition/cloud-computing-70649>
- Mosler, A. (2017). Integrierte Unternehmensplanung: Anforderungen, Lösungen und Echtzeit simulation im Rahmen von Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Mubarak, H. K. (2013). Agentenbasiertes Selbstmanagement von Automatisierungssystemen. In: P. Göhner (Hrsg.), Agentensysteme in der Automatisierungstechnik, S. 225-242. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Müller, A., Lang, J., & Hess, T. (2003). Wirtschaftlichkeit von Controlling-Anwendungssystemen: Konzeption und Erprobung eines Multiperspektiven-Ansatzes. Zeitschrift für Controlling und Management, Sonderheft Anwendungssysteme im Controlling (2), S. 58-66.

- Müller, B., & Härtig, F. (2017). Herausforderungen und Lösungsansätze zur einheitlichen Kommunikation von Messdaten für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge. In: S. Rheinmeier (Hrsg.), Industrie 4.0: Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele, 1. Aufl., S. 49-58. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Müller, I., & Bandl, M. (2021). Der Erfolgsfaktor für Reaktionsfähigkeit nach dem Lockdown. Produktion, Heft 4/2021, S. 30.
- Müller, J., Voigt K.-I. (2018). Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. Vol. 5, No. 5. S. 659-670. Abgerufen am 20.12.2021 von <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40684-018-0056-z.pdf>
- Müller-Stewens, G. (2018). Engpass. Abgerufen am 16.07.2021 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/engpass-32610/version-256149>
- Münster, S. (2014). Interdisziplinäre Kooperation bei der Erstellung geschichtswissenschaftlicher 3D-Modelle. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Neugebauer, R. (2018). Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. (1. Aufl.). München: Springer Verlag.
- Niggemann, O., Biswas, G., Kinnebrew, J., Khorasgani, H., Volgmann, S., & Bunte, A. (2017). Datenanalyse in der intelligenten Fabrik. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung, 2. Aufl., S. 471-490. Berlin: Springer Verlag.
- Obermeier, R. (2015). Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Passau: Springer Gabler Verlag.
- Obermeier, R. (2019). Industrie 4.0 und Digitale Transformation als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. In: R. Obermeier (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation: Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen, 1. Aufl., S. 3-46. Wiesbaden: Springer Verlag.

- Obermeier, R., & Grottko, M. (2017). Controlling in einer "Industrie 4.0" - Neue Möglichkeiten und neue Grenzen für die Steuerung von Unternehmen. In: M. Seiter, L. Grüntner, & S. Berlin (Hrsg.), Betriebswirtschaftliche Aspekte von Industrie 4.0, S. 111-148. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.
- Obermeier, R., Hofmann, J., & Kirsch, V. (2015). Konzeption einer Prozess- und Potenzialanalyse zur Ex-ante-Beurteilung von Industrie 4.0-Investitionen: Zur Methodik einer Abschätzung von Wirtschaftlichkeitspotenzialen. In: Controlling: Zeitschrift für erfolgsorientierte Unternehmenssteuerung, Heft 27, S. 485-492. Abgerufen am 17.07.2021 von [https://www.beck-elibrary.de/10.15358/0935-0381-2015-8-9-485.pdf?download\\_full\\_pdf=1](https://www.beck-elibrary.de/10.15358/0935-0381-2015-8-9-485.pdf?download_full_pdf=1)
- Obermeier, R., & Salinger, E. (2020). Betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie: Einführung in die Logik individueller und kollektiver Entscheidungen (7. Aufl.). Oldenbourg: De Gruyter.
- Ojasalo, J., & Ojasalo, K. (2017). Service Logic Business Model Canvas, Journal of Research in Marketing and Entrepreneurship, Vol 20, Issue: 1, S.70-98. Espoo: Emerald Publishing Limited.
- Okujava, S. (2006). Wirtschaftlichkeitsanalysen für IT-Investitionen: ein kontinuierlicher und stakeholderorientierter Ansatz. Duisburg: WiKu Verlag.
- Ostertag, R. (2008). Supply Chain Koordination im Auslauf in der Automobilindustrie: Koordinationsmodell auf Basis von Fortschrittszahlen zur dezentralen Planung bei zentraler Informationsbereitstellung. Wiesbaden: Gabler/GWV Fachverlag GmbH.
- Ott, J. (2017). Geleitwort. In: V. P. Anderlfinger, T. Hänisch (Hrsg.), Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern (S. V-VI). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Pantförder, D., Mayer, F., Dietrich, C., Göhner, P., Weyrich, M., & Vogel-Heuser, B. (2017). Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung, 2. Aufl., S. 31-44. Berlin: Springer.
- Pape, U. (2018 a). Amortisationsrechnung. Abgerufen am 02.01.2019 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/amortisationsrechnung-28201/version-251836>

- Pape, U. (2018 b). Kapitalwert. Abgerufen am 29.09.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kapitalwert-39806/version-263207>
- Pape, U., Weber, J., Schaefer, C., & Papenfuß, U. (2018). Wirtschaftlichkeitsrechnung. Abgerufen am 19.08.2019 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/wirtschaftlichkeitsrechnung-47130/version-270398>
- Papenform, J., Frank, U., & Strughold, S. (2015). Integration von IT in die Automatisierungstechnik (1. Aufl.). Heidelberg: Springer Verlag.
- Pawlowsky, P. (2019). Wissensmanagement. Berlin/Boston: Walter de Gruyter Verlag.
- Pfeiffer, S. (2015). Industrie 4.0 und die Digitalisierung der Produktion – Hype oder Megatrend? Abgerufen am 13.10.2020 von <https://www.bpb.de/apuz/209955/industrie-4-0-und-die-digitalisierung-der-produktion?p=1>
- Pietsch, T. (2003). Bewertung von Informations- und Kommunikationssystemen (2. Aufl.). Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Plattform Industrie 4.0. (2019). Künstliche Intelligenz in der Industrie 4.0. Working Paper. Berlin: BMWi.
- Poggensee, K. (2015). Investitionsrechnung: Grundlagen - Aufgaben - Lösungen (3. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Poggensee, K. (2016). Klausurenkurs Investitionsrechnung. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Porter, M. E. (1989). Globaler Wettbewerb: Strategien der neuen Internationalisierung (1. Aufl.). Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Porter, M. E. (2014). Wettbewerbsvorteile: Spitzenleistungen erreichen und behaupten (8. Aufl.). Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Poschmann, H. (2021). Konzeption und Entwicklung eines Robot Cognition Processors für adaptive Demontageanwendungen. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld: Technische Universität Clausthal. Abgerufen am 30.11.2021 von [https://www.researchgate.net/profile/Hendrik-Poschmann/publication/355482737\\_Konzeption\\_und\\_Entwicklung\\_eines\\_Robot\\_Cognition\\_Processors\\_fur\\_adaptive\\_Demontageanwendungen/links/617403760be8ec17a9181355/Konzeption-und-Entwicklung-eines-Robot-Cognition-Processors-fuer-adaptive-Demontageanwendungen.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hendrik-Poschmann/publication/355482737_Konzeption_und_Entwicklung_eines_Robot_Cognition_Processors_fur_adaptive_Demontageanwendungen/links/617403760be8ec17a9181355/Konzeption-und-Entwicklung-eines-Robot-Cognition-Processors-fuer-adaptive-Demontageanwendungen.pdf)

- Potthof, I. (1998). *Kosten und Nutzen der Informationsverarbeitung. Analyse und Beurteilung von Investitionsentscheidungen* (1. Aufl.). Wiesbaden: DUV.
- Proff, H., Sandau, J., Gönninger, F., & Bittrich, C. (2016). *Manufacturing 4.0: Meilenstein, Must-Have oder Millionengrab?*. Deloitte. Abgerufen am 13.11.2020 von [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/DELO-2267\\_Manufacturing-4.0-Studie\\_s.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/DELO-2267_Manufacturing-4.0-Studie_s.pdf)
- Qualtrics. (2020). *Qualitative Forschung: Definition, Methoden und Beispiele*. Abgerufen am 11.10.2020 von <https://www.qualtrics.com/de/erlebnismanagement/marktforschung/qualitative-forschung/>
- REFA AG. (2020 b). *FMEA*. Abgerufen am 20.11.2020 von <https://refa.de/service/refa-lexikon/fmea>
- REFA AG. (2020 c). *OEE - Overall Equipment Effectiveness*. Abgerufen am 02.12.2020 von <https://refa.de/service/refa-lexikon/oeo-overall-equipment-effectiveness>
- REFA Consulting AG. (2019). *Standardisierung*. Abgerufen am 15.07.2021 von <https://refa-consulting.de/refa-lexikon/s/standardisierung>
- Regelmann, P. A. (2019). *Projektmanagement und -controlling im Kontext von Industrie 4.0 - Fabrikanpassungen: Eine qualitativ-empirische Analyse in Deutschland und China*. Hamburg: Dr. Kovac.
- Regulin, D., & Vogel-Heuser, B. (2017). *Agentenorientierte Verknüpfung existierender heterogener automatisierter Produktionsanlagen*. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, 2. Aufl., S. 93-117. Berlin: Springer Verlag.
- Reinhart, G., Bengler, K., Dollinger, C., Intra, C., Lock, C., Popova-Dlogosch, S., Vernim, S. (2017). *Der Mensch in der Produktion von Morgen*, In: G. Reinhart (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*, S. 51-88). München: Carl Hanser Verlag.
- Reinhmeier, S. (2017). *Vorwort*. In: S. Reinhmeier (Hrsg.), *Industrie 4.0: Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele* (S. V-VI). Wiesbaden: Springer Verlag.

- Reischauer, G. & Schober, L. (2016). Industrie 4.0 durch strategische Organisationsgestaltung managen. In: R. Obermaier (Hrsg.), Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen, S. 271-290. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.
- Reckelkamm, T. & Deuse, J. (2020). Kompetenzentwicklung für Maschinelles Lernen zur Konstituierung der digitalen Souveränität. In: E. A. Hartmann (Hrsg.), Digitalisierung souverän gestalten: Innovative Impulse im Maschinenbau, S. 31-43. Berlin: Springer Verlag.
- Rodriguez Flick, D. (2010). Virtuelle Absicherung manueller Fahrzeugmontagevorgänge mittels digitalem 3-D-Menschmodell - Optimierung der Mensch-Computer-Interaktion. München: TU München, Lehrstuhl für Ergonomie.
- Rohrbach, T., & Albrecht, S. (2017). Deutscher Industrie 4.0 Index. Köngen: Staufen Digital Neonex GmbH und Staufen AG. Abgerufen am 14.07.2021 von [https://www.staufen.a/g/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-studie-deutscher-industrie-4.0-index-2017-de\\_DE.pdf](https://www.staufen.a/g/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-studie-deutscher-industrie-4.0-index-2017-de_DE.pdf)
- Rolfes, B. (2020). Return in Investment (RoI). Abgerufen am 24.04.2021 von <https://www.gabler-banklexikon.de/definition/return-investment-roi-60969>
- Roth, A. (2016). Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin Heidelberg: Springer Gabler Verlag.
- Röbken, H. & Mitschke, R. (2021). Qualitative und quantitative Forschungsmethoden. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Sabou, M., Kovalenko, O., Ekaputra, F., & Biffel, S. (2017). Beiträge des Semantic Web zum Engineering für Industrie 4.0. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung, 2. Aufl., S. 292-334. Berlin: Springer Verlag.
- Sander, R. (2014). Industrie 4.0: Vernetzung findet auch bei den Mitarbeitern statt!. VDI Nachrichten, Heft 14, S.20.
- Sassone, P. G. (1987). Cost-Benefit Methodology for Office Systems. Abgerufen am 17.07.2021 von <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/27641.28059>

- Schäffer, T., Leyh, C., & Beckmann, H. (2018). ALADDIN – Vorschlag eines Analyse- und Berechnungsmodells zur Investitionsbewertung für ein unternehmensweites Datenqualitätsmanagement. Lüneburg: Multikonferenz Wirtschaftsinformatik. Abgerufen am 18.07.2021 von [https://www.researchgate.net/profile/Christian\\_Leyh/publication/323629342\\_ALADDIN\\_-\\_Vorschlag\\_eines\\_Analyse-\\_und\\_Berechnungsmodells\\_zur\\_Investitionsbewertung\\_fur\\_ein\\_unternehmensweites\\_Datenqualitätsmanagement/links/5aa51d00a6fdccd544bb4f25/ALADDIN-Vorsch abgerufen](https://www.researchgate.net/profile/Christian_Leyh/publication/323629342_ALADDIN_-_Vorschlag_eines_Analyse-_und_Berechnungsmodells_zur_Investitionsbewertung_fur_ein_unternehmensweites_Datenqualitätsmanagement/links/5aa51d00a6fdccd544bb4f25/ALADDIN-Vorsch abgerufen)
- Schäftner, S. (2018). Multi Device Strategien: Die Nutzung mehrerer Geräte bei einer Kaufentscheidung. Abgerufen am 29.11.2020 von <https://real2business.de/multi-device-strategien/>
- Schaller, H., & Höft, D. (1985). Software-Konfigurationsmanagement in großen Softwareprojekten. Informatik Spektrum, Heft 3, S. 138-152.
- Schebek, L., Kannengießer, J., Campitelli, A., Fischer, J., Abele, E., Bauerdick, C., Bergweiler, S. (2017). Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0: Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). Abgerufen am 14.07.2021 von [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie\\_Ressourceneffizienz\\_durch\\_Industrie\\_4.0.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf)
- Schiffer, M., & Autenrieth, P. (2019). Industrie 4.0 profitabel: Life Cycle Costing und Performancequantifizierung von Cyber-Physischen Systemen in der Intralogistik. Abgerufen am 12.28.2019 von [https://38c3eb27-ef6a-4672-a6c6-675787cb97f7.filesusr.com/ugd/4ac764\\_8aad2d4893e7472a877aecdac735f2b.pdf](https://38c3eb27-ef6a-4672-a6c6-675787cb97f7.filesusr.com/ugd/4ac764_8aad2d4893e7472a877aecdac735f2b.pdf)
- Schiller, T. (2015). Wirtschaftlichkeitsbewertung von Digitalisierungsprojekten, In: Eine Sonderbeilage in Automobilwoche. S. 2-3.
- Schlick, J., Stephan, P., Loskyll, M., & Lappe, D. (2017). Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung, 2. Aufl., S. 3-29. Berlin: Springer Verlag.
- Schlicke, J., & Negele, K. (2019). Industrie 4.0 Index 2019. Köngen/Stuttgart: Staufen AG & Staufen Digital Neonex GmbH. Abgerufen am 14.07.2021 von <https://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-Studie-Industrie-4-0-index-2019-de.pdf>

- Schließmann, A. (2017). iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4: Allgemeine Grundlagen, 2. Aufl., S. 171-215. Berlin: Springer Verlag.
- Schlüter, F. (2020). Vorgehensmodell zur Entwicklung und Bewertung von Digitalisierungsbeiträgen zum Supply-Chain-Risikomanagement: Am Beispiel eines Distributionsprozesses in der Stahlindustrie. Dissertation. Dortmund: Praxiswissen Service UG.
- Schmelting, J. (2019). Produktions-Controlling im Übergang zur Digitalisierung: Eine qualitativ-empirische Studie an der Dyade Fertigung und Controlling. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Schmitt, R. H., Ellrich, M., Schlegel, P., Ngo, Q., Emonts, D., Montavon, B., Buschmann, D., Lauther, R. (2020). Datenbasiertes Qualitätsmanagement im Internet of Production. In: W. Frenz (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft, S. 489-516. Berlin: Springer Verlag.
- Schmucker, U., Haase, T. & Schumann, M. (2015). Digital Engineering und Operation. In: M. Schenk (Hrsg.), Produktion und Logistik mit Zukunft: Digital Engineering and Operation. S. 283-373. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Schneider, S., & Lindemann, U. (2005). Anforderungen an ein Bewertungssystem für Methoden, Beitrag für: 16. Symposium Design For X. München: Lehrstuhl für Produktentwicklung. Abgerufen am 21.07.2021 von <https://www.designsociety.org/publication/27627/Anforderungen+an+ein+Bewertungssystem+für+Methoden>
- Schuh, G., Boos, W., Kelzenberg, C., de Lange, J., Stracke, F., Helbig, J., Ebbecke, C. (2018). Industrie 4.0: Implement it!: Ein Leitfaden zur erfolgreichen Implementierung von 4.0 Lösungen. Aachen: Werkzeugmaschinenlabor WZL. Abgerufen am 14.07.2021 von [https://werkzeugbau-akademie.de/wp-content/uploads/sites/17/2015/06/WZL\\_I4.0\\_Studie\\_Webversion.pdf](https://werkzeugbau-akademie.de/wp-content/uploads/sites/17/2015/06/WZL_I4.0_Studie_Webversion.pdf)
- Schuh, G., Potente, T., Reuter, C., & Hauptvogel, A. (2017). Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme, In B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung, 2. Aufl., S. 75-92. Berlin: Springer.

- Schuld, S., & Pokorni, B. (2016). Industrie 4.0 - Wo steht die Revolution der Arbeitsgestaltung? Ergebnisse einer Befragung von Produktionsverantwortlichen deutscher Unternehmen. Ulm: Ingenics AG. Abgerufen am 14.07.2021 von <http://kmu-digital.eu/de/service-kompetenz/publikationen/studien/49-industrie-4-0-wo-steht-die-revolution-der-abreitsgestaltung/file>
- Schulte, A. T. (2020). Business Case Kalkulator für innovative Geschäftsmodelle. Abgerufen am 06.11.2020 von [https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b2/einkauf\\_finanzen\\_supply\\_chain\\_management/produkte.html](https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b2/einkauf_finanzen_supply_chain_management/produkte.html)
- Schulte, G. (2007). Investition: Investitionscontrolling und Investitionsrechnung (2. Aufl.). München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Schulz, C. (2020). Die Capability Map - die Fähigkeiten einer Organisation visuell weiterentwickeln. Abgerufen am 20.09.2020 von <https://www.palladio-consulting.de/capability-map/>
- Schumacher, P., Weckenborg, C., Spengler, T., Schneider, D., Huth, T., & Vietor, T. (2020). Das Potenzial-Modell: Eine Methode zur Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen bei der Auswahl geeigneter Industrie 4.0-Lösungen. Abgerufen am 24.11.2021 von [https://industrie40management.de/sites/industrie-management.de/files/schumacher\\_Das-Potenzial-Modell\\_IM-2020-6.pdf](https://industrie40management.de/sites/industrie-management.de/files/schumacher_Das-Potenzial-Modell_IM-2020-6.pdf)
- Schumann, M. (1990). Abschätzung von Nutzeffekten zwischenbetrieblicher Informationsbearbeitung. Wirtschaftsinformatik, Heft 4, S. 307-319.
- Schumann, M. (1993). Wirtschaftlichkeitsbeurteilung für IV-Systeme. Wirtschaftsinformatik, Heft 6, S. 167-178.
- Schumann, S. (2018). Quantitative und qualitative empirische Forschung: Ein Diskussionsbeitrag. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Schwegmann, A., & Laske, M. (2012). Istmodellierung und Istanalyse. In: M. K. M. Rosemann (Hrsg.), Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung, S. 165-194. Berlin: Springer Gabler Verlag.
- Schwenker, B. (2021). Die BWL wird unterschätzt. Harvard Business Manager, Heft April, S. 70-73.

- Seiter, M., Bayrle, C., Berlin, S., Ute, D., Rusch, M., & Treusch, O. (2016). Roadmap Industrie 4.0: Ihr Weg zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0. Hamburg: Tredition Verlag.
- Seiter, M., Grünert, L., & Berlin, S. (2017). Betriebswirtschaftliche Aspekte von Industrie 4.0 (1. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Sendler, U. (2016). Die Grundlagen, In: Industrie 4.0 grenzenlos, U. Sendler (Hrsg.), S.17-40. Heidelberg: Springer Vieweg.
- Shafiq, S. I., Sanin, C., Szczerbicki, E. & Toro, C. (2015). Virtual Engineering Object / Virtual Engineering Process: A specialized form of Cyber Physical System for Industrie 4.0. 19th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems. Procedia Computer Science 60 (2015). S.1146-1155.
- Siemens AG. (2020). Künstliche Intelligenz in der Industrie; Video: Die Vorteile von KI. Abgerufen am 25.10.2020 von <https://new.siemens.com/global/de/produkte/automatisierung/themenfelder/artificial-intelligence-in-industry.html>
- Siemens AG. (2015). Wertschöpfung 4.0: Wie die digitale Transformation reale Werte schafft. Berlin und München: Siemens AG. Abgerufen am 14.07.2021 von <http://docplayer.org/65541597-Siemens-deutschland-kundenumfrage-wertschoepfung-4-0-wie-die-digitale-transformation-reale-werte-schafft-siemens.html>
- Siemens AG. (2020). Teamcenter. Abgerufen am 21.09.2020 von <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/products/teamcenter/>
- Siller, M. (2021). Industrie 4.0. Abgerufen am 09.07.2021 von <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/industrie-40.html?wmc=blog>
- Silverman, D. (2004). Qualitative Research: Theory, Method and Practice (2. Aufl.). London: SAGE Publications Ltd.
- Simon, H., Clausen, G., Tacke, G., & Dautzenberg, N. (2018). Umsatz. Abgerufen am 19.10.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/umsatz-48634/version-271885>

- Smith, M. (2010). The Gartner Business Value Model: A Framework for Measuring Business Performance. Las Vegas, NV: Business Intelligence Summit. Abgerufen am 14.07.2021 von [https://docuri.com/download/gartner-business-framework\\_59a8db30f581719e12af2bf3\\_pdf](https://docuri.com/download/gartner-business-framework_59a8db30f581719e12af2bf3_pdf)
- Soder, J. (2017). Use Case Production. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1: Produktion, 2. Aufl., S. 3-26. Berlin: Springer Verlag.
- Speck, M., & Schnetgöke, N. (2012). Sollmodellierung und Prozessoptimierung. In: M. Rosemann, M. Kugeler, & J. Becker (Hrsg.), Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung, S. 195-228. Berlin: Springer Gabler Verlag.
- Spöttl, G., & Windelband, L. (2019). Industrie 4.0: Risiken und Chancen für die Berufsbildung (2. Aufl.). Bielefeld: wbv Media.
- Stark, R., Damerau, T., & Lindow, K. (2016). Industrie 4.0 – Digitale Neugestaltung der Produktentstehung und Produktion am Standort Berlin; In: U. Sendler (Hrsg.), Industrie 4.0 grenzenlos, S. 121-136. Heidelberg: Springer Verlag.
- Stark, R., Damauer, T. & Hayka, H. (2011). PLM-basierte Innovationsbeschleunigung als integraler Teil des Systems Engineering. Berlin: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb und Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik. Abgerufen am 19.10.2022 von [https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Damerau/publication/268799932\\_PLM-basierte\\_Innovationsbeschleunigung\\_als\\_integraler\\_Teil\\_des\\_Systems\\_Engineering/links/5475b7150cf2778985af0e9b/PLM-basierte-Innovationsbeschleunigung-als-integraler-Teil-des-Systems-Engineering.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Damerau/publication/268799932_PLM-basierte_Innovationsbeschleunigung_als_integraler_Teil_des_Systems_Engineering/links/5475b7150cf2778985af0e9b/PLM-basierte-Innovationsbeschleunigung-als-integraler-Teil-des-Systems-Engineering.pdf)
- Stegmüller, D., & Zürn, M. (2017). Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1: Produktion, 2. Aufl., S. 27-44. Berlin: Springer.
- Steidle, R., & Rossnagel, A. (2005). Multimedia-Assistenten im Betrieb: datenschutzrechtliche Anforderungen, rechtliche Regelungs- und technische Gestaltungsvorschläge für mobile Agentensysteme. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

- Steven, M. (2019). *Industrie 4.0: Grundlagen - Teilbereiche - Perspektiven*. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH
- Stocker, A., Lechner, G., Rosenberger, M., Lütkemeyer, M., Felsberger, A., Sala, A., & Reiner, G. (2019). Eine Vorgehensweise zur Evaluierung von Industrie 4.0 Use Cases. Abgerufen am 23.10.2020 von <https://dl.gi.de/bitstream/handle/20.500.12116/25164/300-06.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Stöfen, M. (2018). Betriebskosten. Abgerufen am 20.10.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/betriebskosten-30728/version-254304>
- Swimlane.info. (2020). Swimlane.info. Abgerufen am 28.11.2020 von <http://www.swimlane.info/de/>
- Syska, A. (2006). *Produktionmanagement: Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute* (1. Aufl.). Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. TH Gabler / GWV Fachverlag GmbH.
- Talwalkar, A., Rostamizadeh, A., & Mohri, M. (2012). *Foundations of machine learning*. Cambridge: MIT Press.
- Taylor, F. W. (1914). *The principles of scientific management*. New York.
- Teucke, M., Werthmann, D., Lewandowski, M., & Thoben, K.-D. (2017). Einsatz mobiler Computersysteme im Rahmen von Industrie 4.0 zur Bewältigung des demografischen Wandels. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, 2. Aufl., S. 575-601. Berlin: Springer Verlag.
- Torkelli, M., & Tuominen, M. (2002). The contribution of technology selection to core competencies. *International Journal of Production Economics*. Vol. 77, S. 271-284.
- Trenke, A., & Furmans, K. (2017). Der Mensch als Teil von Industrie 4.0: Interaktionsmechanismen bei autonomen Materialflusssystemen. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel, *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 3: Logistik*, 2. Aufl., S. 45-60. Berlin: Springer Verlag.
- Trompisch, P. (2017). Industrie 4.0 und die Zukunft der Arbeit. *Elektrotechnik & Informationstechnik*, Volume 134, Issue 34, S. 370-373.

- TU-Braunschweig. (2016). Paarweiser Vergleich. Abgerufen am 08.04.2019 von <https://methodos.ik.ing.tu-bs.de/methode/PararweiserVergleich.html>
- Uhlmann, E., Hohwieler, E., Geisert, C. (2017). Intelligent production systems in the era of Industrie 4.0 - changing mindsets and business model. *Journal of Machine Engineering*. Vol. 17, No. 2, S. 5-24. Abgerufen am 20.12.2021 von <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-9e39519b-a4fa-4803-a1ea-9dd601ad1ccf>
- Ulrich P. & Hill W. (1976). Wirtschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil 1). In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium, Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakte* 5 (7), S. 304-309.
- Ulrich H. (1981). Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: N. Geist & R. Köhler, *Die Führung des Betriebs*. Festschrift für Curt Sandig, S. 1-26. Stuttgart: Pöschel.
- Ulrich H. (1995). Von der Betriebswirtschaftslehre zur systemorientierten Managementlehre. In: R. Wunderer (Hrsg.): *Betriebswirtschaftslehre als Management- und Führungslehre*, 3. Aufl., S. 161-178. Stuttgart: Schäffer-Pöschel Verlag.
- Ullrich, A., Thim, C., Vladova, G., & Gronau, N. (2017). Industrie 4.0 in der Wertschöpfungskette Bau - Ferne Vision oder greifbare Realität. In: S. Rheinmeier, *Industrie 4.0: Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele*, S. 91-115. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Unger, H. (2020). *Wirtschaftlichkeit von Industrie 4.0 Anwendungen*. Chemnitz: Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum. Abgerufen am 12.06.2021 von <https://betrieb-machen.de/investitionen-in-industrie-4.0/>
- Unger-Sternberg, R., & Erlach, K. (2020). Konfiguration der Variantenflexibilität. *wt Werkstatttechnik*, Heft 4, S. 245-249.
- Universität Leipzig. (2019). Experteninterview. *Methodenportal*. Abgerufen am 11.10.2020 von <https://home.uni-leipzig.de/methodenportal/experteninterview/>
- Universität Trier. (2002). *Methodische Überlegungen zu qualitativen Befragungsmethoden, insbesondere Experteninterviews*. Abgerufen am 11.10.2020 von <https://www.uni-trier.de/fileadmin/fb4/prof/VWL/APO/4207ws0102/efstudien.pdf>

- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). Industry 4.0: Managing The Digital Transformation (1. Aufl.). Istanbul: Springer International Publishing Switzerland.
- Valenta, R. (2017). Digitalisierung, IoT, Industrie 4.0 – mit elektrotechnischen Standards unterwegs zum Smart Planet? Ein Plädoyer für das richtige Augenmaß. e & i Elektronik & Informationstechnik, Heft 7, S. 379-381. Abgerufen am 17.06.2019 von <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00502-017-0523-1.pdf>
- VDI/VDE 3693. (2018). Virtuelle Inbetriebnahme.
- VDI ZRE. (2021). Fertigungsgerechte Produktgestaltung. Abgerufen am 11.07.2021 von <https://www.ressource-deutschland.de/instrumente/strategien-und-massnahmen/produktbezogen/fertigungsgerechte-produktgestaltung/>
- VDI ZRE GmbH. (2016). So einfach geht Ressourceneffizienz: Der Management-Leitfaden für das Unternehmen. Berlin: VDI ZRE GmbH. Abgerufen am 20.07.2021 von [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/bilder/publikationen/VDIZRE\\_managementleitfaden\\_a5\\_2016\\_web.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/bilder/publikationen/VDIZRE_managementleitfaden_a5_2016_web.pdf)
- VDMA. (2015). Industrie 4.0 im Industriebau, Revolution oder Evolution? Ergebnisse einer Gemeinschaftsstudie von maexpartners und der VDMA Arbeitsgruppe Großanlagenbau. Frankfurt am Main: VDMA. Abgerufen am 21.07.201 von <https://www.vdma.org/documents/34570/0/Studie%20Industrie%204.0%20im%20Anlagenbau.pdf/e3656c5c-fe8c-389c-7028-76f4c6029770>
- VDMA. (2016). Leitfaden Industrie 4.0 Security: Handlungsempfehlungen für den Mittelstand. Frankfurt am Main: VDMA Verlag.
- VDMA. (2018). Arbeit 4.0 - im Zentrum steht der Mensch. Abgerufen am 28.11.2020 von <https://mensch-maschine-fortschritt.de/reportage/arbeit-4-0-im-zentrum-steht-der-mensch/>
- ViLes. (2019). Konzepte und Definitionen im Modul das Experteninterview. Uni-Oldenburg. Abgerufen am 11.10.2020 von [https://viles.uni-oldenburg.de/navtest/viles0/kapitel02\\_AusgewahlteMethodenIdatenerhebung/modul02\\_DasExperteninterview/ebene01\\_KonzepteIundIDefinitionen/02\\_\\_02\\_\\_01\\_\\_01.php3](https://viles.uni-oldenburg.de/navtest/viles0/kapitel02_AusgewahlteMethodenIdatenerhebung/modul02_DasExperteninterview/ebene01_KonzepteIundIDefinitionen/02__02__01__01.php3)
- Voigt, K.-I. (2018 a). Durchlaufzeit. Abgerufen am 29.09.2019 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/durchlaufzeit-32490/version-256033>

- Voigt, K.-I. (2018 b). Kapazität. Abgerufen am 19.10.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kapazitaet-38981/version-262401>
- Volkman, J. W. (2014). Methode zur Konzeption und zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Digital Engineering-Systemen. In: T. Bauernhansel, A. Verl, & E. Westkämper (Hrsg.), Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Band 38. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Abgerufen am 15.06.2019 von <https://d-nb.info/1067442820/34>
- Vollmer, T. (2020). Technologieauswahl & -implementierung. Abgerufen am 22.09.2020 von <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ProduktionsqualitaetundMesstechnik/produktionsqualitaet/technologieauswahl-und-implementierung.html>
- Wahlster, W., Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., & ten Hompel, M. (2017). Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies. München: Herbert Utz Verlag. Abgerufen am 14.07.2021 von <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-managing-the-digital-transformation-of-companies/>
- Wallergang, L. (2012). Automatisierung macht menschliche Arbeitskraft produktiver. Abgerufen am 06.12.2020 von <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/automation/automatisierung-menschliche-arbeitskraft-produktiver/>
- Wang, S., Wan, J., Li, D., Zhang, C. (2016). Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. In: International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol.: 12, Issue: 1, S.1-10. Abgerufen am 20.12.2021 von <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1155/2016/3159805>
- Wang, Y., Anokhin, O., & Anderl, R. (2017). Concept and Use Case driven Approach for Mapping IT Security Requirements on System Assets and Processes in Industrie 4.0. In: Procedia CIRP: Manufacturing Systems 4.0 – Proceedings of the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, S. 207-212. Abgerufen am 15.07.2021 von <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212827117302937?token=80915DEC0DAA5E4881A854B7C0977EEDD0FC145257AD7E6F7D60202D7674CC35E918973FB833AB11679753C5A1A12DE9&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210715192926>
- Weber, J. (2018 a). Balanced Scorecard. Abgerufen am 12.11.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/balanced-scorecard-28000/version-251640>

- Weber, J. (2018 b). Beschaffungskosten. Abgerufen am 20.10.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/beschaffungskosten-31671>
- Weber, J. (2018 c). Total Cost of Ownership. Abgerufen am 05.12.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/total-cost-ownership-49401/version-272634>
- Weber, J., & Pape, U. (2018). Break-Even-Point. Abgerufen am 02.01.2019 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/break-even-point-27541/version-251192>
- Wee, D., Breuning, M., Kelly, R., & Mathis, R. (2016). Industry 4.0 after the initial hype: Where manufacturers are finding value and how. München: McKinsey & Company. Abgerufen am 14.07.2021 von [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/getting%20the%20most%20out%20of%20industry%204%200/mckinsey\\_industry\\_40\\_2016.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/getting%20the%20most%20out%20of%20industry%204%200/mckinsey_industry_40_2016.ashx)
- Wegener, D. (2017). Industrie 4.0 - Chancen und Herausforderungen für einen Global Player, In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung (2. Aufl.), S. 391-407. Berlin: Springer Verlag.
- Westkämper, E., & Spath, D. (2019). Handbuch Unternehmensorganisation. Stuttgart: Springer Vieweg.
- Westkämper, E., Decker, M., & Jendoubi, L. (2006 b). Einführung in die Organisation der Produktion. Stuttgart: Springer Verlag.
- Westkämper, E., Runde, C., Neunteufel, H., & Kunst, S. (2006 a). Ein Modell zur Wirtschaftlichkeitsbewertung des Einsatzes von Virtual Reality für Aufgaben in der Digitalen Fabrik. wt Werkstattstechnik, Jahrgang 96, Heft 3. Abgerufen am 18.07.2021 von [https://www.researchgate.net/profile/Christoph\\_Runde/publication/327111150\\_Ein\\_Modell\\_zur\\_Wirtschaftlichkeitsbewertung\\_des\\_Einsatzes\\_von\\_Virtual\\_Reality\\_fur\\_Aufgaben\\_in\\_der\\_Digitalen\\_Fabrik/links/5b7a5b3e299bf1d5a716baac/Ein-Modell-zur-Wirtschaftlichkeitsbewertung-des-Einsatzes-von-Virtual-Reality-fuer-Aufgaben-in-der-Digitalen-Fabrik.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Christoph_Runde/publication/327111150_Ein_Modell_zur_Wirtschaftlichkeitsbewertung_des_Einsatzes_von_Virtual_Reality_fur_Aufgaben_in_der_Digitalen_Fabrik/links/5b7a5b3e299bf1d5a716baac/Ein-Modell-zur-Wirtschaftlichkeitsbewertung-des-Einsatzes-von-Virtual-Reality-fuer-Aufgaben-in-der-Digitalen-Fabrik.pdf)
- Weyh, C. (2018). Die Bedeutung körperlicher Leistungsfähigkeit und Arbeitsergonomie in der Prävention und Gesundheitsförderung bei Schweißern. Abgerufen am 01.12.2020 von [http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2018/13652/pdf/WeyhChristopher\\_2018\\_06\\_18.pdf](http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2018/13652/pdf/WeyhChristopher_2018_06_18.pdf)

- Wichert, A. (2000). Künstliche Intelligenz. Abgerufen am 17.06.2019 von <https://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/kuenstliche-intelligenz/6810>
- Wildt, A., & von Rechenberg, W. (2018). Einzelkosten und Gemeinkosten. Abgerufen am 10.08.2019 von <https://www.controllingportal.de/Fachinfo/Kostenrechnung/Einzel-und-Gemeinkosten.html>
- Wilhelm Büchner Hochschule. (2020). Embedded Systems. Abgerufen am 28.11.2020 von [https://www.wb-fernstudium.de/kursseite/master-studiengang-embedded-systems-meng.html?referrer=H\\_GO\\_SK\\_0108432&gclid=EAIaIQobChMIpon54POI4QIVmOd3Ch3JPg1tEAAYASAAEgLk-PD\\_BwE](https://www.wb-fernstudium.de/kursseite/master-studiengang-embedded-systems-meng.html?referrer=H_GO_SK_0108432&gclid=EAIaIQobChMIpon54POI4QIVmOd3Ch3JPg1tEAAYASAAEgLk-PD_BwE)
- Wilhelm, J., Petzoldt, C., Beinke, T., & Freitag, M. (2021). Review of Digital Twin-based Interaction in Smart Manufacturing: Enabling Cyber-Physical Systems for Human-Machine Interaction. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Vol. 34:10, S. 1031-1048. Abgerufen am 20.12.2021 von <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/0951192X.2021.1963482>
- Winkelhake, U. (2019). Digitale Transformation der Autoindustrie: Einführung. Abgerufen am 13.10.2020 von <https://www.springerprofessional.de/automobilelektronik---software/unternehmen---institutionen/digitale-transformation-der-autoindustrie--einfuehrung/16562754>
- Winkler, D., Mordinyi, R., & Biffl, S. (2017). Qualitätssicherung in heterogenen und verteilten Entwicklungsumgebungen für industrielle Produktionssysteme, I In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, & M. ten Hompel (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, 2. Aufl., S. 259-278. Berlin: Springer Verlag.
- Winter, J. (2015). Industrie 4.0 Global: Interviewserie in Südkorea. Abgerufen am 06.12.2020 von <https://www.acatech.de/allgemein/industrie-4-0-global-interviewserie-in-suedkorea/>
- Wohltmann, H.-W., & Wübbenhorst, K. (2018). Ex-ante-Analyse. Abgerufen am 21.11.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ex-ante-analyse-35713/version-259189>
- Wübbenhorst, K. (2018). Primärforschung. Abgerufen am 11.10.2020 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/primaerforschung-42824/version-266166>

- Wübbenhorst, K., Eggert, W., Minter, S., & Gillenkirch, R. (2018). Nutzwertanalyse. Abgerufen am 17.07.2021 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/nutzwert-analyse-42926/version-266266>
- WZL. (2018). RWTH Aachen: Forschung und Entwicklung am WZL. Abgerufen am 07.10.2020 von [http://smartautomationlab.de/\\_C1257D85002DEDEF.nsf/html/de\\_c3e025d762111f3bc1257d850056e81f.htm](http://smartautomationlab.de/_C1257D85002DEDEF.nsf/html/de_c3e025d762111f3bc1257d850056e81f.htm)
- Zdrzalek, L. (2019). Capital: Wirtschaft in Gesellschaft. Die Niedrigzinsphase könnte noch 30 Jahre dauern. Abgerufen am 08.01.2022 von <https://www.capital.de/geld-versicherungen/niedrigzinsphase-koennte-noch-30-jahre-dauern>
- Zimmermann, G. (2003). Investitionsrechnung: Fallorientierte Einführung (2. Aufl.). München: Oldenbourg Wissensverlag GmbH.
- Zitzmann, I., Karl, D., & Hirschner, S. (2019). Nachhaltigkeitsaspekte im Kontext von Digitalisierung und Industrie 4.0. In: W. Becker, B. Eierle, A. Fliaster, B. Ivens, A. Leischnig, A. Pflaum, & E. Sucky (Hrsg.), *Geschäftsmodelle in der digitalen Welt: Strategien, Prozesse und Praxiserfahrungen*, S. 475-492. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*. Vol. 61, S. 530-535. Abgerufen am 20.12.2021 von <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612521002119>

# Anhang

## Anhang 1 Interviewleitfaden der Experteninterviews

### **1. Forschungsfrage**

Welche Nutzenaspekte und Kostenarten weisen Industrie 4.0 Projekte in indirekten und direkten Unternehmensbereichen auf und wie können diese quantifiziert und monetarisiert werden?

### **2. Interviewmethode**

Leitfadengestütztes Experteninterview

### **3. Auswahl der Interviewpartner**

Die Interviewpartner zur Beantwortung der Forschungsfrage sind stets Projektleiter von Industrie 4.0 Projekten sowohl im indirekten als auch im direkten Bereich. Sie zeichnen sich durch die Verantwortung bzgl. Strukturierung, Steuerung, inhaltlicher Weiterentwicklung sowie des finanziellen Erfolges eines Projektes aus. Die eigentliche Auswahl der geeigneten Projektleiter findet über die Bewertung von Digitalisierungsprojekten statt, welche auf die Kriterien eines Industrie 4.0 Projektes gemäß Kapitel 2.1.3 hin analysiert werden. Dadurch kann eine strukturierte Auswahl geeigneter Interviewpartner bzw. Industrie 4.0 Projekte gewährleistet werden.

### **4. Interviewleitfaden**

#### **4.1 Einführung:**

- Begrüßung
- Vorstellung des Forschungsvorhabens
- Beschreibung des Interviewablaufs und der zeitlichen Dauer (ca. 1,5h)
- Datenschutzerklärung
- Erfassung der Daten des Interviewpartners – Name, Abteilung, Projekt, Anwenderzahl
- Kurze Vorstellung des Industrie 4.0 Projektes durch die jeweiligen Projektleiter
- Durchsprache der Industrie 4.0 Kriterien und Anwendung auf das jeweilige Projekt
- Vorstellung der Wirkungskettenanalyse und des Monetarisierungsverfahrens als Möglichkeit der Quantifizierung und Monetarisierung von Nutzenaspekten

## 4.2 Hauptteil: Leitfragen

1. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der **Mitarbeitereinsatzflexibilität** auf?
  - 1.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Mitarbeitereinsatzflexibilität durch den Interviewer.
  - 1.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der Mitarbeitereinsatzflexibilität aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 1.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Mitarbeitereinsatzflexibilität quantifizieren?
2. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der **Variantenflexibilität** auf?
  - 2.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Variantenflexibilität durch den Interviewer.
  - 2.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der Variantenflexibilität aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 2.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Variantenflexibilität quantifizieren?
3. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der **Volumenflexibilität** auf?
  - 3.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Volumenflexibilität durch den Interviewer.
  - 3.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der Volumenflexibilität aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 3.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Volumenflexibilität quantifizieren?
4. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Komplexitätsreduzierung** auf?
  - 4.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Komplexitätsreduzierung durch den Interviewer.
  - 4.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Komplexitätsreduzierung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 4.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Komplexitätsreduzierung quantifizieren?
5. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der **Reaktionsfähigkeit** auf?
  - 5.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Reaktionsfähigkeit durch den Interviewer.
  - 5.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der Reaktionsfähigkeit aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 5.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Steigerung der Reaktionsfähigkeit quantifizieren?
6. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Individualisierung der Bedienoberfläche** auf?
  - 6.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Individualisierung der Bedienoberfläche durch den Interviewer.

- 6.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Individualisierung der Bedienoberfläche aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 6.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Individualisierung der Bedienoberfläche quantifizieren?
7. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Value Chain Integration** auf?
- 7.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Value Chain Integration durch den Interviewer.
- 7.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Value Chain Integration aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 7.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Value Chain Integration quantifizieren?
8. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Modularisierung** auf?
- 8.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Modularisierung durch den Interviewer.
- 8.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Modularisierung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 8.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Modularisierung quantifizieren?
9. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Standardisierung** auf?
- 9.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Standardisierung durch den Interviewer.
- 9.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Standardisierung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 9.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Standardisierung quantifizieren?
10. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen** auf?
- 10.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen durch den Interviewer.
- 10.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 10.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen quantifizieren?
11. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Vernetzung von Systemen** auf?
- 11.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Vernetzung von Systemen durch den Interviewer.
- 11.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Vernetzung von Systemen aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?

- 11.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung nach der Nutzen der Vernetzung von Systemen quantifizieren?
- 12. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Echtzeitsteuerung** auf?
  - 12.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Echtzeitsteuerung durch den Interviewer.
  - 12.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Echtzeitsteuerung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 12.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen der Echtzeitsteuerung quantifizieren?
- 13. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt des **autonomen Systems** auf?
  - 13.1 Erläuterung des Nutzenaspektes autonome Systeme durch den Interviewer.
  - 13.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt des autonomen Systems aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 13.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von autonomen Systemen quantifizieren?
- 14. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Mitarbeitervernetzung** auf?
  - 14.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Mitarbeitervernetzung durch den Interviewer.
  - 14.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Mitarbeitervernetzung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 14.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Mitarbeitervernetzung quantifizieren?
- 15. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt des **Erfahrungs- und Wissensmanagements** auf?
  - 15.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Erfahrungs- und Wissensmanagements durch den Interviewer.
  - 15.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt des Erfahrungs- und Wissensmanagements aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 15.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Erfahrungs- und Wissensmanagements quantifizieren?
- 16. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt des **Assistenzsystems** auf?
  - 16.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Assistenzsystem durch den Interviewer.
  - 16.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt des Assistenzsystems aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
  - 16.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Assistenzsystemen quantifizieren?
- 17. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Mitarbeiterakzeptanz** auf?
  - 17.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Mitarbeiterakzeptanz durch den Interviewer.

- 17.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Mitarbeiterakzeptanz aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 17.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Mitarbeiterakzeptanz quantifizieren?
18. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Durchlaufzeitreduzierung** auf?
- 18.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Durchlaufzeitreduzierung durch den Interviewer.
- 18.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Durchlaufzeitreduzierung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 18.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Durchlaufzeitreduzierung quantifizieren?
19. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Prozessqualitätssteigerung** auf?
- 19.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Prozessqualität durch den Interviewer.
- 19.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Prozessqualitätssteigerung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 19.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Prozessqualität quantifizieren?
20. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Produktqualitätssteigerung** auf?
- 20.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Produktqualität durch den Interviewer.
- 20.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Produktqualitätssteigerung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 20.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Produktqualität quantifizieren?
21. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Automatisierung** auf?
- 21.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Automatisierung durch den Interviewer.
- 21.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Automatisierung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 21.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Automatisierungen quantifizieren?
22. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Virtuellen Absicherung** auf?
- 22.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Virtuelle Absicherung durch den Interviewer.
- 22.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Virtuellen Absicherung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 22.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Virtuellen Absicherungen quantifizieren?
23. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Ressourceneffizienz** auf?
- 23.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Ressourceneffizienz durch den Interviewer.
- 23.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Ressourceneffizienz aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?

- 23.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Ressourceneffizienz quantifizieren?
24. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Prozesseffektivitätssteigerung** auf?
- 24.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Prozesseffektivität durch den Interviewer.
- 24.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Prozesseffektivitätssteigerung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 24.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Prozesseffektivität quantifizieren?
25. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Ausfallsicherheit** auf?
- 25.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Ausfallsicherheit durch den Interviewer.
- 25.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Ausfallsicherheit aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 25.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Ausfallsicherheit quantifizieren?
26. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Informationsverfügbarkeitssteigerung** auf?
- 26.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Informationsverfügbarkeitssteigerung durch den Interviewer.
- 26.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Informationsverfügbarkeitssteigerung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 26.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Informationsverfügbarkeitssteigerung quantifizieren?
27. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Usability-Verbesserung** auf?
- 27.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Usability durch den Interviewer.
- 27.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Usability-Verbesserung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 27.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Usability quantifizieren?
28. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Lernfähigkeit der Systeme** auf?
- 28.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Lernfähigkeit der Systeme durch den Interviewer.
- 28.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Lernfähigkeit der Systeme aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 28.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen der Lernfähigkeit von Systemen quantifizieren?
29. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Arbeitsergonomieverbesserung** auf?
- 29.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Arbeitsergonomieverbesserung durch den Interviewer.

- 29.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Arbeitsergonomieverbesserung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 29.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Arbeitsergonomieverbesserungen quantifizieren?
30. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Datenkonsistenz** auf?
- 30.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Datenkonsistenz durch den Interviewer.
- 30.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Datenkonsistenz aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 30.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Datenkonsistenz quantifizieren?
31. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Anforderungs- bzw. Fertigungsgerechtigkeit** auf?
- 31.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Anforderungs- bzw. Fertigungsgerechtigkeit durch den Interviewer.
- 31.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Anforderungs- bzw. Fertigungsgerechtigkeit aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 31.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Anforderungs- bzw. Fertigungsgerechtigkeit quantifizieren?
32. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Bedarfsglättung** auf?
- 32.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Bedarfsglättung durch den Interviewer.
- 32.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Bedarfsglättung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 32.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Bedarfsglättung quantifizieren?
33. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Skalierbarkeit** auf?
- 33.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Skalierbarkeit durch den Interviewer.
- 33.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Skalierbarkeit aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 33.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Skalierbarkeit quantifizieren?
34. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Steigerung der Termintreue** auf?
- 34.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Steigerung der Termintreue durch den Interviewer.
- 34.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Steigerung der Termintreue aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?

- 34.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Steigerung der Termintreue quantifizieren?
35. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Engpasserkennung** auf?
- 35.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Engpasserkennung durch den Interviewer.
- 35.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Engpasserkennung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 35.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Engpasserkennung quantifizieren?
36. Weist Ihr Projekt den Nutzenaspekt der **Prozesstransparenzsteigerung** auf?
- 36.1 Erläuterung des Nutzenaspektes Prozesstransparenz durch den Interviewer.
- 36.2 Wenn Ihr Projekt den Nutzenaspekt der Prozesstransparenzsteigerung aufweist, wodurch wird der Nutzen erkennbar?
- 36.3 Wie lässt sich Ihrer Meinung der Nutzen von Prozesstransparenz quantifizieren?
37. Welche **Kostenarten** treten bei der Entwicklung, Implementierung und dem Betrieb von Industrie 4.0 Lösungen auf?
- 37.1 Nennung von Beispielen bzgl. möglicher Kostenarten durch den Interviewer.
- 37.2 Treten die von Ihnen genannten Kostenarten **einmalig**, **laufend** oder **zyklisch wiederkehrend** auf?

#### **4.3 Abschluss:**

- Kurze Zusammenfassung des Gesagten
- Dank für die Zeit
- Informationen über Auswertung und Verwendung der Ergebnisse
- Verabschiedung

## Anhang 2 Detailergebnisse zu den projektspezifischen Nutzenaspekten

Lfd. Nr.	Nutzenaspekte von I4.0 Lösungen	I. 1	I. 2	I. 3	I. 4	I. 5	I. 6	I. 7	I. 8	I. 9	I. 10	I. 11	I. 12	I. 13	I. 14	I. 15	I. 16	I. 17	I. 18	I. 19	I. 20	Summe indirekt	% Anteil	Summe gesamt	% Anteil gesamt	
1	Mitarbeiterersatzflexibilität	x	x	x	x		x	x	x	x		x		x								12	60	27	69	
2	Variantenflexibilität	x	x	x	x		x	x															10	50	22	56
3	Volumenflexibilität		x	x	x																		7	35	15	38
4	Komplexitätsreduzierung		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								13	65	29	74
5	Reaktionsfähigkeit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		20	100	35	90
6	Individualisierung der Bedienoberfläche		x		x		x	x	x		x	x	x	x	x								11	55	16	41
7	Value-Chain Integration		x	x			x	x	x		x	x	x	x		x	x						12	60	22	56
8	Modularisierung	x	x	x		x	x	x				x	x		x	x							13	65	27	69
9	Standardisierung	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			19	95	35	90
10	Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen	x	x	x	x					x	x			x	x	x	x	x	x				13	65	21	54
11	Vernetzung (Systeme)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		19	95	38	97
12	Echtzeitsteuerung	x		x																			7	35	19	49
13	Autonome Systeme	x																					3	15	17	44
14	Mitarbeitervernetzung		x	x	x	x	x	x															12	60	13	33
15	Erfahrungs- und Wissensmanagement	x	x	x	x		x	x	x														15	75	26	67
16	Assistenzsysteme	x	x	x	x	x	x	x	x														16	80	31	79
17	Mitarbeiterakzeptanz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		20	100	34	87
18	Durchlaufzeit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		20	100	37	95
19	Prozessqualität	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		20	100	37	95
20	Produktqualität																						10	50	18	46
21	Automatisierung	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x									14	70	32	82
22	Virtuelle Absicherung	x	x	x																			10	50	16	41
23	Ressourceneffizienz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		20	100	39	100
24	Prozesseffektivität		x		x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			15	75	27	69
25	Ausfallsicherheit					x																	6	30	18	46
26	Informationsverfügbarkeit		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			18	90	33	85
27	Usability		x	x	x	x																	11	55	19	49
28	Lernfähigkeit (System)	x	x	x																			6	30	19	49
29	Arbeitsergonomie		x	x	x																		12	60	22	56
30	Datenkonsistenz	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			17	85	30	77
31	Anforderungs- bzw. Fertigungsgerechtigkeit	x	x	x			x	x															13	65	25	64
32	Bedarfsglättung																						3	15	6	15
33	Adaptibilität/Skalierbarkeit	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			18	90	36	92
34	Termintreue																						7	35	8	21
35	Engpasserkennung		x																				7	35	12	31
36	Prozesstransparenz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		20	100	37	95

Abbildung 45: Detailergebnisse der projektspezifischen Nutzenaspekte aus indirekten Bereichen

Lfd. Nr.	Nutzenaspekte von I4.0 Lösungen	I. 21	I. 22	I. 23	I. 24	I. 25	I. 26	I. 27	I. 28	I. 29	I. 30	I. 31	I. 32	I. 33	I. 34	I. 35	I. 36	I. 37	I. 38	I. 39	Summe direkt	% Anteil	Summe gesamt	% Anteil gesamt		
1	Mitarbeiterersatzflexibilität	x	x	x	x	x	x															15	79	27	69	
2	Variantenflexibilität	x	x	x	x	x	x																12	63	22	56
3	Volumenflexibilität		x		x																		8	42	15	38
4	Komplexitätsreduzierung				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			16	84	29	74
5	Reaktionsfähigkeit		x	x	x	x	x	x															15	79	35	90
6	Individualisierung der Bedienoberfläche	x																					5	26	16	41
7	Value-Chain Integration																						10	53	22	56
8	Modularisierung	x	x		x	x	x	x	x														14	74	27	69
9	Standardisierung	x	x		x	x	x	x															16	84	35	90
10	Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen	x	x																				8	42	21	54
11	Vernetzung (Systeme)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			19	100	38	97
12	Echtzeitsteuerung	x	x	x																			12	63	19	49
13	Autonome Systeme	x	x	x																			14	74	17	44
14	Mitarbeitervernetzung																						1	5	13	33
15	Erfahrungs- und Wissensmanagement		x	x	x	x	x																11	58	26	67
16	Assistenzsysteme	x	x	x	x	x	x	x															15	79	31	79
17	Mitarbeiterakzeptanz	x	x	x	x	x	x	(x)															14	74	34	87
18	Durchlaufzeit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			17	89	37	95
19	Prozessqualität	x	x	x	x	x	x	x															17	89	37	95
20	Produktqualität																						8	42	18	46
21	Automatisierung	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			18	95	32	82
22	Virtuelle Absicherung	x																					6	32	16	41
23	Ressourceneffizienz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			19	100	39	100
24	Prozesseffektivität		x		x		x	x	x														12	63	27	69
25	Ausfallsicherheit		x																				12	63	18	46
26	Informationsverfügbarkeit																						15	79	33	85
27	Usability																						8	42	19	49
28	Lernfähigkeit (System)	x	x																				13	68	19	49
29	Arbeitsergonomie		x	x	x																		10	53	22	56
30	Datenkonsistenz	x	x																				13	68	30	77
31	Anforderungs- bzw. Fertigungsgerechtigkeit		x																				12	63	25	64
32	Bedarfsglättung																						3	16	6	15
33	Adaptibilität/Skalierbarkeit	x	x	x	x	x	x	x	x														18	95	36	92
34	Termintreue																						1	5	8	21
35	Engpasserkennung		x																				5	26	12	31
36	Prozesstransparenz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			17	89	37	95

Abbildung 46: Detailergebnisse der projektspezifischen Nutzenaspekte aus direkten Bereichen

## Anhang 3 Detailergebnisse zu den projektspezifischen Kostenaspekten

Lfd. Nr.	Kostenaspekte von 14.0 Lösungen	l. 1	l. 2	l. 3	l. 4	l. 5	l. 6	l. 7	l. 8	l. 9	l. 10	l. 11	l. 12	l. 13	l. 14	l. 15	l. 16	l. 17	l. 18	l. 19	l. 20	Summe indirekt	% Anteil	Summe gesamt	% Anteil gesamt	
1	Informations- und Datenhandlingskosten	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x										17	85	22	56
2	Service-/Wartungskosten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	20	100	37	95
3	Supportkosten	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							18	90	36	92
4	Mietkosten						x											x					2	10	8	21
5	Lizenzkosten		x			x			x	x	x	x	x	x	x	x	x						14	70	24	62
6	Hardwarekosten	x	x	x				x	x				x	x									12	60	30	77
7	Flächenkosten																						3	15	7	18
8	Energiekosten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	20	100	39	100
9	Qualifizierungskosten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	20	100	35	90
10	Beschaffungskosten Hardware	x	x						x	x	x	x	x	x									12	60	24	62
11	Beschaffungskosten Software	x	x						x	x	x	x	x	x	x	x							11	55	20	51
12	Anpassungskosten Hardware						x																2	10	5	13
13	Anpassungskosten Software	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									17	85	27	69
14	Neuentwicklungskosten Hardware						x																1	5	5	13
15	Neuentwicklungskosten Software	x	x	x	x	x	x	x			x	x											14	70	23	59
16	Personalkosten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	20	100	38	97
17	Reisekosten	x	x				x	x	x	x	x	x	x	x									14	70	26	67

Abbildung 47: Detailergebnisse der projektspezifischen Kostenaspekte aus indirekten Bereichen

Lfd. Nr.	Kostenaspekte von 14.0 Lösungen	l. 21	l. 22	l. 23	l. 24	l. 25	l. 26	l. 27	l. 28	l. 29	l. 30	l. 31	l. 32	l. 33	l. 34	l. 35	l. 36	l. 37	l. 38	l. 39	Summe direkt	% Anteil	Summe gesamt	% Anteil gesamt	
1	Informations- und Datenhandlingskosten							x														5	26	22	56
2	Service-/Wartungskosten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	17	89	37	95
3	Supportkosten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	18	95	36	92
4	Mietkosten	x	x																			6	32	8	21
5	Lizenzkosten		x		x	x		x		x	x	x										10	53	24	62
6	Hardwarekosten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	18	95	30	77
7	Flächenkosten	x																				4	21	7	18
8	Energiekosten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	19	100	39	100
9	Qualifizierungskosten	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x									15	79	35	90
10	Beschaffungskosten Hardware	x			x	x	x															12	63	24	62
11	Beschaffungskosten Software				x	x		x														9	47	20	51
12	Anpassungskosten Hardware																					3	16	5	13
13	Anpassungskosten Software		x		x	x	x	x			x	x										10	53	27	69
14	Neuentwicklungskosten Hardware																					4	21	5	13
15	Neuentwicklungskosten Software		x		x	x	x															9	47	23	59
16	Personalkosten	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	18	95	38	97
17	Reisekosten	x	x					x	x	x												12	63	26	67

Abbildung 48: Detailergebnisse der projektspezifischen Kostenaspekte aus direkten Bereichen

# Anhang 4 Steckbriefe der Kosten- und Nutzenaspekte

## Nutzenaspekt: Variantenflexibilität

Ergebnisgröße

**DEFINITION / BESCHREIBUNG**

„Ist die Eigenschaft (...) eines Prozesses, sich gut an ein verändertes Variantenaufkommen (bspw. Produktvarianten) anpassen zu lassen.“ \*

**BEISPIELE**

**Direkter Bereich**

- Die sensorbasierte Identifikation von Behältergrößen in einem Lagerungssystem führt automatisch zu einem der Behältergröße angepassten Einlagerungsprozess
- Kamerabasierte Prüfsysteme stellen automatisch das Prüfprogramm auf das identifizierte Bauteile um
- In einer modularen Montage können neue Fertigungsschritte für neue Produkte in Form von Fertigungsinseln flexibel implementiert oder herausgenommen werden

**Indirekter Bereich**

- Eine beliebige Anzahl an Fahrzeugvarianten kann in einer Virtual Reality Lösung zur Laufzeit geladen werden
- Ein Planungssystem bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Planungsvarianten für einen Montageabschnitt zu erstellen und miteinander zu vergleichen
- Ein Simulationstool bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Prozessabläufe zu erstellen, zu simulieren und miteinander zu vergleichen

**NUTZENAUSLÖSER & QUANTIFIZIERUNG**

- Vollautomatische Prozessanpassung auf Basis von sensorgestützt identifizierten Prozesselementen (bspw. Bauteile, Behälter usw.) oder algorithmenbasierten Datenanalysen
- Erstellung, Bearbeitung, Simulation und Vergleich von Prozess- oder Produktvarianten

Nutzen	Einheit	Umrechnung	Einheit
Reduzierte Stillstandskosten	€		
Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB/IT	€		
Reduzierte Rüstkosten	€		
Reduzierter Flächenbedarf	m <sup>2</sup>	Kostensatz m <sup>2</sup>	€
Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	h	Kostensatz Mitarbeiter	€
Reduzierte Investitionskosten	€		
Reduzierte Betriebskosten	€		
Reduzierter Materialeinsatz	€		
Reduzierter Nacharbeitsaufwand	h	Kostensatz Mitarbeiter	€

**STEUERGRÖSSEN**

- Echtzeitsteuerung
- Wissens- & Erfahrungsmanagement
- Arbeitsergonomie
- Assistenzsysteme
- Bedarfsglättung
- Autonome Systeme
- Value Chain Integration
- Modularisierung
- Standardisierung
- Datenkonsistenz

\* Strategische Flexibilität und Strategiewechsel als Determinanten des Unternehmenswertes - Burmann

Abbildung 49: Steckbrief zum Nutzenaspekt Variantenflexibilität

## Nutzenaspekt: Verbesserung der Reaktionsfähigkeit

Ergebnisgröße

**DEFINITION / BESCHREIBUNG**

„Reaktionsfähigkeit beschreibt (...) die Fähigkeit eines Produktionssystems oder einer Organisation gezielt und schnell auf Kundennachfragen [, Prozessveränderungen] oder Veränderungen des Marktes reagieren zu können.“ \*

**BEISPIELE**

**Direkter Bereich**

- Eine sensorgestützte Verschleißerkennung im Presswerk sendet automatisch die Zustandsdaten an die Instandhaltung
- Ein kamerabasiertes Prüfsysteme für Oberflächenqualität meldet nIO Teile vollautomatisch in Echtzeit an die Qualitätssicherung
- Eine BDE Software erkennt Prozessabweichungen vollautomatisch und regelt entweder selbständig die Prozessanpassung oder informiert die Mitarbeiter in Echtzeit

**Indirekter Bereich**

- Ein PDM System stellt automatisch alle relevanten Informationen zur Verfügung, die für eine Änderungsbewertung auf Basis einer Produktdatenänderung notwendig sind
- Eine Simulationssoftware ermittelt auf Basis veränderter Prozessparameter automatisch ein neues Szenarienergebnis
- Die Erkrankung eines Referenten bewirkt im Qualifizierungsmanagementtool automatisch die Versendung von Änderungsinformationen an alle Teilnehmer

**NUTZENAUSLÖSER & QUANTIFIZIERUNG**

- Automatisierte Datenaufnahme, -verarbeitung, -auswertung und -bereitstellung ermöglicht einen schnelleren Zugang zu entscheidungsrelevanten Informationen bzw. bildet die Basis für vollautomatische Prozessanpassungen

Nutzen	Einheit	Umrechnung	Einheit
Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	h	Kostensatz Mitarbeiter	€
Reduzierter Abstimmungsaufwand	h	Kostensatz Mitarbeiter	€
Reduzierte Doppelarbeit	h	Kostensatz Mitarbeiter	€
Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	MA	Kostensatz Mitarbeiter	€
Reduzierte Stillstandskosten	€		
Reduzierter Nacharbeitsaufwand	h	Kostensatz Mitarbeiter	€
Reduzierte Verschrottungskosten	€		
Reduzierte Sonderfahrtkosten	€		
Reduzierter Flächenbedarf	m <sup>2</sup>	Kostensatz m <sup>2</sup>	€

**STEUERGRÖSSEN**

- Value Chain Integration
- Echtzeitsteuerung
- Wissens- & Erfahrungsmanagement
- Datenkonsistenz
- Bedarfsglättung
- Assistenzsysteme
- Autonome Systeme

\* Analyse der strategisch und strukturell induzierten Verwundbarkeit von Wertschöpfungsnetzwerken - Hohrath

Abbildung 50: Steckbrief zum Nutzenaspekt Verbesserung der Reaktionsfähigkeit

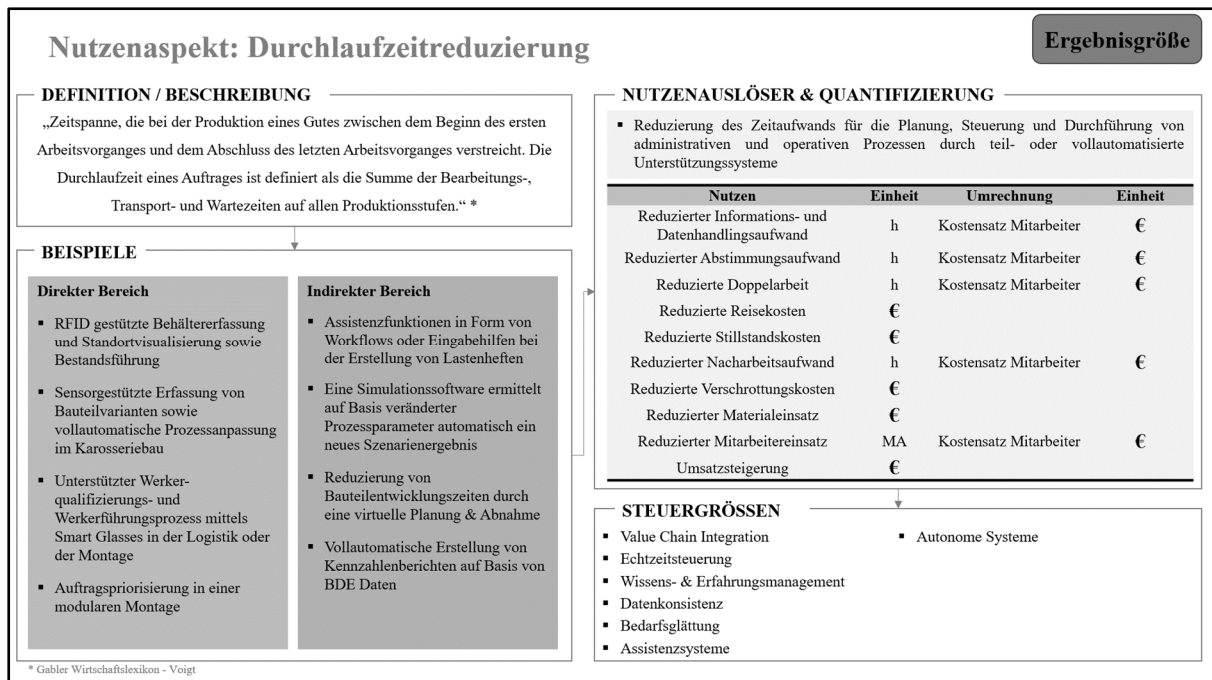


Abbildung 51: Steckbrief zum Nutzenaspekt Durchlaufzeitreduzierung

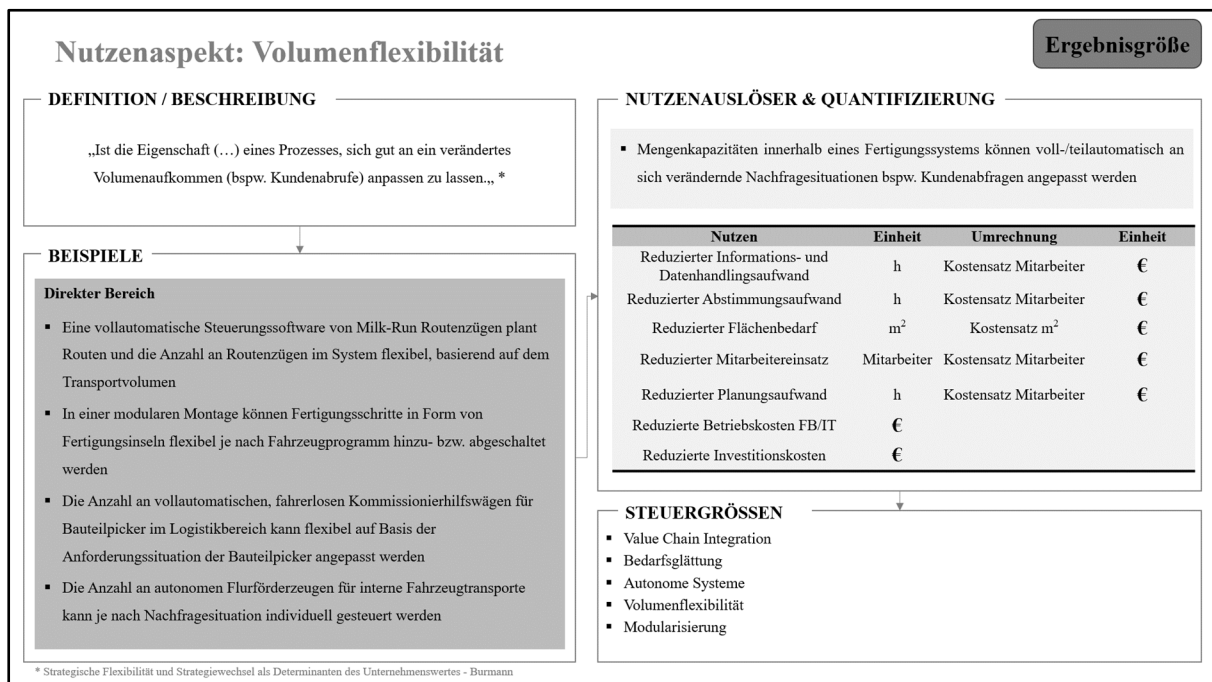


Abbildung 52: Steckbrief zum Nutzenaspekt Volumenflexibilität

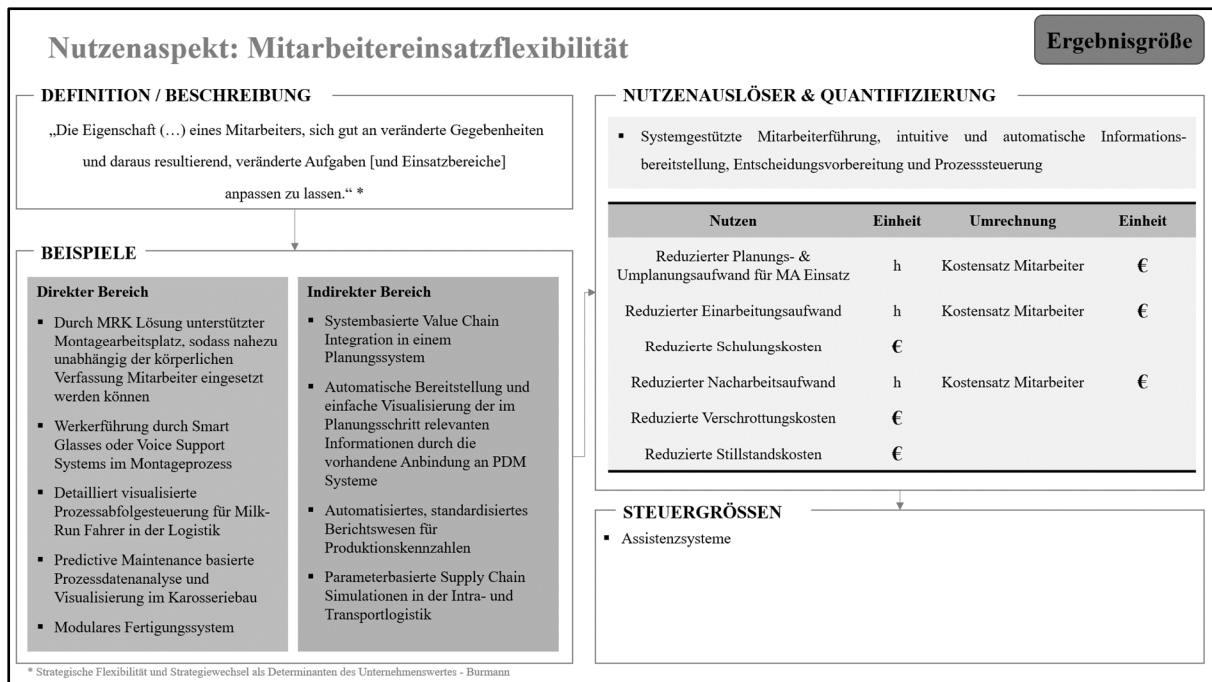


Abbildung 53: Steckbrief zum Nutzenaspekt Mitarbeiterereinsatzflexibilität

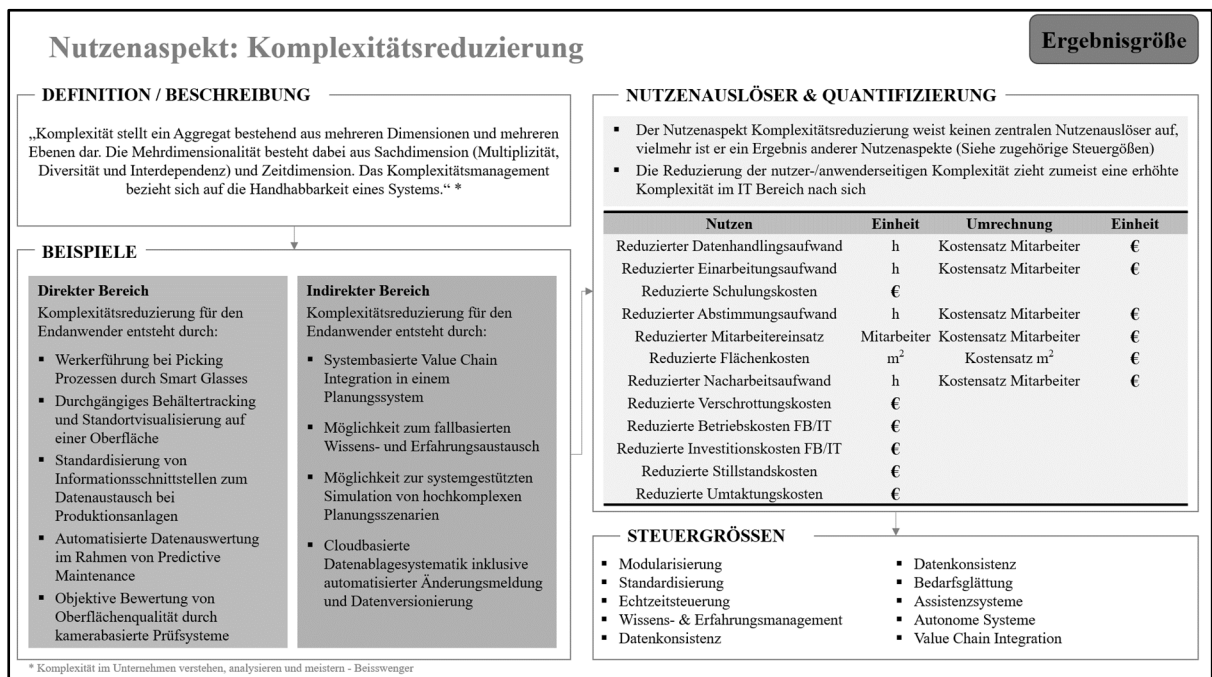


Abbildung 54: Steckbrief zum Nutzenaspekt Komplexitätsreduzierung

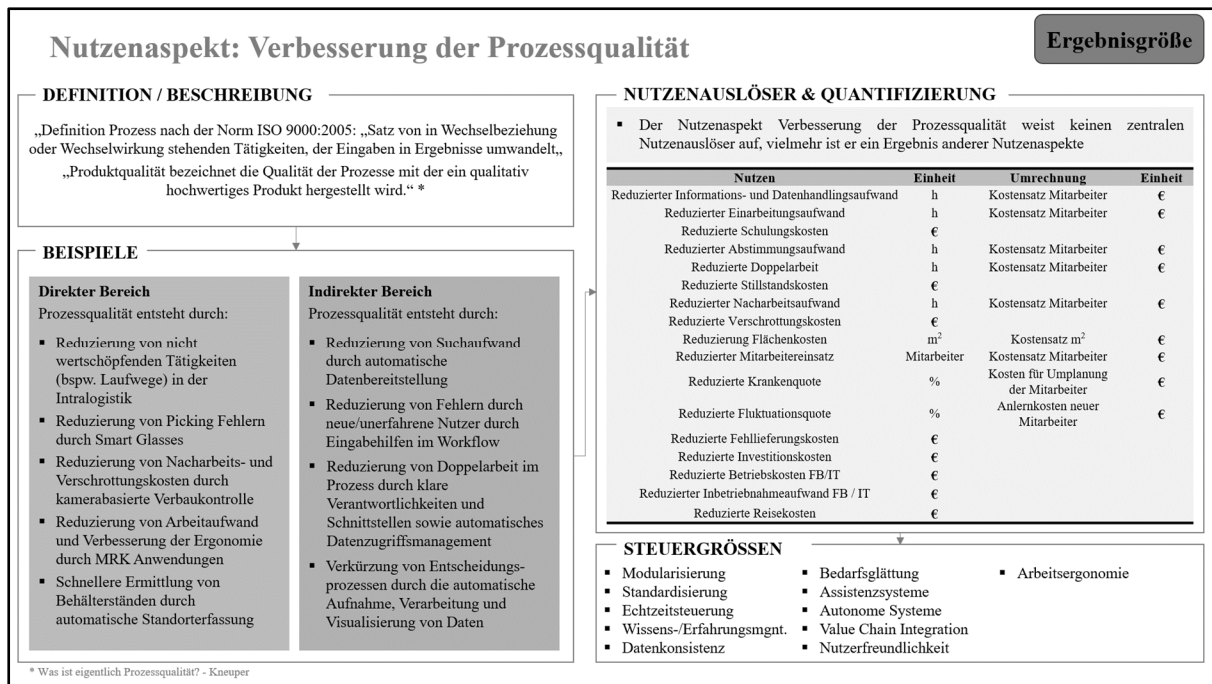


Abbildung 55: Steckbrief zum Nutzenaspekt Verbesserung der Prozessqualität

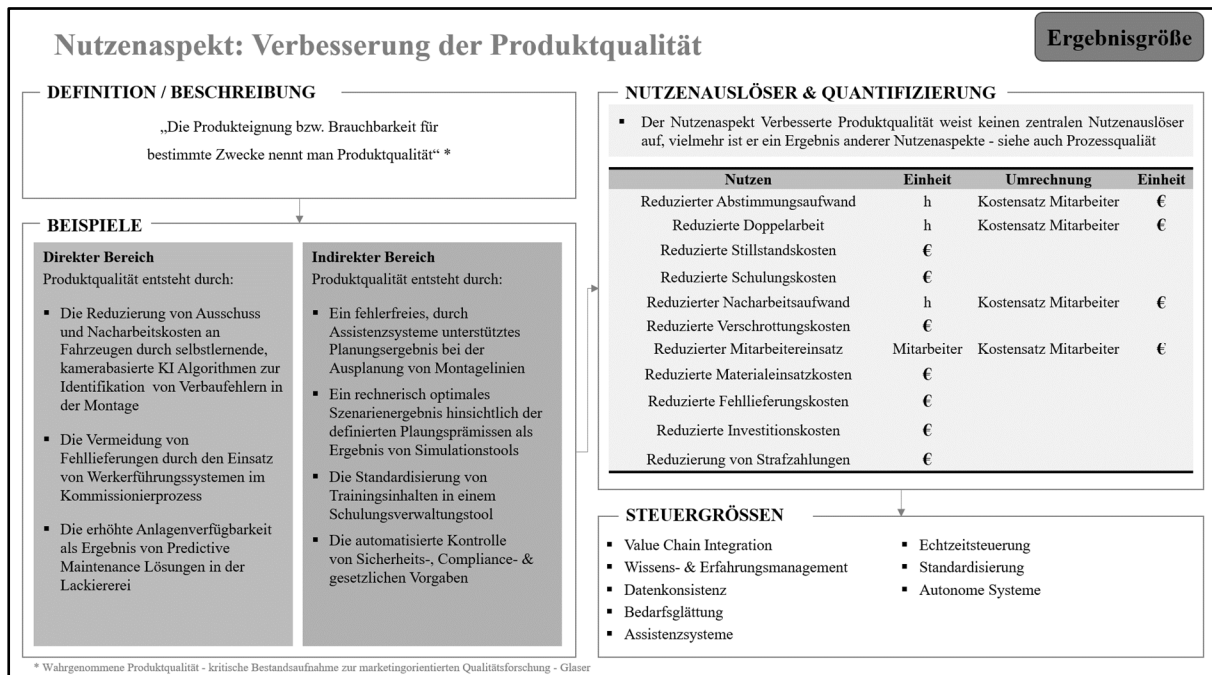


Abbildung 56: Steckbrief zum Nutzenaspekt Verbesserung der Produktqualität

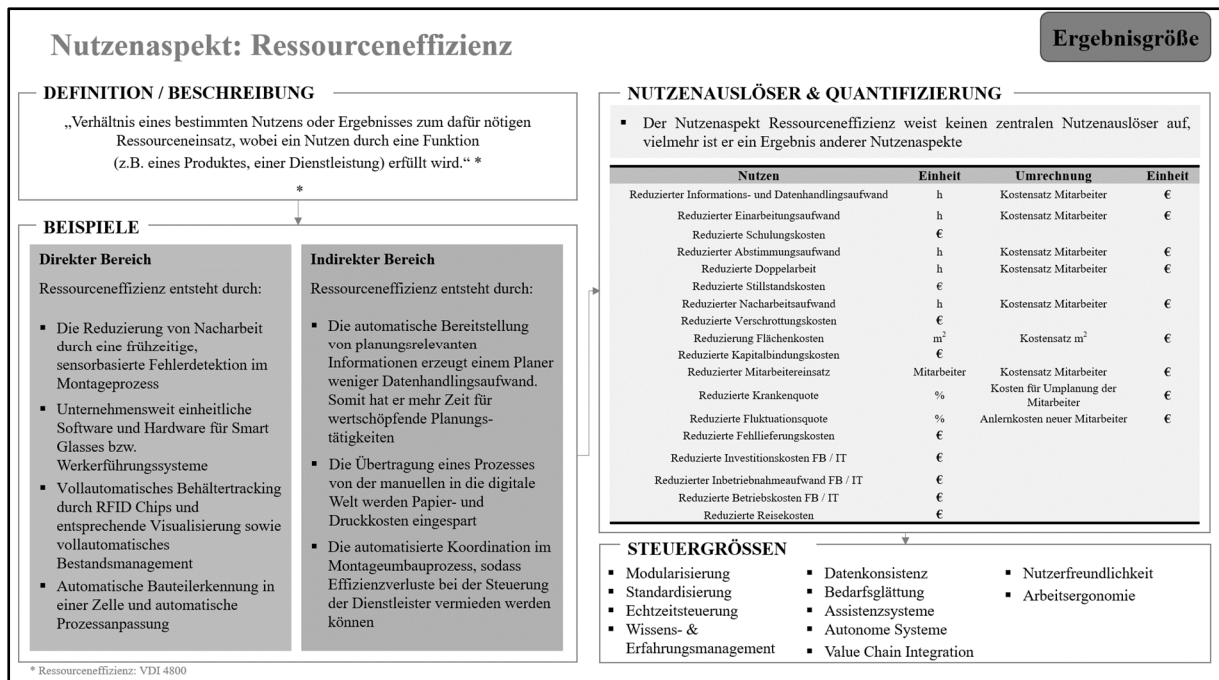


Abbildung 57: Steckbrief zum Nutzenaspekt Ressourceneffizienz

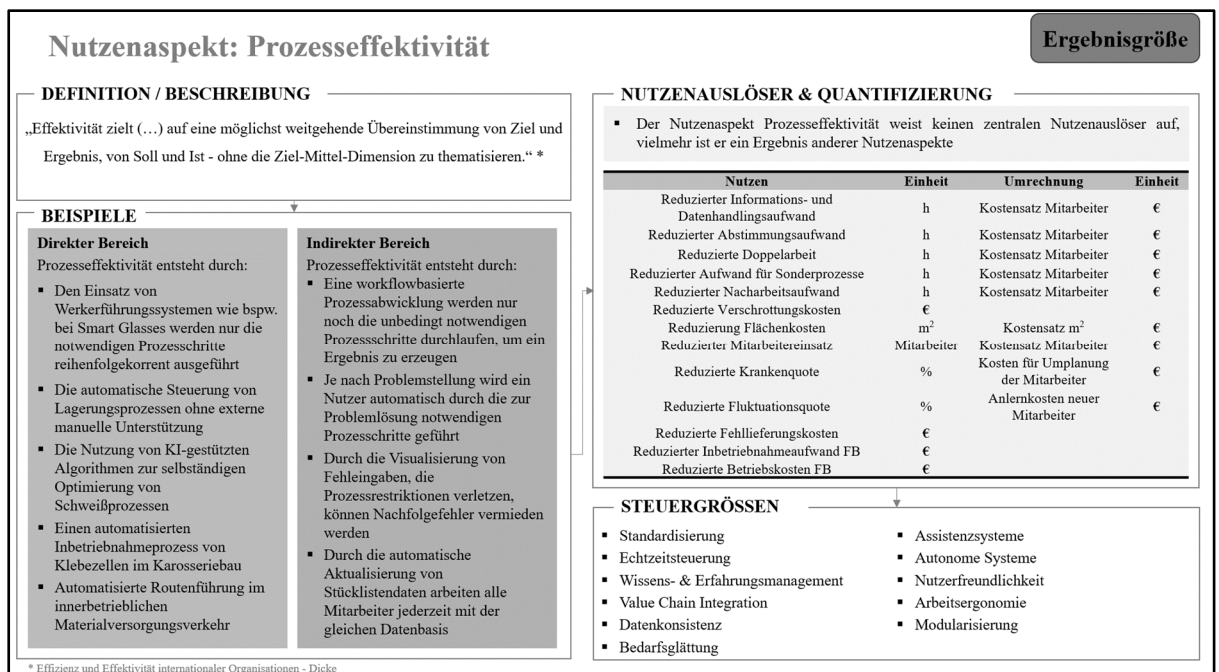


Abbildung 58: Steckbrief zum Nutzenaspekt Prozesseffektivität

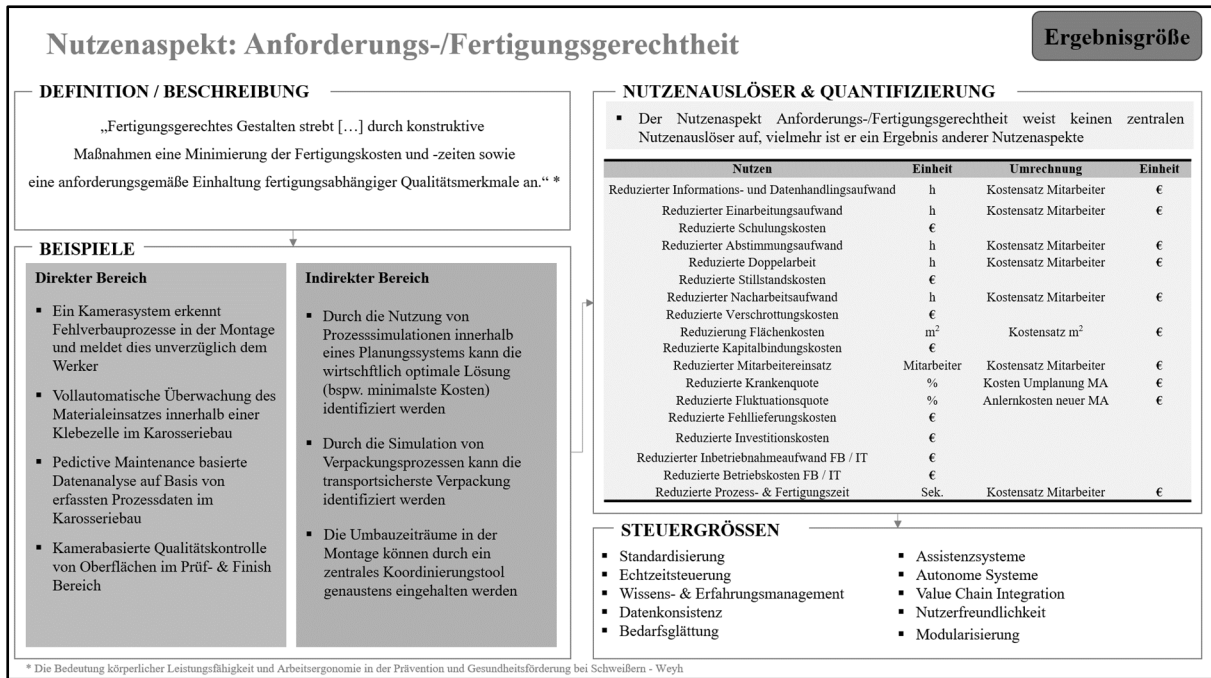


Abbildung 59: Steckbrief zum Nutzenaspekt Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit

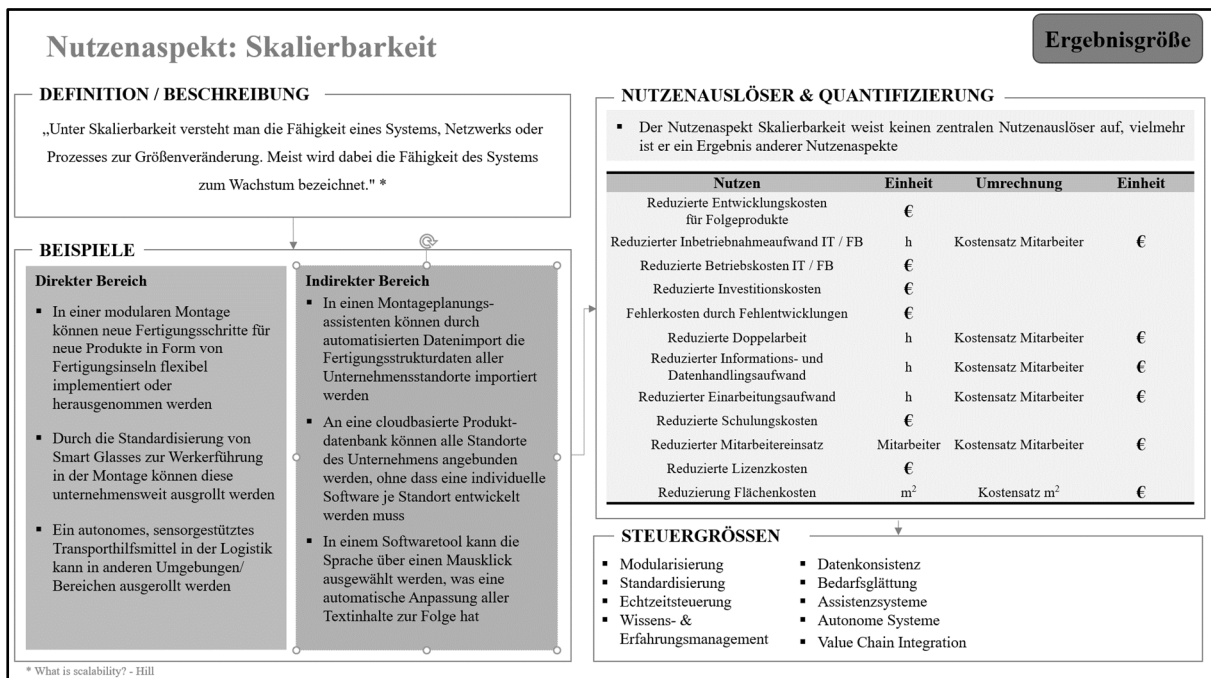


Abbildung 60: Steckbrief zum Nutzenaspekt Skalierbarkeit

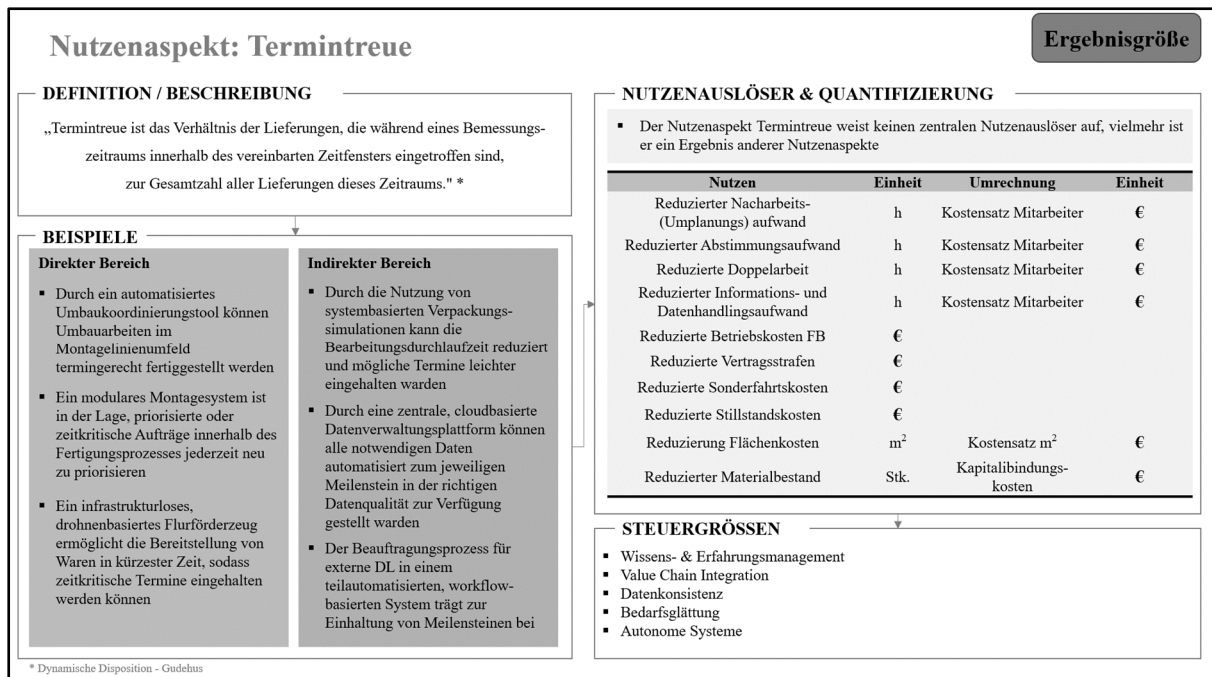


Abbildung 61: Steckbrief zum Nutzenaspekt Termintreue

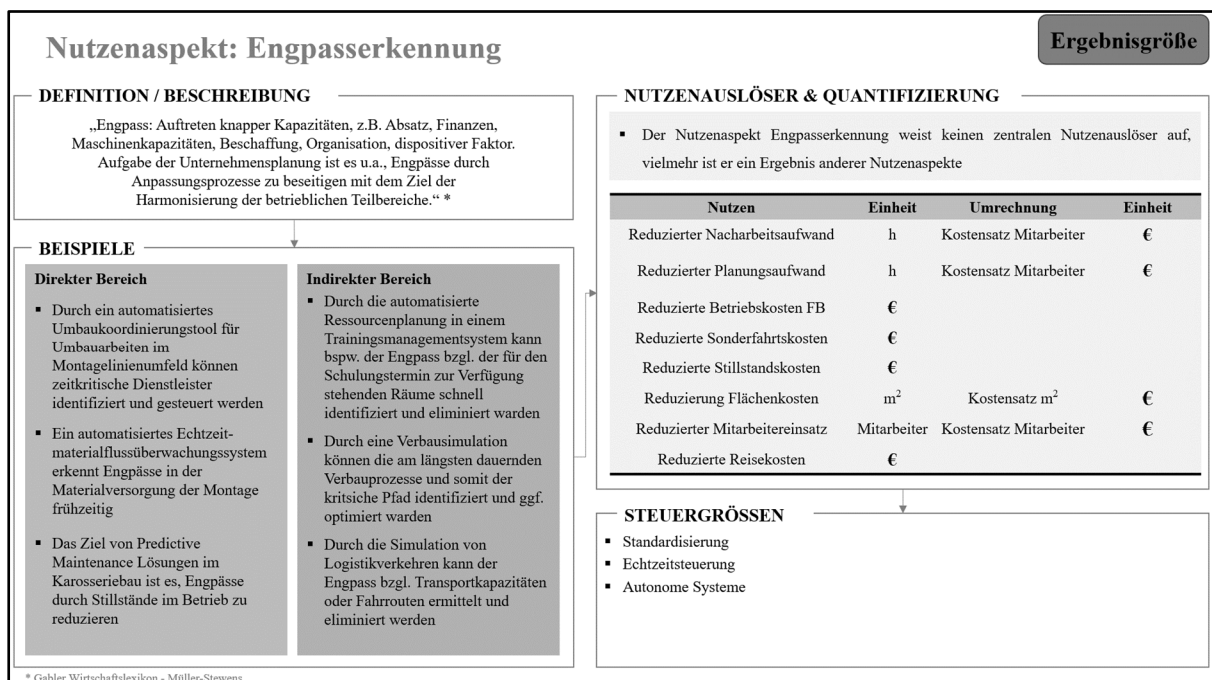


Abbildung 62: Steckbrief zum Nutzenaspekt Engpasserkennung

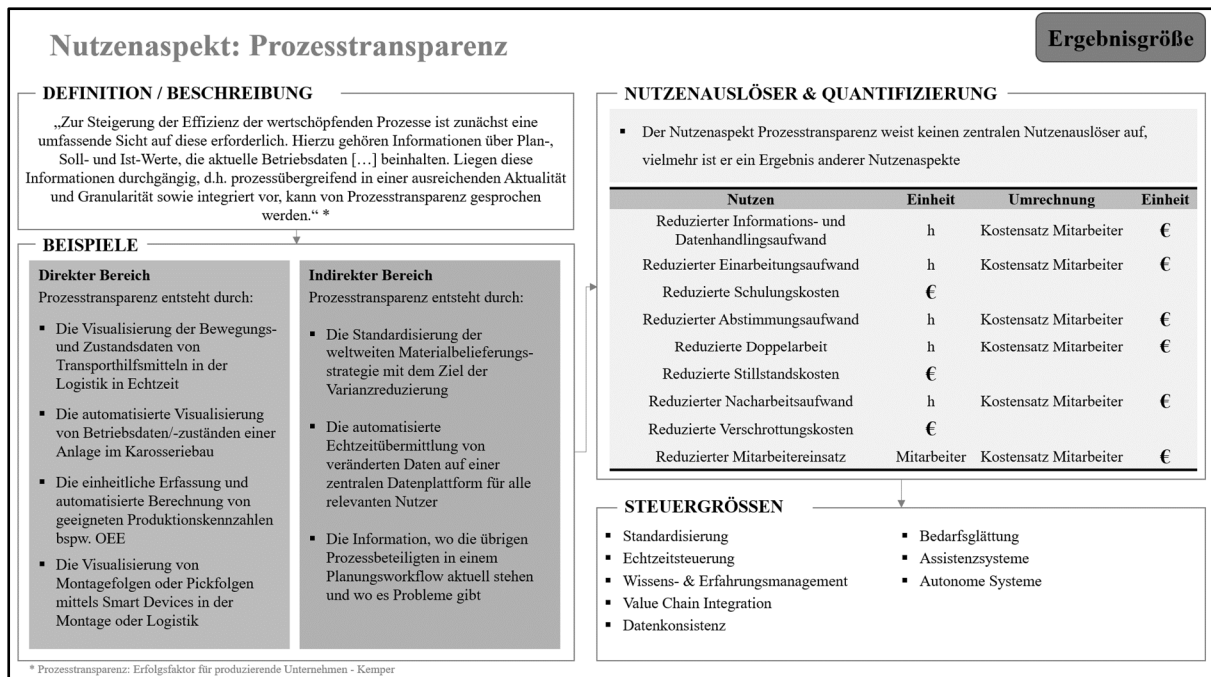


Abbildung 63: Steckbrief zum Nutzenaspekt Prozesstransparenz

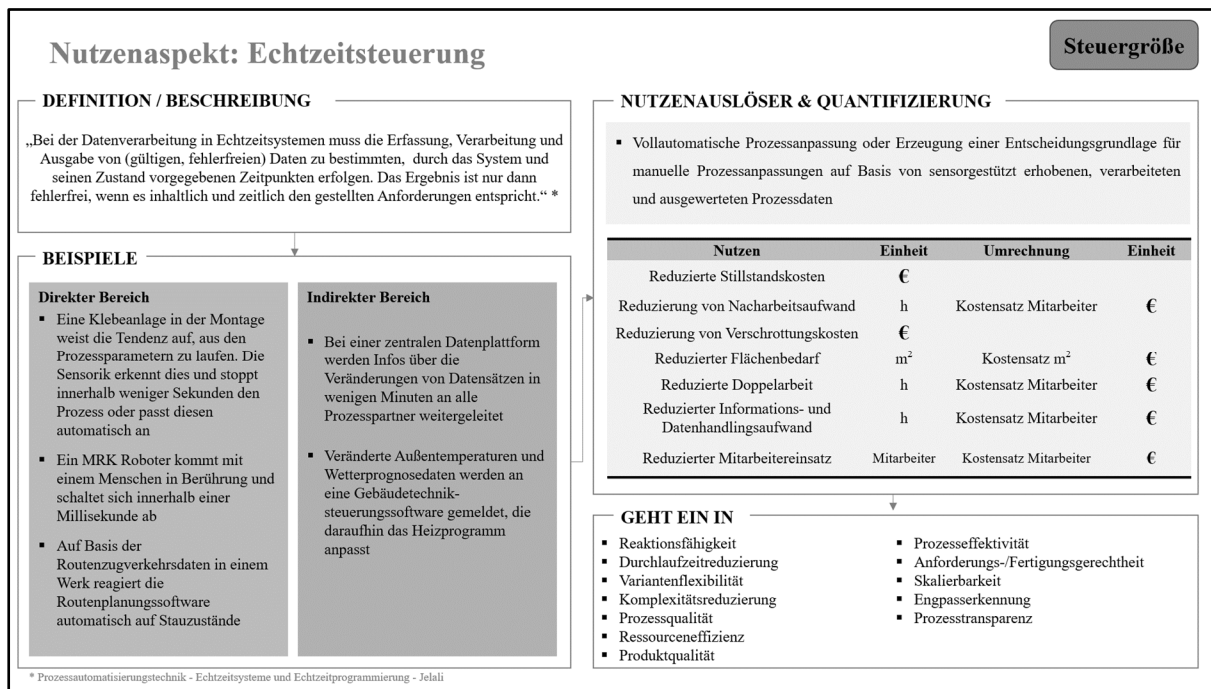


Abbildung 64: Steckbrief zum Nutzenaspekt Echtzeitsteuerung

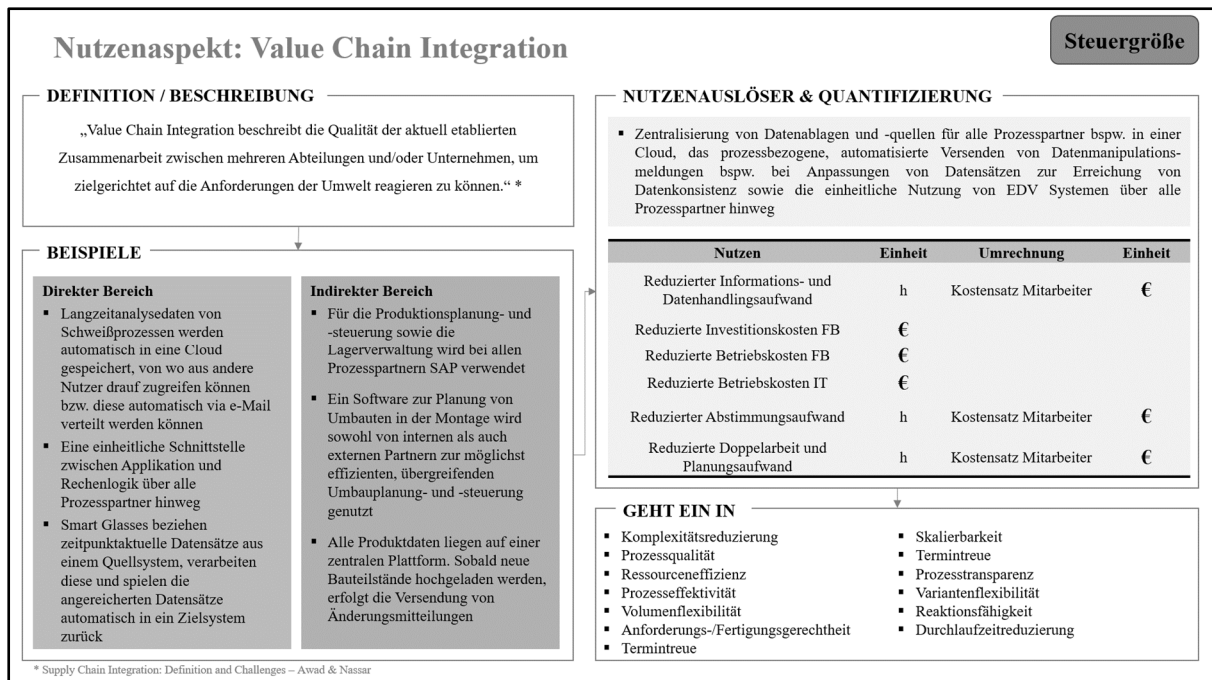


Abbildung 65: Steckbrief zum Nutzenaspekt Value Chain Integration

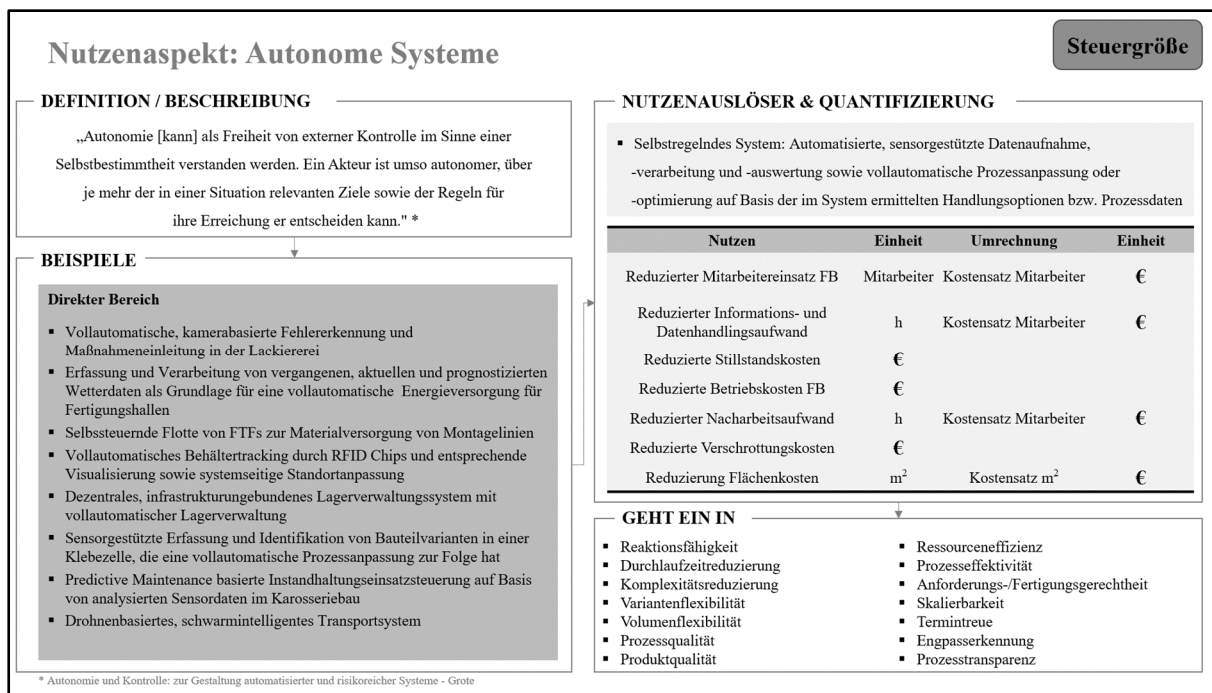


Abbildung 66: Steckbrief zum Nutzenaspekt Autonome Systeme

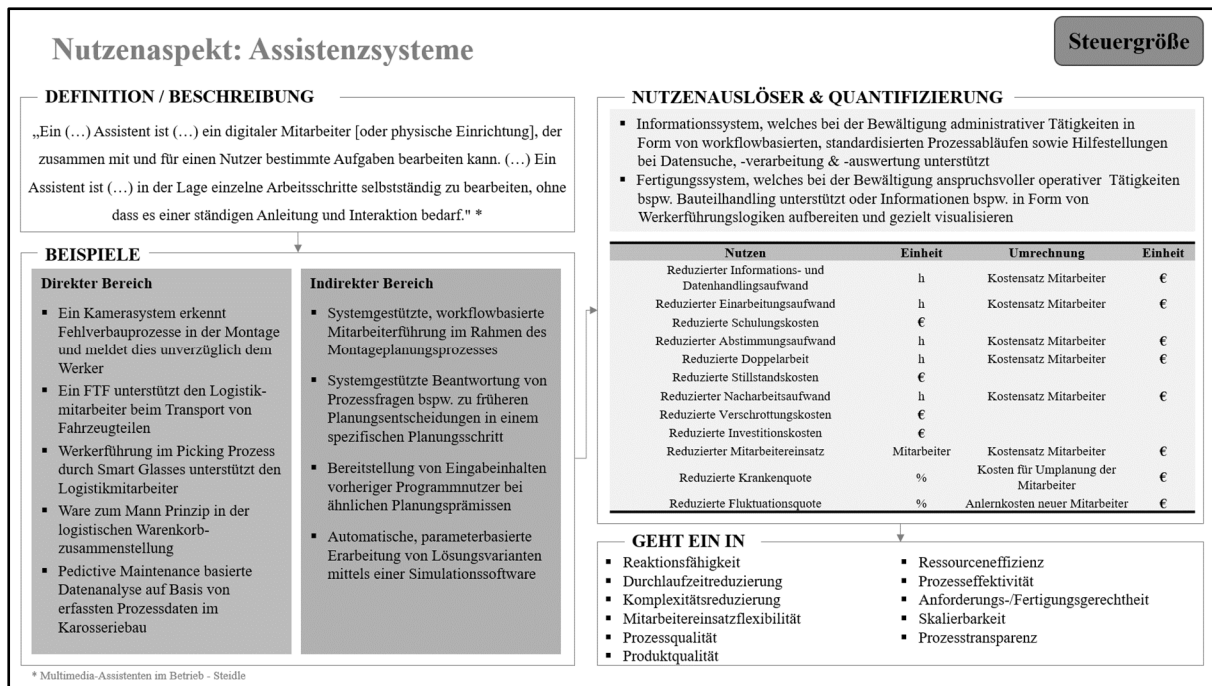


Abbildung 67: Steckbrief zum Nutzenaspekt Assistenzsysteme

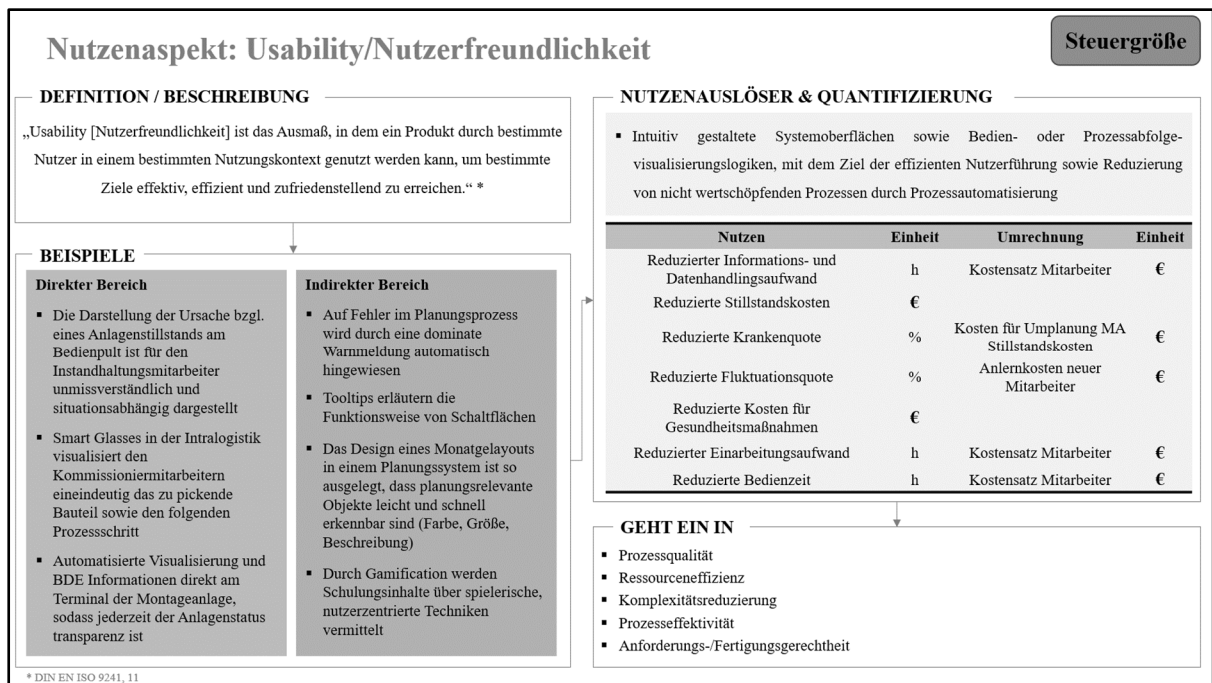


Abbildung 68: Steckbrief zum Nutzenaspekt Datenkonsistenz

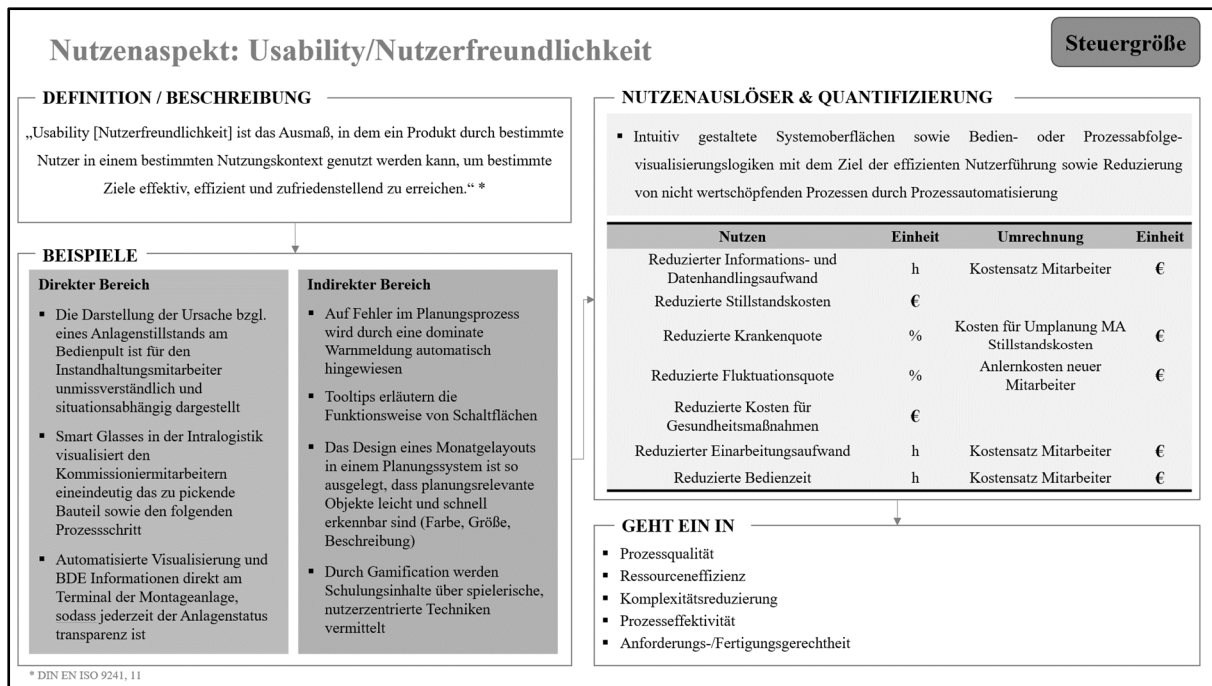


Abbildung 69: Steckbrief zum Nutzenaspekt Usability/Nutzerfreundlichkeit

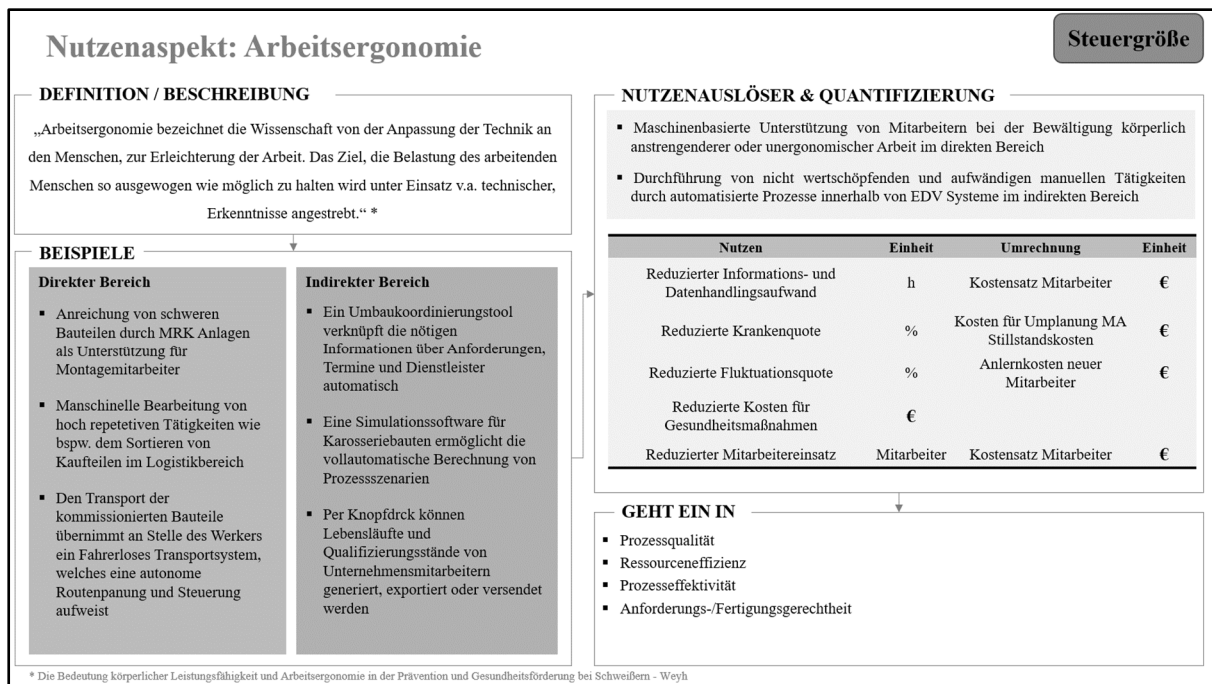


Abbildung 70: Steckbrief zum Nutzenaspekt Arbeitsergonomie

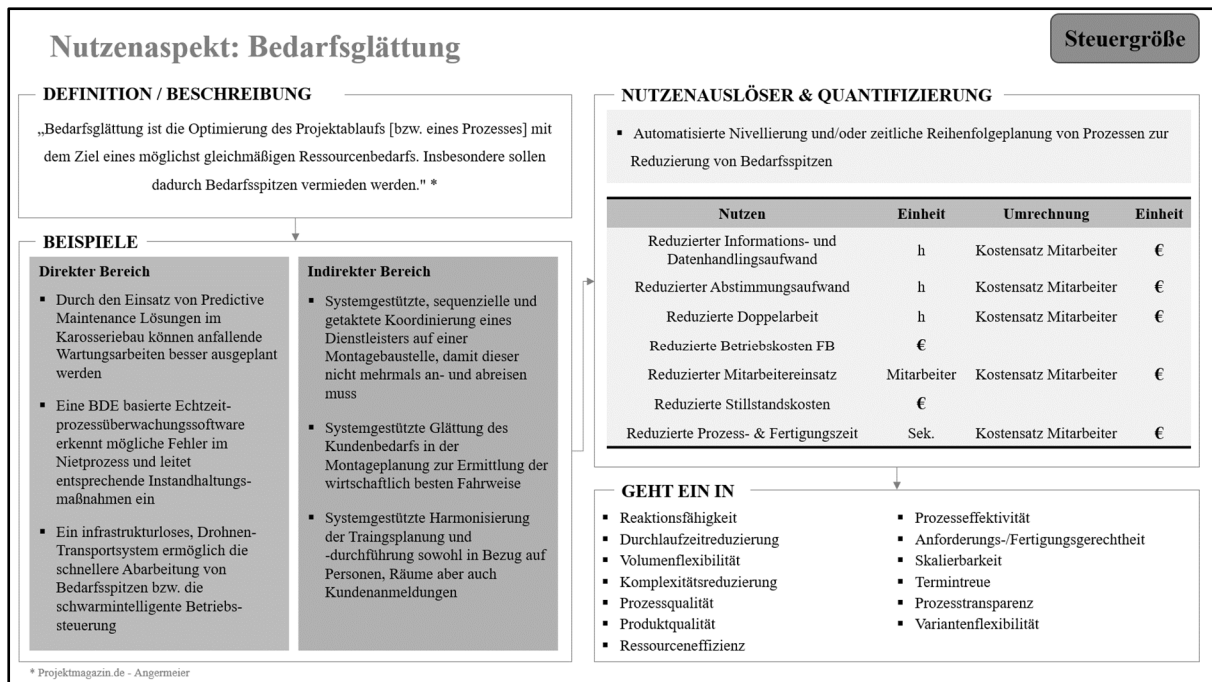


Abbildung 71: Steckbrief zum Nutzenaspekt Bedarfsglättung

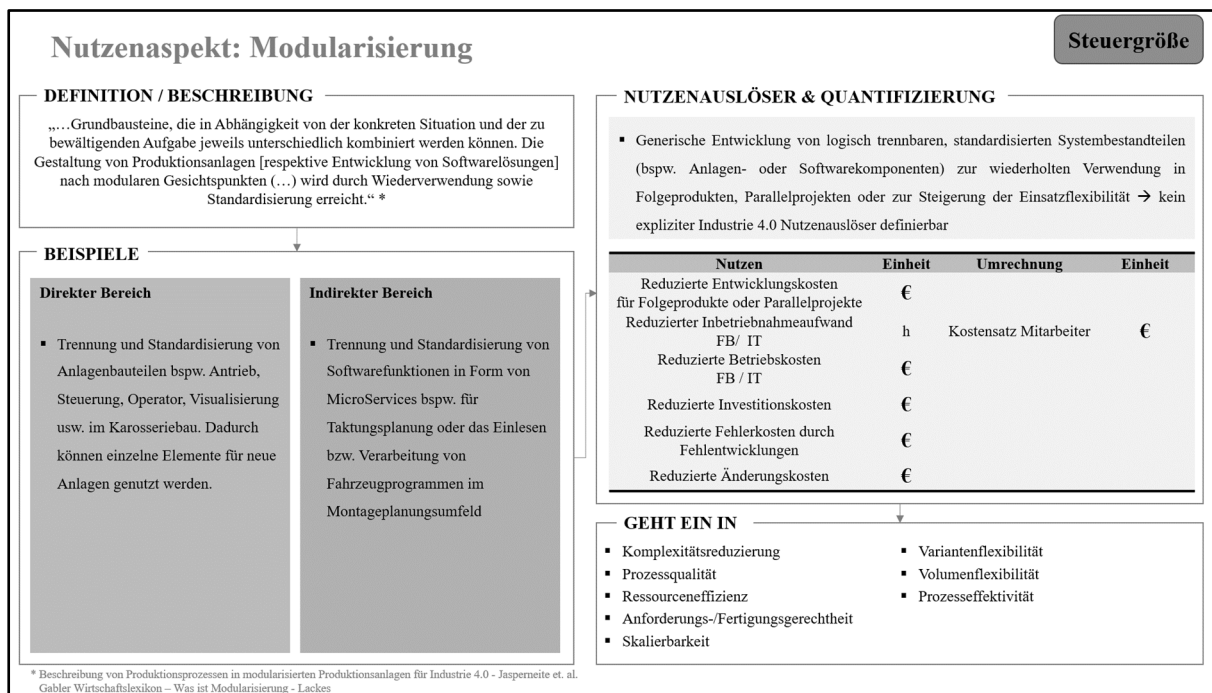


Abbildung 72: Steckbrief zum Nutzenaspekt Modularisierung

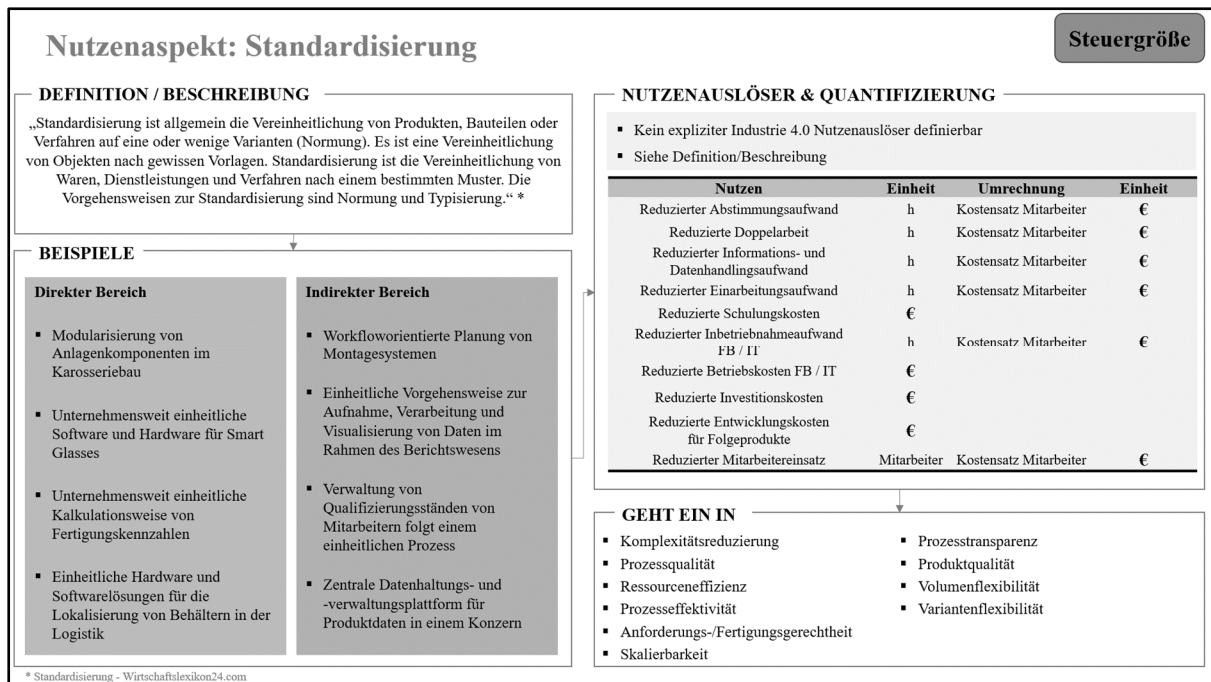


Abbildung 73: Steckbrief zum Nutzenaspekt Standardisierung

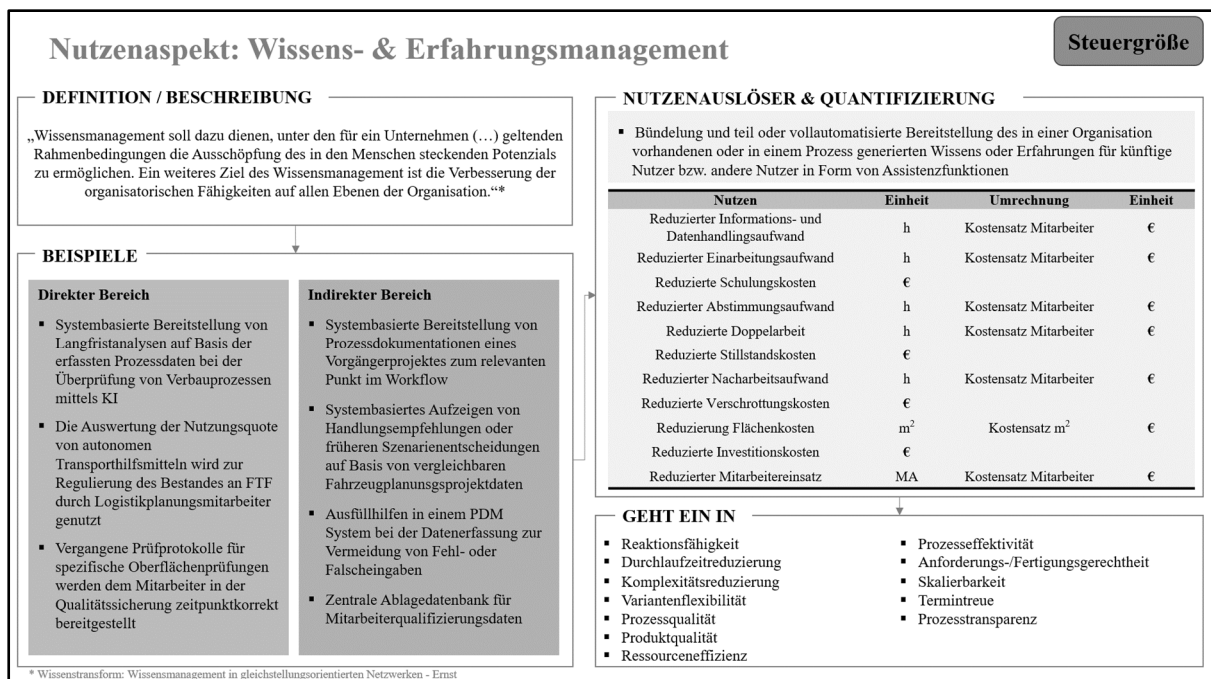


Abbildung 74: Steckbrief zum Nutzenaspekt Wissens- und Erfahrungsmanagement

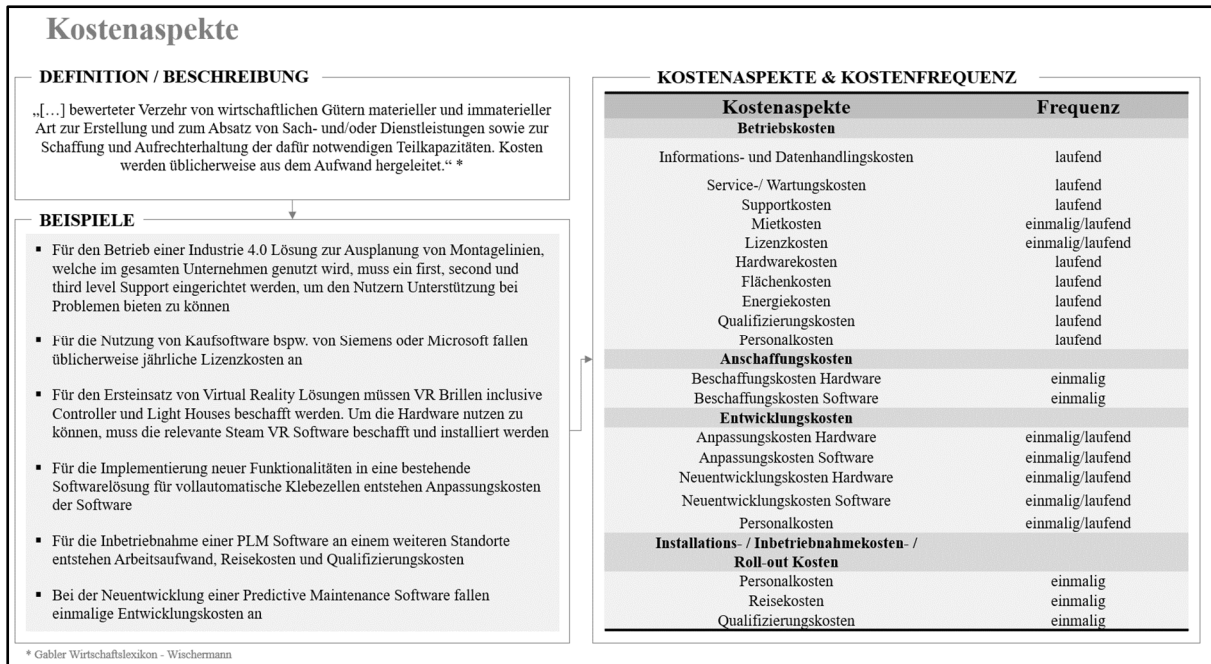


Abbildung 75: Steckbrief zu den Kostenaspekten von Industrie 4.0 Lösungen

## Anhang 5 Detailauswertung zu den Quantifizierungsmöglichkeiten der Nutzenaspekte

Nutzenaspekt	Anzahl 14.0 Projekte mit diesem Nutzenaspekt	Quantifizierungsmöglichkeiten	Häufigkeit in den Interviews	Häufigkeit in %
Mitarbeitereinsatzflexibilität	27	Reduzierter Planungs- & Umplanungsaufwand für MA Einsatz	3	11,1
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	8	29,6
		Reduzierte Schulungskosten	5	18,5
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	1	3,7
		Reduzierte Verschrottungskosten	1	3,7
		Reduzierte Stillstandskosten	3	11,1
Variantenflexibilität	22	Reduzierte Stillstandskosten	1	4,5
		Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB/IT	1	4,5
		Reduzierte Rüstkosten	1	4,5
		Reduzierter Flächenbedarf	5	22,7
		Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	1	4,5
		Reduzierte Investitionskosten	2	9,1
		Reduzierte Betriebskosten	2	9,1
		Reduzierter Materialeinsatz	4	18,2
Reduzierter Nacharbeitsaufwand	2	9,1		
Volumenflexibilität	15	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	2	13,3
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	1	6,7
		Reduzierter Flächenbedarf	1	6,7
		Reduzierter Mitarbeitereinsatz	2	13,3
		Reduzierter Planungsaufwand	1	6,7
		Reduzierte Betriebskosten FB/IT	4	26,7
		Reduzierte Investitionskosten	3	20,0
Komplexitätsreduzierung	29	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	9	31,0
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	1	3,4
		Reduzierte Schulungskosten	3	10,3
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	2	6,9
		Reduzierter Mitarbeitereinsatz	8	27,6
		Reduzierte Flächenkosten	2	6,9
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	2	6,9
		Reduzierte Verschrottungskosten	1	3,4
		Reduzierte Betriebskosten FB/IT	8	27,6
		Reduzierte Investitionskosten FB/IT	5	17,2
		Reduzierte Stillstandskosten	3	10,3
		Reduzierte Umtaktungskosten	2	6,9
Reaktionsfähigkeit	35	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	11	31,4
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	4	11,4
		Reduzierte Doppelarbeit	4	11,4
		Reduzierter Mitarbeitereinsatz	2	5,7
		Reduzierte Stillstandskosten	5	14,3
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	4	11,4
		Reduzierte Verschrottungskosten	4	11,4
		Reduzierte Sonderfahrtkosten	1	2,9
		Reduzierter Flächenbedarf	1	2,9
Individualisierung der Bedienoberfläche	16	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	11	68,8
		Datensuchaufwand	11	68,8
		Datenverarbeitungsaufwand	11	68,8
		Datenvisualisierungsaufwand	11	68,8
Echtzeitsteuerung	19	Reduzierte Stillstandskosten	4	21,1
		Reduzierung von Nacharbeitsaufwand	3	15,8
		Reduzierung von Verschrottungskosten	3	15,8
		Reduzierter Flächenbedarf	2	10,5
		Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	6	31,6
Autonome Systeme	17	Reduzierter Mitarbeitereinsatz FB	9	52,9
		Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	1	5,9
		Reduzierte Stillstandskosten	3	17,6
		Reduzierte Betriebskosten FB	3	17,6
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	3	17,6
		Reduzierte Verschrottungskosten	3	17,6
		Reduzierung Flächenkosten	1	5,9
Mitarbeitervernetzung	13	Reduzierter Informationsbeschaffungsaufwand	7	53,8
		Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	10	76,9
		Reduzierte Reisekosten	1	7,7
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	5	38,5
		Reduzierte Doppelarbeit	5	38,5

Fortsetzung

Nutzenaspekt	Anzal 14.0 Projekte mit diesem Nutzenaspekt	Quantifizierungsmöglichkeiten	Häufigkeit in den Interviews	Häufigkeit in %
<b>Erfahrungs- und Wissensmanagement</b>	26	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	6	23,1
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	4	15,4
		Reduzierte Schulungskosten	3	11,5
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	1	3,8
		Reduzierte Doppelarbeit	3	11,5
		Reduzierte Stillstandskosten	2	7,7
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	7	26,9
		Reduzierte Verschrottungskosten	6	23,1
		Reduzierung Flächenkosten	2	7,7
		Reduzierte Investitionskosten	3	11,5
		Reduzierter Mitarbeitereinsatz	2	7,7
<b>Assistenzsysteme</b>	31	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	10	32,3
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	2	6,5
		Reduzierte Schulungskosten	3	9,7
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	8	25,8
		Reduzierte Doppelarbeit	6	19,4
		Reduzierte Stillstandskosten	2	6,5
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	6	19,4
		Reduzierte Verschrottungskosten	6	19,4
		Reduzierte Investitionskosten	1	3,2
		Reduzierter Mitarbeitereinsatz	3	9,7
		Reduzierte Krankenquote	3	9,7
		Reduzierte Fluktuationsquote	3	9,7
<b>Value Chain Integration</b>	22	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	10	45,5
		Reduzierte Investitionskosten FB	2	9,1
		Reduzierte Betriebskosten FB	5	22,7
		Reduzierte Betriebskosten IT	3	13,6
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	3	13,6
		Reduzierte Doppelarbeit und Planungsaufwand	3	13,6
		Reduzierter Mitarbeitereinsatz	4	18,2
<b>Modularisierung</b>	27	Reduzierte Entwicklungskosten für Folgeprodukte oder Parallelprojekte	17	63,0
		Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB/ IT	10	37,0
		Reduzierte Betriebskosten FB / IT	5	18,5
		Reduzierte Investitionskosten	5	18,5
		Reduzierte Fehlerkosten durch Fehlentwicklungen	7	25,9
		Reduzierte Änderungskosten	4	14,8
<b>Standardisierung</b>	35	Reduzierter Abstimmungsaufwand	13	37,1
		Reduzierte Doppelarbeit	10	28,6
		Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	13	37,1
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	4	11,4
		Reduzierte Schulungskosten	4	11,4
		Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB / IT	4	11,4
		Reduzierte Betriebskosten FB / IT	5	14,3
		Reduzierte Investitionskosten	3	8,6
		Reduzierte Entwicklungskosten für Folgeprodukte	2	5,7
		Reduzierter Mitarbeitereinsatz	4	11,4
<b>Dezentralisierung von Entscheidungskompetenzen</b>	21	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	11	52,4
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	6	28,6
		Reduzierte Doppelarbeit	5	23,8
		Reduzierte Stillstandskosten	1	4,8
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	2	9,5
		Reduzierte Verschrottungskosten	2	9,5
				Reduzierter Mitarbeitereinsatz
<b>Mitarbeitervernetzung</b>	13	Reduzierter Informationsbeschaffungsaufwand	4	30,8
		Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	5	38,5
		Reduzierte Reisekosten	1	7,7
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	5	38,5
		Reduzierte Doppelarbeit	4	30,8
<b>Durchlaufzeitreduzierung</b>	37	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	11	29,7
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	6	16,2
		Reduzierte Doppelarbeit	6	16,2
		Reduzierte Reisekosten	1	2,7
		Reduzierte Stillstandskosten	2	5,4
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	4	10,8
		Reduzierte Verschrottungskosten	3	8,1
		Reduzierter Materialeinsatz	2	5,4
		Reduzierter Mitarbeitereinsatz	16	43,2
		Umsatzsteigerung	1	2,7

Fortsetzung

Nutzenaspekt	Anzal 14.0 Projekte mit diesem Nutzenaspekt	Quantifizierungsmöglichkeiten	Häufigkeit in den Interviews	Häufigkeit in %
Prozessqualität	37	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	9	24,3
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	1	2,7
		Reduzierte Schulungskosten	1	2,7
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	9	24,3
		Reduzierte Doppelarbeit	8	21,6
		Reduzierte Stillstandskosten	3	8,1
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	7	18,9
		Reduzierte Verschrottungskosten	6	16,2
		Reduzierung Flächenkosten	1	2,7
		Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	13	35,1
		Reduzierte Krankenquote	2	5,4
		Reduzierte Fluktuationsquote	1	2,7
		Reduzierte Fehllieferungskosten	1	2,7
		Reduzierte Investitionskosten	3	8,1
Reduzierte Betriebskosten FB/IT	7	18,9		
Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB / IT	2	5,4		
Reduzierte Reisekosten	1	2,7		
Produktqualität	18	Reduzierter Abstimmungsaufwand	9	50,0
		Reduzierte Doppelarbeit	8	44,4
		Reduzierte Stillstandskosten	2	11,1
		Reduzierte Schulungskosten	1	5,6
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	3	16,7
		Reduzierte Verschrottungskosten	3	16,7
		Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	3	16,7
		Reduzierte Materialeinsatzkosten	4	22,2
		Reduzierte Fehllieferungskosten	1	5,6
Reduzierte Investitionskosten	4	22,2		
Reduzierung von Strafzahlungen	1	5,6		
Automatisierung	32	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	14	43,8
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	2	6,3
		Reduzierte Schulungskosten	2	6,3
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	6	18,8
		Reduzierte Doppelarbeit	4	12,5
		Reduzierte Stillstandskosten	1	3,1
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	3	9,4
		Reduzierte Verschrottungskosten	3	9,4
		Reduzierung Flächenkosten	1	3,1
		Reduzierung Fertigungszeit	7	21,9
		Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	13	40,6
		Reduzierte Krankenquote	2	6,3
		Reduzierte Materialeinsatzkosten	1	3,1
Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB	3	9,4		
Virtuelle Absicherung	16	Reduzierter Abstimmungsaufwand	5	31,3
		Reduzierte Doppelarbeit	3	18,8
		Reduzierte Reisekosten	1	6,3
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	5	31,3
		Reduzierung Flächenkosten	1	6,3
		Reduzierung Fertigungszeit	1	6,3
		Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	4	25,0
		Reduzierter Invest für Prototypen & Anlagen	4	25,0
		Reduzierte Materialeinsatzkosten	3	18,8
Reduzierte Betriebskosten FB	6	37,5		
Datenkonsistenz	30	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	22	73,3
		Reduzierte Prozess- & Fertigungszeit	2	6,7
		Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	8	26,7
		Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB	2	6,7
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	7	23,3
Reduzierte Doppelarbeit	6	20,0		
Arbeitsergonomie	22	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	9	40,9
		Reduzierte Krankenquote	7	31,8
		Reduzierte Fluktuationsquote	2	9,1
		Reduzierte Kosten für Gesundheitsmaßnahmen	6	27,3
Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	8	36,4		

Fortsetzung

Nutzenaspekt	Anzahl I4.0 Projekte mit diesem Nutzenaspekt	Quantifizierungsmöglichkeiten	Häufigkeit in den Interviews	Häufigkeit in %
Prozesseffektivität	27	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	6	22,2
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	7	25,9
		Reduzierte Doppelarbeit	6	22,2
		Reduzierter Aufwand für Sonderprozesse	2	7,4
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	5	18,5
		Reduzierte Verschrottungskosten	5	18,5
		Reduzierung Flächenkosten	2	7,4
		Reduzierter Mitarbeiterinsatz	12	44,4
		Reduzierte Krankenquote	1	3,7
		Reduzierte Fluktuationsquote	1	3,7
		Reduzierte Fehllieferungskosten	2	7,4
		Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB	3	11,1
Reduzierte Betriebskosten FB	4	14,8		
Ressourceneffizienz	39	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	11	28,2
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	2	5,1
		Reduzierte Schulungskosten	3	7,7
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	5	12,8
		Reduzierte Doppelarbeit	4	10,3
		Reduzierte Stillstandskosten	3	7,7
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	5	12,8
		Reduzierte Verschrottungskosten	4	10,3
		Reduzierung Flächenkosten	3	7,7
		Reduzierte Kapitalbindungskosten	4	10,3
		Reduzierter Mitarbeiterinsatz	23	59,0
		Reduzierte Krankenquote	1	2,6
		Reduzierte Fluktuationsquote	1	2,6
		Reduzierte Fehllieferungskosten		0,0
		Reduzierte Investitionskosten FB / IT	7	17,9
		Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB / IT	5	12,8
Reduzierte Betriebskosten FB / IT	10	25,6		
Reduzierte Reisekosten	2	5,1		
Nutzerfreundlichkeit/Usability	19	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	6	31,6
		Reduzierte Stillstandskosten	1	5,3
		Reduzierte Krankenquote	1	5,3
		Reduzierte Fluktuationsquote	1	5,3
		Reduzierte Kosten für Gesundheitsmaßnahmen	1	5,3
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	6	31,6
		Reduzierte Bedienzeit	3	15,8
Reduzierte Schulungskosten	8	42,1		
Informationsverfügbarkeit	33	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	25	75,8
		Reduzierte Stillstandskosten	4	12,1
		Reduzierte Fertigungszeit	2	6,1
		Reduzierter Mitarbeiterinsatz	8	24,2
		Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB	1	3,0
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	5	15,2
Reduzierte Doppelarbeit	4	12,1		
Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	25	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	9	36,0
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	3	12,0
		Reduzierte Schulungskosten	3	12,0
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	8	32,0
		Reduzierte Doppelarbeit	9	36,0
		Reduzierte Stillstandskosten	3	12,0
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	8	32,0
		Reduzierte Verschrottungskosten	6	24,0
		Reduzierung Flächenkosten	3	12,0
		Reduzierte Kapitalbindungskosten	3	12,0
		Reduzierter Mitarbeiterinsatz	8	32,0
		Reduzierte Krankenquote	1	4,0
		Reduzierte Fluktuationsquote	1	4,0
		Reduzierte Fehllieferungskosten	3	12,0
		Reduzierte Investitionskosten	6	24,0
Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand FB / IT	4	16,0		
Reduzierte Betriebskosten FB / IT	9	36,0		
Reduzierte Prozess- & Fertigungszeit	2	8,0		
Bedarfglättung	6	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	2	33,3
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	2	33,3
		Reduzierte Doppelarbeit	2	33,3
		Reduzierte Betriebskosten FB	3	50,0
		Reduzierter Mitarbeiterinsatz	4	66,7
		Reduzierte Stillstandskosten	3	50,0
Reduzierte Prozess- & Fertigungszeit	2	33,3		

Fortsetzung

Nutzenaspekt	Anzahl I4.0 Projekte mit diesem Nutzenaspekt	Quantifizierungsmöglichkeiten	Häufigkeit in den Interviews	Häufigkeit in %
Skalierbarkeit	37	Reduzierte Entwicklungskosten für Folgeprodukte	17	45,9
		Reduzierter Inbetriebnahmeaufwand IT / FB	18	48,6
		Reduzierte Betriebskosten IT / FB	4	10,8
		Reduzierte Investitionskosten	3	8,1
		Fehlerkosten durch Fehlentwicklungen	3	8,1
		Reduzierte Doppelarbeit	9	24,3
		Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	4	10,8
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	3	8,1
		Reduzierte Schulungskosten	2	5,4
		Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	6	16,2
		Reduzierte Lizenzkosten	2	5,4
Reduzierung Flächenkosten	2	5,4		
Terminreue	8	Reduzierter Nacharbeits- (Umplanungs) aufwand	5	62,5
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	5	62,5
		Reduzierte Doppelarbeit	3	37,5
		Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	4	50,0
		Reduzierte Betriebskosten FB	3	37,5
		Reduzierte Vertragsstrafen	3	37,5
		Reduzierte Sonderfahrtkosten	2	25,0
		Reduzierte Stillstandskosten	3	37,5
		Reduzierung Flächenkosten	3	37,5
Reduzierter Materialbestand	4	50,0		
Engpasserkennung	12	Reduzierter Nacharbeitsaufwand	4	33,3
		Reduzierter Planungsaufwand	8	66,7
		Reduzierte Betriebskosten FB	4	33,3
		Reduzierte Sonderfahrtkosten	2	16,7
		Reduzierte Stillstandskosten	3	25,0
		Reduzierung Flächenkosten	3	25,0
		Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	5	41,7
Reduzierte Reisekosten	2	16,7		
Prozesstransparenz	37	Reduzierter Informations- und Datenhandlingsaufwand	22	59,5
		Reduzierter Einarbeitungsaufwand	2	5,4
		Reduzierte Schulungskosten	2	5,4
		Reduzierter Abstimmungsaufwand	17	45,9
		Reduzierte Doppelarbeit	12	32,4
		Reduzierte Stillstandskosten	2	5,4
		Reduzierter Nacharbeitsaufwand	3	8,1
		Reduzierte Verschrottungskosten	3	8,1
Reduzierter Mitarbeiterereinsatz	10	27,0		

Abbildung 76: Detailauswertung zu den Quantifizierungsmöglichkeiten der Nutzenaspekte

## Anhang 6 Detailauswertung zur Systematisierung der Nutzenaspekte

Steuergröße	Ergebnisgrößen	Übereinstimmung bei den Quantifizierungen in %	Abhängigkeit
Echtzeitsteuerung	Variantenflexibilität	71	ja
	Reaktionsfähigkeit	100	ja
	Durchlaufzeitreduzierung	86	ja
	Volumenflexibilität	43	nein
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	43	nein
	Komplexitätsreduzierung	86	ja
	Prozessqualität	100	ja
	Produktqualität	86	ja
	Ressourceneffizienz	100	ja
	Prozesseffektivität	86	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	100	ja
	Skalierbarkeit	57	ja
	Termintreue	43	nein
	Engpasserkennung	57	ja
Prozesstransparenz	86	ja	
Value Chain Integration	Variantenflexibilität	67	ja
	Reaktionsfähigkeit	50	ja
	Durchlaufzeitreduzierung	50	ja
	Volumenflexibilität	67	ja
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	17	nein
	Komplexitätsreduzierung	83	ja
	Prozessqualität	100	ja
	Produktqualität	50	ja
	Ressourceneffizienz	100	ja
	Prozesseffektivität	67	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	100	ja
	Skalierbarkeit	83	ja
	Termintreue	67	ja
	Engpasserkennung	29	nein
Prozesstransparenz	50	ja	
Modularisierung	Variantenflexibilität	50	ja
	Reaktionsfähigkeit	17	nein
	Durchlaufzeitreduzierung	17	nein
	Volumenflexibilität	67	ja
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	17	nein
	Komplexitätsreduzierung	50	ja
	Prozessqualität	83	ja
	Produktqualität	33	nein
	Ressourceneffizienz	67	ja
	Prozesseffektivität	50	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	67	ja
	Skalierbarkeit	100	ja
	Termintreue	33	nein
	Engpasserkennung	33	nein
Prozesstransparenz	17	nein	

Fortsetzung

Steuergröße	Ergebnisgrößen	Übereinstimmung bei den Quantifizierungen in %	Abhängigkeit
Standardisierung	Variantenflexibilität	60	ja
	Reaktionsfähigkeit	30	nein
	Durchlaufzeitreduzierung	40	nein
	Volumenflexibilität	50	ja
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	20	nein
	Komplexitätsreduzierung	80	ja
	Prozessqualität	90	ja
	Produktqualität	50	ja
	Ressourceneffizienz	90	ja
	Prozesseffektivität	60	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	90	ja
	Skalierbarkeit	90	ja
	Termintreue	40	nein
	Engpasserkennung	20	nein
Prozesstransparenz	60	ja	
Wissens- & Erfahrungsmanagement	Variantenflexibilität	55	ja
	Reaktionsfähigkeit	73	ja
	Durchlaufzeitreduzierung	64	ja
	Volumenflexibilität	46	nein
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	36	nein
	Komplexitätsreduzierung	91	ja
	Prozessqualität	100	ja
	Produktqualität	82	ja
	Ressourceneffizienz	100	ja
	Prozesseffektivität	64	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	100	ja
	Skalierbarkeit	55	ja
	Termintreue	55	ja
	Engpasserkennung	36	nein
Prozesstransparenz	82	ja	
Autonome Systeme	Variantenflexibilität	57	ja
	Reaktionsfähigkeit	86	ja
	Durchlaufzeitreduzierung	71	ja
	Volumenflexibilität	57	ja
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	43	nein
	Komplexitätsreduzierung	100	ja
	Prozessqualität	100	ja
	Produktqualität	57	ja
	Ressourceneffizienz	100	ja
	Prozesseffektivität	71	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	100	ja
	Skalierbarkeit	57	ja
	Termintreue	57	ja
	Engpasserkennung	57	ja
Prozesstransparenz	71	ja	

Fortsetzung

Steuergröße	Ergebnisgrößen	Übereinstimmung bei den Quantifizierungen in %	Abhängigkeit
Assistenzsysteme	Variantenflexibilität	41	nein
	Reaktionsfähigkeit	58	ja
	Durchlaufzeitreduzierung	58	ja
	Volumenflexibilität	33	nein
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	50	ja
	Komplexitätsreduzierung	75	ja
	Prozessqualität	100	ja
	Produktqualität	67	ja
	Ressourceneffizienz	100	ja
	Prozesseffektivität	67	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	100	ja
	Skalierbarkeit	50	ja
	Termintreue	42	nein
	Engpasserkennung	25	nein
Prozesstransparenz	75	ja	
Datenkonsistenz	Variantenflexibilität	50	ja
	Reaktionsfähigkeit	67	ja
	Durchlaufzeitreduzierung	67	ja
	Volumenflexibilität	50	ja
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	17	nein
	Komplexitätsreduzierung	50	ja
	Prozessqualität	83	ja
	Produktqualität	50	ja
	Ressourceneffizienz	83	ja
	Prozesseffektivität	83	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	83	ja
	Skalierbarkeit	67	ja
	Termintreue	50	ja
	Engpasserkennung	17	nein
Prozesstransparenz	67	ja	
Usability/ Nutzerfreundlichkeit	Variantenflexibilität	29	nein
	Reaktionsfähigkeit	29	nein
	Durchlaufzeitreduzierung	14	nein
	Volumenflexibilität	14	nein
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	14	nein
	Komplexitätsreduzierung	57	ja
	Prozessqualität	86	ja
	Produktqualität	14	nein
	Ressourceneffizienz	86	ja
	Prozesseffektivität	71	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	86	ja
	Skalierbarkeit	29	nein
	Termintreue	29	nein
	Engpasserkennung	14	nein
Prozesstransparenz	43	nein	

Fortsetzung

Steuergröße	Ergebnisgrößen	Übereinstimmung bei den Quantifizierungen in %	Abhängigkeit
Arbeitsergonomie	Variantenflexibilität	40	nein
	Reaktionsfähigkeit	40	nein
	Durchlaufzeitreduzierung	40	nein
	Volumenflexibilität	40	nein
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	0	nein
	Komplexitätsreduzierung	40	nein
	Prozessqualität	80	ja
	Produktqualität	20	nein
	Ressourceneffizienz	80	ja
	Prozesseffektivität	80	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	80	ja
	Skalierbarkeit	40	nein
	Termintreue	20	nein
	Engpasserkennung	20	nein
Prozesstransparenz	40	nein	
Bedarfsglättung	Variantenflexibilität	57	ja
	Reaktionsfähigkeit	71	ja
	Durchlaufzeitreduzierung	71	ja
	Volumenflexibilität	57	ja
	Mitarbeitereinsatzflexibilität	14	nein
	Komplexitätsreduzierung	71	ja
	Prozessqualität	86	ja
	Produktqualität	57	ja
	Ressourceneffizienz	86	ja
	Prozesseffektivität	86	ja
	Anforderungs- und Fertigungsgerechtigkeit	86	ja
	Skalierbarkeit	57	ja
	Termintreue	71	ja
	Engpasserkennung	43	nein
Prozesstransparenz	71	ja	

Abbildung 77: Detailauswertung zur Systematisierung der Nutzenaspekte