

Robert Joppen

***Systematik zur Bewertung von
Industrie 4.0 Anwendungen in
der Produktion***

***Systematic approach for the
evaluation of Industry 4.0
applications in production***

Geleitwort

Advanced Systems Engineering steht für eine neue umfassende Perspektive in der Planung, der Entwicklung und dem Betrieb der technischen Systeme von morgen. Es ist die verbindende Leitidee unserer Forschungsarbeiten. In der gleichnamigen Fachgruppe am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn sowie am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM arbeiten wir an dieser Leitidee. Unser generelles Ziel ist die Steigerung der Innovationskraft von Industrieunternehmen. Zentrale Schwerpunkte der Forschung an den beiden Instituten sind die strategische Planung und das Systems Engineering.

Industrie 4.0 ermöglicht neue Formen der Wertschöpfung. Dies führt zu tiefgreifenden Veränderungen in produzierenden Unternehmen. Mit dem Einsatz des Internets der Dinge und Industrie 4.0 Anwendungen werden Produktionssysteme zukünftig hoch flexibel und hoch effizient den Marktanforderungen gerecht. Die Umsetzung von Industrie 4.0 stellt Unternehmen jedoch vor vielfältige Herausforderungen. Eine zentrale Herausforderung ist die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion.

Diese Herausforderung hat Herr Joppen aufgegriffen und eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion entwickelt. Sie versetzt Unternehmen in die Lage, den Einsatz konkreter Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion zu bewerten. Die Grundlage der Arbeit bildet eine Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Sie stellt die theoretische Grundlage für eine Investitionsbewertung dar. Ein Vorgehensmodell mit anwendungsspezifischen Ausprägungen ermöglicht es Situationsgerecht die Systematik anzuwenden. Es beschreibt die zu tätigenden Aufgaben, setzt diese in einen zeitlichen Kontext und definiert die einzusetzenden Methoden. Die entwickelten Methoden ermöglichen eine systemische Betrachtung des Investitionsobjekts und eine disziplinenübergreifende Kommunikation über die Aufgabenstellung im Sinne des Advanced Systems Engineering.

Herr Joppen leistet mit seiner Arbeit einen hochinnovativen Beitrag zur Umsetzung des Konzepts Industrie 4.0. Insbesondere die systemische Betrachtung des Investitionsobjekts im Sinne des Advanced Systems Engineerings legt ein Fundament für weitere Forschungsarbeiten. Die nachgewiesene Praxisrelevanz stellt ein Gütesiegel seiner Arbeit dar, sodass sie sowohl in der Wissenschaft als auch in der industriellen Praxis hohe Anerkennung finden wird.

Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0

Anwendungen in der Produktion

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M.Sc. Robert Joppen
aus Höxter

Tag des Kolloquiums: 30. September 2021

Referent: Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Korreferent: Prof. Dr. Josef Oehmen

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Strategische Produktplanung und Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut sowie dem Forschungsbereich Produktentstehung am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen von Forschungs- und Industrieprojekten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Roman Dumitrescu für das entgegengebrachte Vertrauen sowie die übertragene Verantwortung. Du und das von dir geschaffene Umfeld haben mich in den letzten Jahren maßgeblich geprägt. Ausdrücklich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier. Bereits während meines Studiums haben Sie sehr zu meiner fachlichen und persönlichen Entwicklung beigetragen. Sie waren ein entscheidender Faktor für mich in Paderborn zu promovieren. Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Professor Dr. Josef Oehmen von der Technical University of Denmark.

Weiterhin möchte ich allen aktiven und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer Instituts und des Heinz Nixdorf Instituts für eine fantastische Zusammenarbeit danken. Euch ist es zu verdanken, dass es stets Spaß gemacht hat! Stellvertretend hervorheben möchte ich hier zunächst Dr.-Ing. Arno Kühn. Die Zusammenarbeit mit dir war stets nicht nur fordernd und fördernd, sondern hat auch sehr viel Spaß gemacht! Ein besonderer Dank geht auch an Dr.-Ing. Sebastian von Enzberg. Als Bürokollege hatte ich stets einen fachlichen Ansprechpartner und guten Freund an meiner Seite. Ein weiterer Dank gilt der gesamten Gruppe Unternehmensgestaltung und dem Business Development Team.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen ehemaligen Studierenden, die mich als studentische Hilfskräfte oder durch ihre studentischen Arbeiten tatkräftig unterstützt haben. Hervorheben möchte ich hier Maik Berend und Christina Saprunenko, die mir lange Zeit eine unermüdliche und verlässliche Unterstützung waren. Ein extra Dankeschön auch an Sabine Illigen und Alexandra Dutschke für eure Unterstützung.

Der größte Dank gebührt meiner Familie. In erster Linie sind das meine Eltern Günter und Marianne sowie mein Bruder Manuel. Ich danke euch von ganzem Herzen für eure großartige Unterstützung und euren Rückhalt. Ein besonderer Dank gilt auch meiner Freundin Astrid. Vielen Dank!

Paderborn, im Oktober 2021

Robert Joppen

Zusammenfassung

Industrie 4.0 bietet zahlreiche Nutzenpotentiale in der Produktion. Diese reichen von einer datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen einzelner Maschinen über fahrerlose Transportsysteme und Assistenzsysteme bis hin zur Verbesserung der gesamten Produktionsplanung und -steuerung. Nach wie vor sind jedoch insbesondere kleine und mittlere Unternehmen bei Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen zurückhaltend. Dies spiegelt sich in zahlreichen Studien zu Industrie 4.0 wider. Als eines der zentralen Hemmnisse wurde dabei stets der unklare Nutzen identifiziert.

Ziel dieser Arbeit ist eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Die entwickelte Systematik verfolgt das Ziel Transparenz über den Bewertungsprozess einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion zu schaffen. Sie unterstützt den geplanten Einsatz einer konkreten technischen Lösung in einem bestehenden Produktionssystem zu bewerten. Grundlage der Systematik ist eine Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen. Aus der Charakterisierung wird ein Vorgehensmodell mit anwendungsspezifischen Ausprägungen abgeleitet, welches die zu tätigen Aufgaben sowie die einzusetzenden Hilfsmittel in einen zeitlichen Kontext setzt. In diesem Zuge werden diverse Hilfsmittel und eine Werkzeugunterstützung bereitgestellt. Die Anwendung der Systematik wird anhand von zwei Anwendungsbeispielen aufgezeigt.

Summary

Industry 4.0 offers numerous potentials in production. These range from data-driven optimization of production processes of individual machines, driverless transport systems and assistance systems to the optimization of the entire production planning and control. However, small and medium-sized companies in particular are still reluctant to invest in Industry 4.0 applications. This is reflected in numerous studies on the barriers to the introduction of Industry 4.0. The unclear economic benefit was identified as one of the central obstacles.

The aim of this work is a systematic approach for the evaluation of Industry 4.0 applications in production. The developed systematic pursues the goal of creating transparency over the evaluation process of an investment in an Industry 4.0 application in production. It thus supports the evaluation of the potential use of a concrete technical solution in an existing production system. Basis of this systematic is a characterization of investments in Industry 4.0 applications. From that characterization a procedure model with application-specific characteristics is derived. It puts the necessary tasks and methods to be used into a temporal context. In this context various methods as well as a developed tool are provided. The application of the systematic is shown on the basis of two application examples.

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [KGJ+16] KOECHLING, D.; GAUSEMEIER, J.; JOPPEN, R.; MITTAG, T.: Design of a Self-Optimising Production Control System. In: Marjanović, D.; Štorga, M.; Pavković, N.; Bojčetić, N.; Škec, S. (Eds.): Proceedings of the DESIGN 2016, 14th International Design Conference, Dubrovnik, 2016
- [JK+17] JOPPEN, R.; KÜHN, A.: Auf dem Weg zur Digitalisierung im mittelständischen Schaltschrankbau – Ein praxiserprobter Leitfaden. In: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Wissenschaft trifft Praxis – Digitale Produktionsmittel im Einsatz. Ausgabe 9, Begleitforschung Mittelstand-Digital WIK GmbH, Bad Honnef, 2017
- [FGH+18] FAY, A.; GAUSEMEIER, J.; TEN HOMPEL, M. (HRSG.); BUSERT, T.; LEWIN, M.; JOPPEN, R.; MITTAG, T.; POTT, C.; WERNECKE, M.: Einordnung der Beispiele der Industrie 4.0-Landkarte in die Anwendungsszenarien. Acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, 2018
- [JEK+18a] JOPPEN, R.; VON ENZBERG, S.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: A practical Framework for the Optimization of Production Management Processes. In: Seliger, G.; Jawahir, I.S.; Badurdeen, F.; Kohl, H. (Eds.): 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Lexington, 2018
- [JEK+18b] JOPPEN, R.; VON ENZBERG, S.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Data Map – Method for the Specification of Data Flows. In: Teti, R. (Ed.): 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, 2018
- [JKH+18] JOPPEN, R.; KÜHN, A.; HUPACH, D.; DUMITRESCU, R.: Collecting Data in the Assessment of Investments within Production. In: Teti, R. (Ed.): 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, 2018
- [JTK18] JOPPEN, R.; TEKAAT, J.; KÜHN, A.: Identification and Structuring of Benefits and Expenses for Evaluating the Profitability of Investments in Digitization within Production. In: Seliger, G.; Jawahir, I.S.; Badurdeen, F.; Kohl, H. (Eds.): 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Lexington, 2018
- [KGJ18] KÖCHLING, D.; GAUSEMEIER, J.; JOPPEN, R.: Verbesserung von Produktionssystemen. In: Trächtler, A.; Gausemeier, J. (Hrsg.): Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme – Intelligente technische Systeme – Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL. Springer Vieweg Verlag, Berlin, 2018
- [KJR+18] KÜHN, A.; JOPPEN, R.; REINHART, F.; RÖLTGEN, D.; VON ENZBERG, S.; DUMITRESCU, R.: Analytics Canvas – A Framework for the Design and Specification of Data Analytics Projects. In: Laroche, F.; Bernard, A. (Eds.): 28th CIRP Design Conference, Nantes, 2018
- [JEG+19] JOPPEN, R.; VON ENZBERG, S.; GUNDLACH, J.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Key Performance Indicators in the Production of the Future. In: Butala, P.; Govekar, E.; Vrabic, R.; Roglej-Ritonja, A.; Bracun, D.; Kozjek, D.; Malus, A.; Selak, L.; Skulj, G. (Eds.): 52nd CIRP Manufacturing Systems Conference, Ljubljana, 2019
- [JEK+19] JOPPEN, R.; VON ENZBERG, S.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Investitionsbewertung vor dem Hintergrund der Digitalisierung am Beispiel Schaltschrankbau. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Ausgabe 7-8, Band 114, Carl Hanser Verlag, München, 2019, S. 483-487
- [JLT+19] JOPPEN, R.; LIPSMEIER, A.; TEWES, C.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Evaluation of investments in the digitalization of a production. In: Butala, P.; Govekar, E.; Vrabic, R.; Roglej-Ritonja, A.; Bracun, D.; Kozjek, D.; Malus, A.; Selak, L.; Skulj, G. (Eds.): 52nd CIRP Manufacturing Systems Conference, Ljubljana, 2019

- [LKJ+19] LIPSMEIER, A.; KÜHN, A.; JOPPEN, R.; DUMITRESCU, R.: Process for the development of a digital strategy. In: Teti, R. (Ed.): 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, Italy, 2019
- [WJD+19] WORTMANN, F.; JOPPEN, R.; DREWEL, M.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Developing and Evaluating Concepts for a digital Platform. In: Jain, K.; Ahmed, O.; Chakraborty, P. P. (Eds.): International Association for Management of Technology (IAMOT) – Managing Technology for Sustainable and Inclusive Growth, Mumbai, 2019
- [JKF+21] JOPPEN, R.; KÜHN, A.; FÖRSTER, M.; DUMITRESCU, R.: Evaluation of Industry 4.0 applications in production. In: Carayannis, E. G.; Dumitrescu, R.; Rabe, M.; Falkowski, T. (Eds.): Journal of the Knowledge Economy – Intelligent Technical Systems. Springer Verlag, Berlin, 2021 (*zur Veröffentlichung vorbereitet*)

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	1
1.1 Problematik.....	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau dieser Arbeit	3
2 Forschungsdesign	5
2.1 Design Research	5
2.1.1 Bedeutung von Design Research	5
2.1.2 Herausforderungen von Design Research	7
2.1.3 Ansätze zur Adressierung der Design Research Herausforderungen.....	7
2.2 Ansätze des Design Research	9
2.2.1 Vergleich von Forschungsdesignansätzen	9
2.2.2 Design Research Methodology	10
2.3 Einordnung und Vorgehen in dieser Arbeit	12
3 Problemanalyse	15
3.1 Begriffsdefinitionen und -abgrenzungen	15
3.1.1 Systematik	15
3.1.2 System.....	16
3.1.3 Interne Komplexität, externe Komplexität und Kompliziertheit... ..	18
3.1.4 Fertigung, Produktion und Produktionssystem	21
3.1.5 Digitalisierung und Industrie 4.0	23
3.1.6 Cyber-Physical Systems und Industrie 4.0 Anwendungen	24
3.1.7 Begriffe des Rechnungswesens und der Statistik.....	25
3.1.8 Bewertung, Investition, Wirtschaftlichkeit und Business Case... ..	27
3.2 Produktion auf dem Weg zur Industrie 4.0	28
3.2.1 Entwicklung von Anforderungen an Produktionssysteme	28
3.2.2 Heutige Produktionskonzepte.....	31
3.2.3 Vision im Rahmen von Industrie 4.0	33
3.2.4 Anwendungsszenarien und -beispiele von Industrie 4.0.....	35
3.2.5 Handlungsfeld 1: Strukturierung von Investitions- entscheidungen im Rahmen von Industrie 4.0.....	37
3.3 Einführung von Industrie 4.0 Anwendungen	37
3.3.1 Das 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung.....	37

3.3.2	Systemische Betrachtung von Industrie 4.0 Anwendungen.....	38
3.3.3	Handlungsfeld 2: Analyse der Industrie 4.0 Anwendung aus systemtheoretischer Sicht.....	42
3.4	Investitionsentscheidungen	42
3.4.1	Ziele von Investitionen	43
3.4.2	Strukturierung von Investitionsarten	44
3.4.3	Vorgehen zur Durchführung von Investitionsentscheidungen....	48
3.4.4	Herausforderungen bei Investitionsentscheidungen	50
3.4.5	Benötigte Daten zur Bewertung von Investitionen	56
3.4.6	Handlungsfeld 3: Unterstützung bei der Datenerhebung für eine Bewertung	57
3.5	Problemabgrenzung	58
3.6	Anforderungen an die Systematik.....	59
4	Stand der Technik	63
4.1	Ansätze der Investitionsrechnung.....	63
4.1.1	Klassische Methoden der Investitionsrechnung.....	63
4.1.1.1	Statische Verfahren der Investitionsrechnung	64
4.1.1.2	Dynamische Verfahren der Investitionsrechnung	66
4.1.2	Ansätze zur Berücksichtigung von Unsicherheit.....	69
4.1.2.1	Korrekturverfahren.....	69
4.1.2.2	Sensitivitätsanalyse	69
4.1.2.3	Risikoanalyse	70
4.2	Domänenspezifische Bewertungsansätze	71
4.2.1	Ansätze aus der Betriebswirtschaftslehre.....	71
4.2.1.1	Ansatz zur Bewertung von Strategien für Industrie 4.0.....	72
4.2.1.2	Methode für ein integriertes Risikomanagement von Portfolios.....	73
4.2.2	Ansätze aus der Ingenieurwissenschaft	74
4.2.2.1	Vorgehen zur Planung und Bewertung eines RFID-Einsatzes	75
4.2.2.2	Methode für die Bewertung von Herstellkosten in der frühen Phase der Produktentstehung	76
4.2.2.3	VDMA Leitfaden zur Investitionsrechnung für Digi- talisierungsprojekte und Industrie 4.0 Vorhaben.....	77
4.2.3	Ansätze aus der Informatik und dem Systems Engineering	78
4.2.3.1	Allgemeine Methoden zur Aufwandsschätzung von IT-Projekten	78
4.2.3.2	Function Point Methode.....	81
4.2.3.3	Constructive Systems Engineering Cost Model.....	82

4.3	Ansätze zur Systemanalyse und -bewertung	84
4.3.1	Ansätze zur Analyse und Bewertung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen	84
4.3.1.1	Methode zur Flexibilitätsbewertung	84
4.3.1.2	System zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit	86
4.3.2	Ansätze zur Analyse und Bewertung der Komplexität von Produktionssystemen	88
4.3.2.1	Design Structure Matrix mit Erweiterungen	88
4.3.2.2	Modell zur empirischen Bewertung von Produktionssystemen	92
4.4	Kennzahlensysteme	93
4.4.1	Allgemeine Kennzahlensysteme.....	94
4.4.1.1	DuPont System of Financial Control.....	94
4.4.1.2	ZVEI Kennzahlensystem	95
4.4.2	Spezifische Kennzahlensysteme	96
4.4.2.1	Wertstromkennzahlensystem mit Fokus Produktion..	97
4.4.2.2	Logistikkennzahlensystem für die Produktion.....	98
4.4.3	Weitere Kennzahlensysteme	99
4.5	Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse bzw. -exploration ...	99
4.5.1	Kreativitätstechniken	100
4.5.2	Ansätze der Prozessmodellierung und -analyse.....	101
4.5.3	Methoden der Vorausschau.....	102
4.6	Methoden der Entscheidungsunterstützung	104
4.6.1	Nutzwertanalyse	104
4.6.2	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution.....	105
4.6.3	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation.....	107
4.7	Handlungsbedarf	110
5	Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion	113
5.1	Bestandteile der Systematik	114
5.2	Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion.....	115
5.2.1	Sichten-Modell einer Investitionsbewertung	115
5.2.2	Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion.....	117
5.2.3	Merkmale von Investitionsobjekten.....	119
5.3	Vorgehensmodell der Systematik	121
5.3.1	Anwendungsspezifische Vorgehensmodelle	121

5.3.2	Beschreibung des Vorgehensmodells	122
5.4	Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts	124
5.4.1	Steckbrief zur Beschreibung der technischen Lösung	124
5.4.2	Datenlandkarte	126
5.4.3	Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion.....	130
5.5	Hilfsmittel für eine transparente Bewertung des Investitionsobjekts ...	133
5.5.1	Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion	133
5.5.2	Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion...	134
5.5.3	Kostenkatalog für Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion	136
5.5.4	Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion	137
5.5.5	Sammlung an Berechnungsmethoden	142
5.6	Werkzeugunterstützung.....	146
5.6.1	Struktur der Werkzeugunterstützung	146
5.6.2	Umsetzung	147
6	Anwendung der Systematik.....	149
6.1	Anwendungsbeispiel 1: Bewertung von Tablets in der Produktion	149
6.1.1	Phase 1: Systemische Beschreibung des Investitionsobjekts .	150
6.1.2	Phase 2: Transparente Bewertung des Investitionsobjekts	155
6.1.3	Phase 3: Ableitung von Handlungsempfehlungen	164
6.2	Anwendungsbeispiel 2: Bewertung eines Fertigungsleitstands	167
6.3	Bewertung der Arbeit an den Anforderungen	172
7	Zusammenfassung, Reflexion und Ausblick	177
8	Abkürzungsverzeichnis	181
9	Literaturverzeichnis	183

Anhang

A1	Ergänzungen zur Problemanalyse.....	A-1
A2	Ergänzungen zum Stand der Technik	A-3
A2.1	Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices.....	A-3
A2.2	Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen	A-5
A2.3	Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase	A-6
A2.4	Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie.....	A-8
A2.5	Modularer Lebenszykluskosten-Baukasten.....	A-9
A2.6	Leitfaden Investitionskonzepte	A-10
A2.7	Constructive Cost Model	A-11
A2.8	Netzplantechnik.....	A-13
A2.9	Ansatz zur Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen ...	A-14
A3	Ergänzungen zur Systematik.....	A-17
A3.1	Beispielhafte Anwendungen des Referenzmodells einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion	A-17
A3.2	Anwendung der Merkmale von Investitionsobjekten	A-19
A3.3	Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion	A-21
A3.4	Vollständiger Kostenkatalog.....	A-23
A3.5	Workshopkarte für Annahmen und Rahmenbedingungen	A-27
A3.6	Steckbriefe zu Berechnungsmethoden	A-27

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand im Rahmen anwendungsorientierter Forschung in der Fachgruppe Strategische Produktplanung und Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut sowie in dem Forschungsbereich Produktentstehung am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn. Gegenstand waren zahlreiche Forschungs- und Industrieprojekte u.a. im Bereich von Industrie 4.0 und der Gestaltung der digitalen Transformation. Zentrale Fragestellung war dabei stets die Bestimmung des Nutzens von Industrie 4.0 Anwendungen.

Das Ziel dieser Arbeiten war ein Ansatz zur Bewertung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in einer bestehenden Produktion. Um den Nutzen und die Kosten entsprechender Investitionen bewerten zu können, ist eine systemische Betrachtung und eine interdisziplinäre Herangehensweise vonnöten. Die beschriebene Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion ermöglicht dies.

1.1 Problematik

Produzierende Unternehmen sind heute mehr denn je globaler Konkurrenz ausgesetzt [BKK11, S. 1]. Einher geht die Entwicklung, dass sich Unternehmen zunehmend gezwungen sehen, immer mehr Varianten ihrer Produkte zu entwickeln, um den Anforderungen der Kunden gerecht zu werden. Daraus etablierte sich u.a. der Begriff der kundenindividuellen Massenproduktion [WRN14, S. 105f.]. Insbesondere stehen kleine und mittlere Unternehmen heute vor der Herausforderung sowohl Hightech- als auch Midtechprodukte zu entwickeln, um zukunftssträchtige Marktchancen zu erschließen und die aktuelle finanzielle Situation zu sichern [ES16, S. 36]. Diese Entwicklung macht es für Unternehmen kontinuierlich schwieriger, profitabel am Markt zu agieren. Um erfolgreich zu wirtschaften, müssen Unternehmen bei konkurrenzfähigen Preisen flexibel auf Kundenwünsche reagieren. Hinzu kommt, dass der moderne Fabrikbetrieb von immer mehr und spezialisierteren Maschinen geprägt ist. Eine hohe Komplexität im Produktionssystem und ein hoher Kapitaleinsatz sind das Resultat. Dies erhöht die Unsicherheit von Investitionen und stellt u.a. eine Herausforderung für die Liquiditätsplanung dar [Buc09, S. 102], [LB15, S. 457].

Den steigenden Anforderungen versuchen Unternehmen heute mit einem zunehmenden Einsatz an Informationstechnik zu entgegnen. Zentrale Schlagworte sind die Smart Factory und der Einsatz von Cyber-Physical Systems (CPS). Sie stehen repräsentativ für das angestrebte Ziel der Digitalisierung der Produktion bzw. von Industrie 4.0 [KM13, S. 31]. Nach KAGERMANN ET AL. entstehen *durch Industrie 4.0 [...] neue Formen der Wertschöpfung* [BDD+13, S. 5]. Dabei meint Industrie 4.0 *die technische Integration von CPS in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen* [BDD+13, S. 18].

Im Rahmen von Industrie 4.0 wurden bereits zahlreiche technische Lösungen entwickelt. Nicht nur Lösungen zur Automatisierung der Produktion wurden entwickelt, sondern auch zahlreiche Lösungen zur Unterstützung des Menschen, welche sich auch für kleine und mittlere Unternehmen eignen [AS16, S. 6]. In diesem Zusammenhang wird von sozio-technischen Systemen gesprochen [BDD+13, S. 14]. Sie zeichnen sich durch eine zunehmende Interoperabilität aus, was zu einer Vernetzung der Produktion führt [DGK+15, S. 8]. Ziele sind bspw. die Befähigung der Mitarbeiter und eine dezentrale Steuerung der Produktion zur Steigerung der Produktivität und der Flexibilität sowie die Beherrschung der steigenden Komplexität [BK13, S. 3f.], [BÖ15, S. 2f.]. Diesen Lösungen bzw. Industrie 4.0 Anwendungen wird u.a. ein großes Potential zur Kosteneinsparung, Erhöhung der Reproduzierbarkeit und der Flexibilität sowie die Steigerung der Transparenz zugesprochen [WWB15, S. 38]. REIF postuliert für die Logistik, dass das magische Dreieck, bestehend aus Zeit, Kosten und Qualität, um den Faktor Flexibilität zu einem Quadrat erweitert werden muss [Rei09, S. 11]. Nach GOTTMAN sind darüber hinaus die Faktoren Reaktionsschnelligkeit, Wirtschaftlichkeit und Innovation zu ergänzen [Got16, S. 147].

Um die Potentiale zu erschließen, sind Investitionen in entsprechende Industrie 4.0 Anwendungen erforderlich. Entscheidend wird dabei sein, die Wirtschaftlichkeit der geplanten Investitionen frühzeitig bestimmen zu können [SSR15, S. 466], [GSM+15, S. 104]. Die Menge der neuen technischen Lösungen erschwert jedoch eine sinnvolle Priorisierung und anschließende Auswahl optimaler Einsatzmöglichkeiten. Unternehmen sind zurückhaltend, da sie das technische und wirtschaftliche Potential der Industrie 4.0 Anwendungen nicht einschätzen können [WWB15, S. 7f.]. Nach HENKE verhält sich insbesondere der Mittelstand noch reserviert gegenüber dem Thema Industrie 4.0 [Hen15, S. 8].

Idealerweise spiegeln sich Kosten und Nutzen bzw. Potentiale einer neuen Technologie in einem Business Case bzw. einer Investitionsbewertung wider. Entsprechend dem 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung nach GAUSEMEIER ET AL. sind vor einer Investition in ein System eine Vorausschau, eine Strategie- und eine Prozessentwicklung durchzuführen [GP14, S. 38]. Dieser Ansatz wird insbesondere von vielen kleinen und mittleren Unternehmen nicht verfolgt. So sind heute viele Investitionsentscheidungen technologiegetrieben. Es wird eine konkrete Lösung betrachtet und diese ohne eine vorab definierte Strategie bewertet [DG18, S. 9].

Diese aufgezeigte Problematik spiegelt sich in zahlreichen Studien zu den Einführungshemmnissen von Industrie 4.0 wider. Als zentrale Hemmnisse wurden der unklare wirtschaftliche Nutzen und ein zu hoher Investitionsbedarf identifiziert [BKV16], [GBW+16, S. 62ff.], [KKG+14]. Dabei besteht insbesondere bei *kleinen und mittleren Unternehmen [...] noch Nachholbedarf* [GBW+16, S. 5], [Mau17, S. 35]. Hinzu kommt, dass eine Auseinandersetzung mit den neuen Technologien und deren Nutzen für viele Unternehmen zu zeitaufwändig ist [GBW+16, S. 62ff.]. Heutige Methoden zur Entscheidungsfindung adressieren die Herausforderungen einer Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Anwendungen nicht. Somit bleiben viele Entscheidungen über Investitionen

in der Produktion intransparent und werden ggf. zurückgehalten. Es fehlt ein systematischer Ansatz zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in einem bestehenden Produktionssystem, welcher auch den Anforderungen von kleinen und mittleren Unternehmen gerecht wird.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Anwender¹ sollen unterstützt werden, den potentiellen Einsatz einer konkreten technischen Lösung in einem bestehenden Produktionssystem zu bewerten. Um den Nutzen und die Kosten einer entsprechenden Investition bewerten zu können, sind eine systemische Betrachtung und eine interdisziplinäre Herangehensweise vonnöten. Zum einen erfordert dies die Verständigung zahlreicher Stakeholder mit verschiedensten fachlichen Hintergründen über die Potentiale, Anwendungen und Restriktionen der möglichen Investition. Zum anderen verlangt dies eine fachbereichsübergreifende Betrachtung der technischen Lösung, der Einsatzmöglichkeiten und Voraussetzungen sowie deren Einbindung in das bestehende sozio-technische System der Produktion. In diesem Zuge sind u.a. auch zukünftige Potentiale der Investition zu berücksichtigen. Es gilt stets die Erweiterbarkeit von einer Industrie 4.0 Anwendung zu berücksichtigen.

Eine Investitionsrechnung dient als Entscheidungsmodell. Wichtig ist, dass das Ergebnis nur so gut wie die eingesetzten Daten ist. Das Entscheidungsmodell an sich erzeugt keinen eigenen, physischen Nutzen. Nichtsdestotrotz fallen zu dessen Erstellung Aufwände für die Spezifikation der Industrie 4.0 Anwendung und der Datenbeschaffung an. Es gilt eine valide Entscheidungsgrundlage für eine mögliche Investition unter vertretbarem Aufwand herbeizuführen. Die Systematik soll somit Transparenz über die Bewertung einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in einer bestehenden Produktion schaffen.

1.3 Aufbau dieser Arbeit

Kapitel 2 beschreibt das Forschungsdesign dieser Arbeit. In diesem Zuge wird Design Research und das Vorgehen im Design Research erläutert. Weiterhin wird das Vorgehen zur Entwicklung der Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion beschrieben.

In **Kapitel 3** werden die beschriebene Problematik analysiert und Anforderungen an die Systematik erarbeitet. Nach einer Begriffsdefinition und -abgrenzung werden die steigenden Anforderungen an Produktionssysteme und die Reaktionen bzw. Gegenmaßnahmen

¹ Die Inhalte der vorliegenden Arbeit beziehen sich in gleichem Maße auf alle Geschlechter. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird jedoch die männliche Form für alle Personenbezeichnungen gewählt. Die weiteren Formen werden dabei stets mitgedacht.

im Rahmen von Industrie 4.0 beschrieben. Es wird erläutert wie Unternehmen die Einführung von Industrie 4.0 Anwendungen strukturiert angehen können. Dafür wird u.a. das 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung nach GAUSEMEIER ET AL. aufgezeigt. Soll eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion eingeführt werden, ist i.d.R. eine Investition notwendig. So wird weiterhin auf Investitionsentscheidungen eingegangen. Nach einer Strukturierung des Themas werden die Herausforderungen dabei analysiert. Abschließend werden die Handlungsfelder dieser Arbeit in einer Problemabgrenzung zusammengefasst und die Anforderungen an die Systematik abgeleitet.

Kapitel 4 gibt einen Überblick über den relevanten Stand der Technik. Hier werden zunächst Ansätze der Investitionsrechnung beschrieben. Weiterhin werden domänenspezifische² Bewertungsansätze sowie Ansätze zur Systemanalyse und -bewertung aufgezeigt. Gleichmaßen werden Kennzahlensysteme, Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse bzw. -exploration sowie Methoden der Entscheidungsunterstützung hinsichtlich ihrer Eignung zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion analysiert. Abschließend wird anhand der in Kapitel 3 ermittelten Anforderungen der Stand der Technik bewertet und der Handlungsbedarf abgeleitet.

In **Kapitel 5** wird die entwickelte Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion ausführlich vorgestellt. In diesem Rahmen werden die fünf Bestandteile der Systematik beschrieben: Eine Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion, ein Vorgehensmodell mit anwendungsspezifischen Ausprägungen, Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts, Hilfsmittel für eine transparente Bewertung des Investitionsobjekts sowie eine Werkzeugunterstützung.

Kapitel 6 beschreibt die Anwendung der Systematik. Diese geschieht anhand von zwei konkreten Anwendungsbeispielen.

In **Kapitel 7** werden die zentralen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst. Weiterhin wird eine wissenschaftliche Reflexion und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten aufgezeigt.

Der **Anhang** umfasst ergänzende Informationen zu der Problemanalyse, dem Stand der Technik und der erarbeiteten Systematik.

² Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Disziplin und Domäne als synonyme genutzt.

2 Forschungsdesign

In diesem Kapitel wird das Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit erläutert. Es soll aufzeigen, wie die Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion entwickelt wurde. Da sich die vorliegende Arbeit in das Forschungsfeld Design Research einordnet, wird dies in Kapitel 2.1 erläutert. Anschließend beschreibt Kapitel 2.2 Ansätze des Design Research. Kapitel 2.3 geht auf die Einordnung in das Design Research sowie auf das Vorgehen in dieser Arbeit ein.

2.1 Design Research

Im Folgenden wird auf die Forschungsdomäne Design Research eingegangen. Kapitel 2.1.1 erklärt die Bedeutung von Design Research. Anschließend werden in Kapitel 2.1.2 die Herausforderungen von Design Research und in Kapitel 2.1.3 Ansätze zur Adressierung der Design Research Herausforderungen beschrieben.

2.1.1 Bedeutung von Design Research

Die Produktentstehung wird im Zuge von Industrie 4.0 zunehmend interdisziplinärer und komplexer [SD16, S. 4]. Kreative Problemlösungen sind in diesem Kontext unabdingbar. Entsprechende Problemlösungen sind essenzieller Bestandteil von Design [HCD08, S. 160]. **Design** umfasst nach BLESSING ET AL. alle Aktivitäten, um ein Produkt zu generieren. Die Grundlage dafür ist ein Bedarf, eine Produktidee oder eine Technologie. Das Produkt hat die Bedürfnisse eines Benutzers oder einer Interessensgruppe zu erfüllen [BC09, S. 1ff.]. EAMES beschreibt Design als einen Plan, um Elemente so anzuordnen, dass sie einen Zweck bestmöglich erfüllen. Eine zentrale Herausforderung ist dabei, dass gutes Design recht einfach erkannt werden kann, es jedoch nur sehr schwierig zu beschreiben ist. Design erfordert nicht nur Wissen über die Ziele der Stakeholder und das Produkt, sondern auch Wissen über dessen Lebenszyklus und über den Prozess des Designs, d.h. wie dabei effektiv und effizient vorgegangen werden kann. Dies impliziert, dass Designer für die Gestaltung auf das Wissen, die Methoden und die Werkzeuge aus unterschiedlichen Bereichen wie z.B. der Ingenieurwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften und Psychologie zurückgreifen [BC09, S. 1ff.].

Design Research (oder auch Design Science und Design Science Research) ist die Generierung von Wissen über Design und für Design [Hor01, S. 13]. Das Wissen und Verständnis für ein Designproblem und dessen Lösung wird dabei durch die Entwicklung und die Anwendung eines Artefakts erworben [HC10, S. 5]. Design Research hat zwei wesentliche Ziele. Das erste Ziel ist die Formulierung und Validierung von Modellen und Theorien über das Phänom Design. Das zweite Ziel ist die Entwicklung und Validierung von Ansätzen, die auf diesen Modellen und Theorien basieren, um die Designpraxis und deren Ergebnisse zu verbessern [BC09, S. 4f.].

Im Zuge dieser Arbeit entspricht Design der Anwendung der Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Design Research ist die Entwicklung der Systematik.

Forschungsbeiträge im Kontext des Design Research lassen sich in einem Portfolio mit den Dimensionen *Reife der Lösung* und *Reife der Anwendungsdomäne* strukturieren. Es ergeben sich vier Arten von Forschungsbeiträgen: Routine-Design, Zweckentfremdung, Verbesserung und Erfindung [GH13, S. 345]. Bild 2-1 zeigt das Portfolio zur Strukturierung der Forschungsbeiträge.

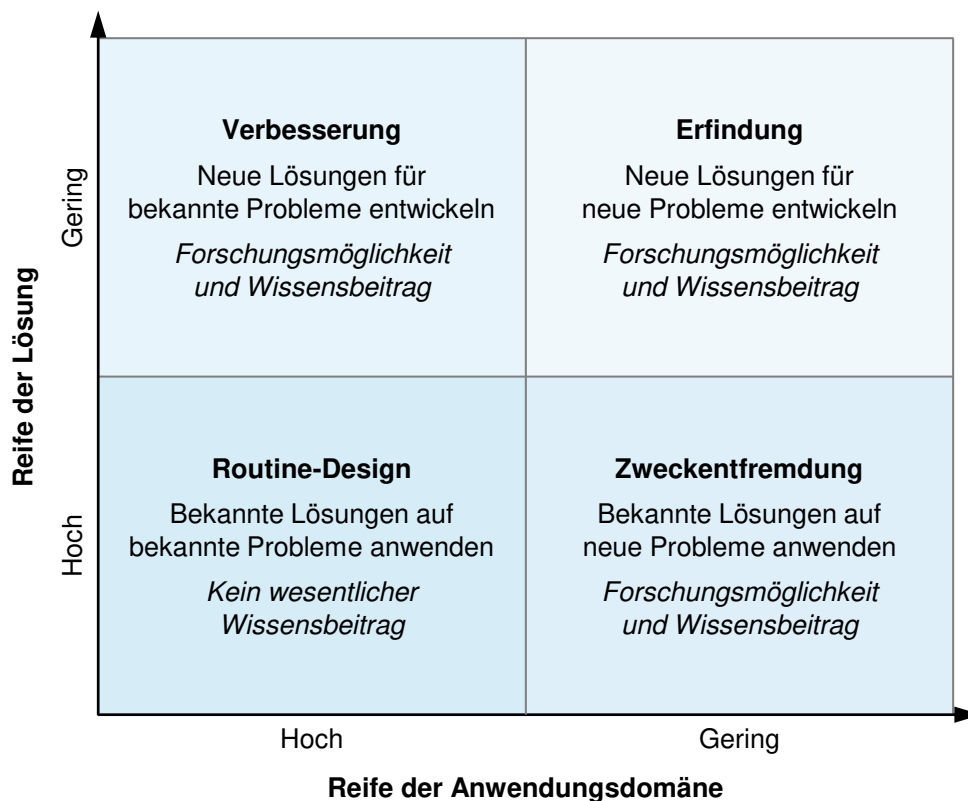


Bild 2-1: Klassifikation von Forschungsbeiträgen nach [GH13, S. 345]

Die Reife der Lösung besagt, wie bekannt die Lösung für ein Problem ist. Die Reife der Anwendungsdomäne bedeutet, wie bekannt das Problem ist. Bei Route-Design werden bekannte Lösungen auf bekannte Probleme angewendet. Es findet somit kein wesentlicher Wissensbeitrag statt. Zweckentfremdung ist die Anwendung von bekannten Lösungen auf neue Probleme, während Verbesserung die Entwicklung neuer Lösungen für bekannte Probleme ist. Werden neue Lösungen für neue Probleme entwickelt, wird dies als Erfindung bezeichnet [GH13, S. 345f.].

Unabhängig von der Art des Forschungsbeitrags lassen sich Qualitätskriterien für wissenschaftliche Arbeiten definieren. Die Qualität einer wissenschaftlichen Arbeit setzt sich aus Relevanz, Objektivität, Prägnanz, formale Korrektheit, Darstellung und Einordnung des aktuellen Wissensstands, Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit zusammen [Hee14, S. 15]. Den Wert der Forschungsbeiträge gliedern GREGOR ET AL. in drei Level.

Das geringste Level eins ist eine praktische Umsetzung eines Design Artefakts. Das sind Instanzen bzw. Anwendungen von Methoden oder Modellen. Es handelt sich bspw. um konkrete Software Produkte oder umgesetzte Design Prozesse. Level zwei ist die Entwicklung von Funktionsprinzipien oder Architekturen. Beispielhafte Resultate des Forschungsbeitrags sind Methoden, Modelle oder Designrichtlinien. Bei Level drei Forschungsbeiträgen handelt es sich um ausgereifte Designtheorien über grundlegende Phänomene [GH13, S. 342]. Je höher das Level, desto abstrakter, vollständiger und ausgereifter ist das erzeugte Wissen [GH13, S. 342].

2.1.2 Herausforderungen von Design Research

In der Forschungsdomäne Design Research bzw. in der Forschungsgemeinschaft existieren drei zentrale Herausforderungen. Die erste Herausforderung ist ein **fehlender Überblick über die Forschungslandschaft**. Ein Grund dafür ist, dass die Anzahl an Forschungsbeiträgen in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Dies macht es nahezu unmöglich einen Überblick über die Forschungslandschaft zu behalten. Daraus resultieren z.B. eine fehlende Einigkeit über zentrale Begriffe sowie eine fehlende Verifikation und Validierung von Ansätzen in der Forschungsgemeinschaft [BC09, S. 6].

Die zweite Herausforderung ist eine **mangelnde Ergebnisverwertung in der Praxis**. Viele wissenschaftliche Ansätze werden veröffentlicht, jedoch nicht in der Praxis angewendet. UPTON ET AL. führen dies darauf zurück, dass die Wissenschaft nicht die Bedarfe der Praxis trifft. Darüber hinaus herrsche ein fehlendes Verständnis der Wissenschaftler über die industrielle Praxis [BC09, S. 7f.], [UY01].

Die dritte Herausforderung ist eine **mangelnde wissenschaftliche Sorgfalt**. Da die Forschungslandschaft sehr zersplittert ist, ist die Güte einer Arbeit nur sehr schwierig zu prüfen. Auch werden bspw. wissenschaftliche Vorgehensweisen angewendet, die sich nicht für das Forschungsvorhaben eignen [BC09, S. 8].

2.1.3 Ansätze zur Adressierung der Design Research Herausforderungen

HEVNER adressiert die angesprochenen Herausforderungen des Design Research mit dem Modell der Design Research Zyklen. Es ist ein Modell für das Verständnis, die Durchführung und die Auswertung von Design Research Projekten [Hev07, S. 88], [HMP+04, S. 79f.]. Dargestellt ist das Modell in Bild 2-2.

Das Umfeld definiert den Problembereich eines Forschungsbeitrags. Im Design Research sind dies Mensch, Organisation und Technik. Diese umfassen wiederum Ziele, Aufgaben, Probleme und Potentiale. Der Problembereich stellt die Anforderungen an die Forschung und kann in Form von Feldversuchen weiter analysiert werden. Dies wird als **Relevanz-Zyklus** bezeichnet. Die Erarbeitung des Forschungsbeitrags wird als **Design-Zyklus** bezeichnet. Dieser iteriert zwischen der Erstellung der Design Artefakte und der Prozesse

sowie der Evaluation dieser. Der **Strenge-Zyklus** verbindet die gestaltungswissenschaftlichen Aktivitäten mit der Wissensbasis. Sie stellt die Grundlagen in Form von wissenschaftlichen Theorien, Methoden, Erfahrungen und Fachwissen bereit. Die Wissensbasis wird durch den Forschungsbeitrag um Artefakte ergänzt. Nach HEVNER müssen die drei Zyklen stets in einem designwissenschaftlichen Forschungsprojekt vorhanden und klar identifizierbar sein [Hev07, S. 88ff.]. Darüber hinaus werden sieben Richtlinien an eine Design Research Arbeit formuliert. Exemplarische Richtlinien sind, dass Design Research Arbeiten stets relevante Geschäftsprobleme adressieren und konkrete Design Artefakte produzieren sollen [HMP+04, S. 82ff.].

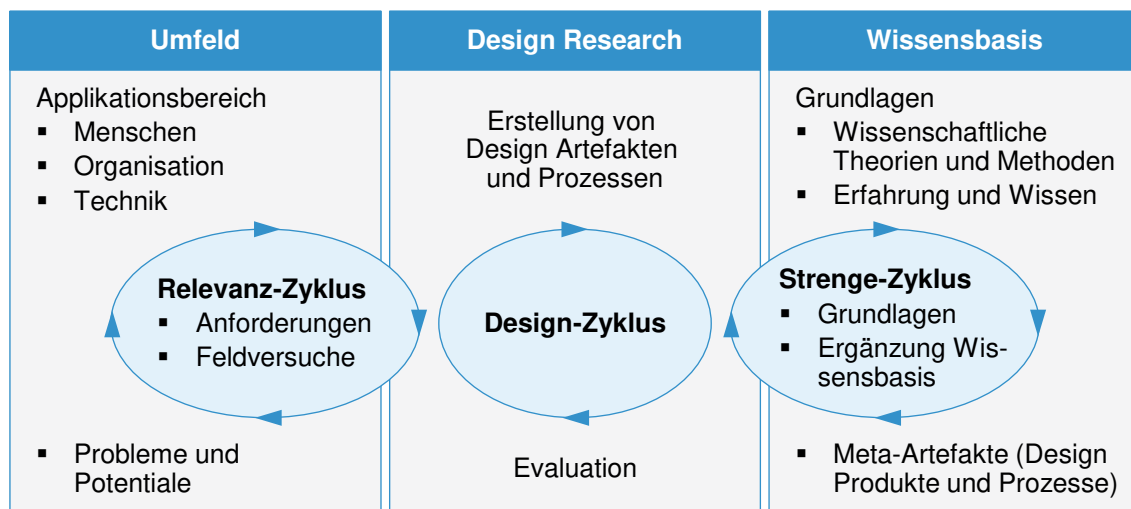


Bild 2-2: Design Research Zyklen nach [Hev07, S. 88]

Sowohl die Design Research Zyklen als auch die Richtlinien stellen kein explizites Vorgehen zur Durchführung von Design Forschungsprojekten dar [HC10, S. 16]. Um die Herausforderungen des Design Research zu adressieren, ist nach BLESSING ET AL. eine Design Research Methodik notwendig [BC09, S. 9f.]. Bild 2-3 zeigt die Abgrenzung zwischen Design, Design Research und Design Research Methodik mit Bezug auf die vorliegende Arbeit.

Eine Design Research Methodik bzw. ein Forschungsdesignansatz soll ein Verständnis und eine Unterstützung bei der Verbesserung von Design Research liefern. Dies geschieht, indem die Methodik Methoden und Richtlinien definiert, wie Design Research durchzuführen ist. Zum einen soll die Formulierung und Validierung des Phänomens unterstützt werden. Das entspricht dem Problemverständnis bzw. der -analyse. Zum anderen sollen die Entwicklung und die Validierung der Design Artefakte und Prozesse unterstützt werden. D.h. es soll die Problemlösung unterstützt werden [BC09, S. 9f.].

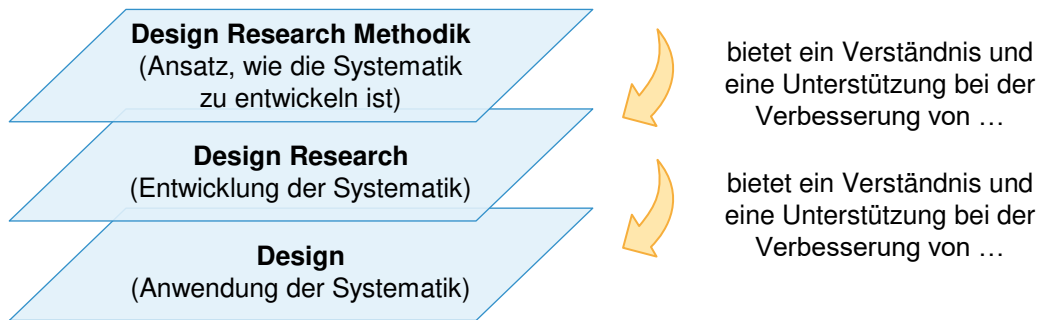


Bild 2-3: Abgrenzung von Design, Design Research und Design Research Methodik nach [BC09, S. 10] mit Bezug auf die vorliegende Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit beschreibt die Design Research Methodik wie die Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion zu entwickeln ist. Der Design Research ist die Entwicklung der Systematik. Das Design entspricht der Anwendung der Systematik in der Praxis [BC09, S. 9f.].

2.2 Ansätze des Design Research

Das vorherige Kapitel 2.1 hat den Bedarf nach einem Forschungsdesignansatz aufgezeigt. Im folgenden Kapitel 2.2.1 werden verschiedene Forschungsdesignansätze gegenübergestellt. In Kapitel 2.2.2 wird die Design Research Methodology als ein Ansatz im Detail erklärt. Die vorliegende Arbeit orientiert sich maßgeblich an der Design Research Methodology.

2.2.1 Vergleich von Forschungsdesignansätzen

In der Literatur gibt es zahlreiche Forschungsdesignansätze. Das liegt nicht zuletzt daran, dass Design Research an diverse Forschungsdisziplinen angrenzt. PEFFERS ET AL. haben die Ansätze aus der (Wirtschafts-)Informatik analysiert und miteinander verglichen. Aus dem Ergebnis leiteten sie eine eigene Design Research Methodik ab. Tabelle 2-1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Vergleich der Forschungsdesignansätze nach [PTG+06].

Auch wenn die Ansätze für unterschiedliche Zwecke entwickelt wurden, lassen sich viele Gemeinsamkeiten in den Vorgehensschritten identifizieren. Alle Ansätze beginnen bspw. mit einer Problemidentifikation und Motivation für ein Thema. Ein weiterer Dreh- und Angelpunkt sind der Entwurf und die Entwicklung sowie die Evaluation, welche in allen Ansätzen der Literatur beschrieben werden. Die weiteren Vorgehensschritte variieren in unterschiedlichen Maßen zwischen den Ansätzen. Aus dem Vergleich schlagen PEFFERS ET AL. ein Vorgehen mit den folgenden sechs Phasen ab: Problemidentifikation und Motivation, Definition der Ziele, Entwurf und Entwicklung, Demonstration, Evaluation und Kommunikation [PTG+06, S. 89f.].

Tabelle 2-1: Ausschnitt aus dem Vergleich der Forschungsdesignansätze aus der (Wirtschafts-)Informatik nach [PTG+06, S. 91]

	Vorgehen im Forschungsdesign					
	Problem-ident. und Motivation	Definition der Ziele	Entwurf und Entwicklung	Demonstration	Evaluation	Kommunikation
TAKEDA ET AL., 1990	Problem-erfassung		Ideenent-wicklung		Bestäti-gung, Bewertung	
ECEKELS ET AL., 1991	Analyse	Anforde-rungen	Synthese, vorläufige Design-vorschläge	Simulation, bedingte Vorhersage	Evaluation, endgültiges Design	
ROSSI ET AL., 2003	Bedarfs-identifika-tion		Entwick-lung		Evaluation	
HEVNER ET AL., 2004	Wichtige und rele-vante Probleme	<i>implizit im vorherigen Schritt</i>	iterativer Such-prozess, Artefakt		Evaluation	Kommuni-kation

Einen ähnlichen Vergleich von Forschungsdesignansätzen aus der Psychologie präsentieren HOWARD ET AL. Die Phasen der analysierten Forschungsdesignansätze zeigen Ähnlichkeiten auf, sodass sie sich unter den vier Phasen Analyse, Erstellung, Bewertung und Kommunikation/ Implementierung zusammenfassen lassen [HCD08, S. 164ff.]. Vergleichbare Ansätze gibt es in vielen Forschungsdomänen. GERICKE ET AL. stellen die Arbeiten aus den verschiedenen Forschungsdomänen gegenüber. Auch hier zeigen sich viele Gemeinsamkeiten in den Vorgehen [GB12].

2.2.2 Design Research Methodology

Einen domänenübergreifenden Forschungsdesignansatz stellen BLESSING ET AL. mit der Design Research Methodology vor. Das Vorgehen umfasst die Phasen Klärung der Forschungsfrage, deskriptive Studie 1, präskriptive Studie und deskriptive Studie 2. Dargestellt ist das Vorgehen der Design Research Methodology in Bild 2-4.

Das Vorgehen beginnt mit der **Klärung der Forschungsfrage** in Phase 1. Es gilt Beweise oder zumindest Hinweise zu identifizieren, die das Forschungsziel unterstützen. Dies wird literaturbasiert durchgeführt. Auf dieser Basis wird eine erste Beschreibung der bestehenden sowie der gewünschten Situation mit den darunterliegenden Annahmen bzw. Rahmenbedingungen erarbeitet. Das Resultat der Phase ist die Zielsetzung des Forschungsvorhabens [BC09, S. 43ff.].

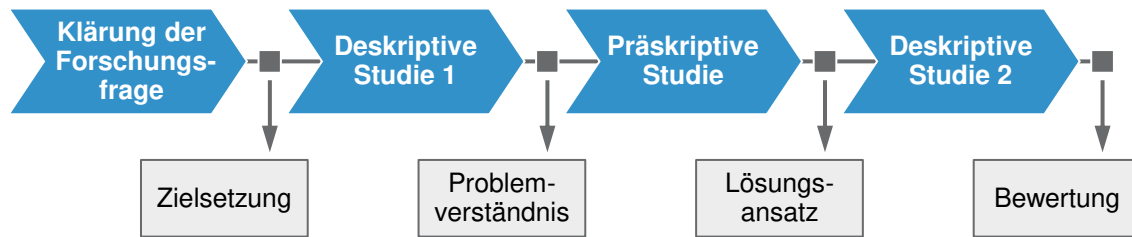


Bild 2-4: Vorgehen der Design Research Methodology nach [BC09, S. 15]

Phase 2 ist die Durchführung einer ersten **deskriptiven Studie**. Hier werden die Forschungsfrage bzw. das Problem im Detail analysiert. Es wird erarbeitet welcher Faktor bzw. welche Faktoren von zentraler Bedeutung sind, um die Aufgabenstellung bestmöglich zu lösen. Sofern es die Analyse des Problems bedarf, werden empirische Studien durchgeführt [BC09, S. 75ff.]. Zum Einsatz kommen diverse Methoden zur Datensammlung wie z.B. Beobachtungen, Dokumentensichtung, Fragebögen und Interviews [BC09, S. 239ff.]. Das Resultat der Phase ist das Problemverständnis [BC09, S. 75ff.].

Gegenstand der Phase 3 ist eine **präskriptive Studie**. Auf Grundlage des Problemverständnisses ist ein konkretes Zielbild zu entwerfen, welches aufzeigt, wie das Problem gelöst wird. Dabei sind mögliche Alternativen zu entwickeln. Bei der Entwicklung des Lösungsansatzes gilt es sich auf den Kern des Ansatzes zu fokussieren, um diesen und die zugrunde liegenden Annahmen frühzeitig evaluieren zu können [BC09, S. 141ff.]. Bei der Entwicklung kommen Methoden wie das Brainstorming oder morphologische Kästen zum Einsatz [BC09, S. 277ff.]. Das Resultat dieser Phase ist der Lösungsansatz [BC09, S. 141ff.].

Phase 4 ist eine zweite **deskriptive Studie**. In dieser Phase wird der Lösungsansatz evaluiert. Es sind zwei empirische Studien durchzuführen. Die erste Studie evaluiert die Anwendbarkeit des Lösungsansatzes. Die zweite Studie evaluiert die Nützlichkeit. Die Grundlage dafür sind die zuvor definierten Kriterien. Wie in der ersten deskriptiven Studie, kommen hier diverse Methoden zur Datensammlung wie z.B. Beobachtungen, Interviews und Simulationen zum Einsatz. Das Resultat der Phase ist die Bewertung [BC09, S. 239ff.], [HMP+04, S. 86].

Das vierphasige Vorgehen ist iterativ zu durchlaufen. Zum einen kann von einer Phase in die vorherige Phase zurückgegangen werden. Zum anderen kann nach Beendigung der vierten Phase in jede beliebige vorherige Phase zurückgegangen werden. Es werden sieben alternative Vorgehensweisen vorgeschlagen [BC09, S. 15ff.]. Die Vorgehensweisen des Forschungsdesign in der Design Research Methodology sind in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Ausprägungen des Forschungsdesign in der Design Research Methodology nach [BC09, S. 18]

		Vorgehen im Forschungsdesign			
		Klärung der Forschungsfrage	Deskriptive Studie 1	Präskriptive Studie	Deskriptive Studie 2
Vorgehensweisen des Forschungsdesign	1	Literaturbasiert	Umfassend	–	–
	2	Literaturbasiert	Umfassend	Initial	–
	3	Literaturbasiert	Literaturbasiert	Umfassend	Initial
	4	Literaturbasiert	Literaturbasiert	Literaturb. / Initial / Umfassend	Umfassend
	5	Literaturbasiert	Umfassend	Umfassend	Initial
	6	Literaturbasiert	Literaturbasiert	Umfassend	Umfassend
	7	Literaturbasiert	Umfassend	Umfassend	Umfassend

Literaturbasiert bedeutet, dass die Phase ausschließlich mit Hilfe der Analyse der Literatur durchgeführt wird. Umfassend bedeutet, dass sowohl eine Analyse der Literatur stattfindet als auch eigene Ergebnisse durch den Forscher produziert werden. Das können bspw. empirische Studien sowie die Entwicklung und Evaluation von Hilfsmitteln zur Analyse des Problems sein. Initial bedeutet, dass eine Studie nur so weit durchgeführt wird, bis die relevanten Konsequenzen aufgezeigt werden können [BC09, S. 18f.].

2.3 Einordnung und Vorgehen in dieser Arbeit

Die Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion ist eine komplexe Aufgabenstellung. Dies wird in der Problemanalyse (Kapitel 3) ausführlich erläutert. Die Aufgabe erfordert somit u.a. einen kreativen Problemlösungsprozess im Sinne des Designs. Design Research entspricht hier der Erarbeitung eines wissenschaftlichen Ansatzes zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Da sowohl die Problemstellung als auch die Lösung dieser Arbeit (d.h. die Systematik) neu sind, ist das Resultat nach GREGOR ET AL. einer Erfindung zuzuordnen. Dabei stellen einzelne Ansätze des Stands der Technik die Wissensbasis im Sinne einer Zweckentfremdung dar. Um die von BLESSING ET AL. angesprochenen Herausforderungen von Design Research zu adressieren und die von HEESSEN beschriebenen Qualitätskriterien für wissenschaftliche Arbeiten zu berücksichtigen, bedarf es der Anwendung einer Design Research Methode.

Die vorliegende Arbeit ist im Kern nach der Design Research Methodology entwickelt worden [BC09, S. 15]. Insbesondere bedingt die Komplexität des Themas, dass sich der literaturbasierte Ansatz zur Klärung der Forschungsfrage und zur Analyse des Problems eignet. Der vierphasige Prozess wurde dabei in Gänze für die Entwicklung der Systematik durchlaufen.

Im Rahmen der Systematik kommen diverse Hilfsmittel zum Einsatz. Für die Hilfsmittel wurde der Prozess jeweils zusätzlich durchlaufen. Dies erstreckte sich über die Phase 2 (deskriptive Studie 1) und die Phase 3 (präskriptive Studie) des Vorgehens zur Entwicklung der Systematik. Bild 2-5 zeigt das adaptierte Vorgehen.

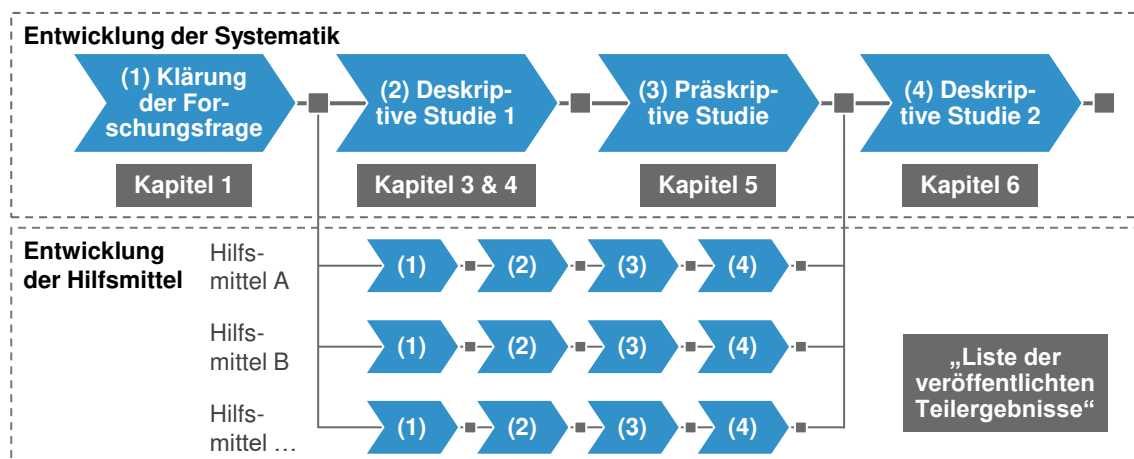


Bild 2-5: Adaptiertes Vorgehen der Design Research Methodology nach [BC09, S. 15] zur Entwicklung der Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion

Die **Klärung der Forschungsfrage dieser Arbeit** wurde maßgeblich literaturbasiert durchgeführt. Dazu wurden diverse, aktuelle Studien sowie Fachliteratur herangezogen. Darüber hinaus wurde die mögliche Forschungsfrage in laufenden Forschungs- und Industrieprojekten hinterfragt. Das Ergebnis ist in der Einleitung (Kapitel 1) dieser Arbeit beschrieben.

Das Ziel der **deskriptiven Studie 1** ist das Problemverständnis. In der vorliegenden Arbeit wird dazu in der Problemanalyse (Kapitel 3) die Forschungsfrage in drei Handlungsfelder heruntergebrochen. Es werden 10 Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik abgeleitet. Dies passierte maßgeblich literaturbasiert. Es werden diverse, aktuelle Studien sowie Fachliteratur herangezogen. Ein Element mit empirischem Forschungscharakter ist die Analyse von 280 Industrie 4.0 Anwendungsbeispielen in Kapitel 3.2.4.

Nachdem in der Problemanalyse der Bedarf einer Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion aufgezeigt wurde, wird anschließend der Stand der Technik (Kapitel 4) analysiert. Auf Grund des Umfangs ist es nicht möglich alle relevanten Ansätze aus dem Stand der Technik im Rahmen dieser Arbeit zu beschreiben.

So beschränkt sich die Beschreibung auf repräsentative Ansätze, welche die Aufgabenstellung möglichst gut adressieren und auf Ansätze, welche als mögliche Hilfsmittel in der Systematik eingesetzt werden können. Fazit der Analyse des Stands der Technik ist, dass keiner der untersuchten Ansätze und auch keine triviale Kombination der Ansätze alle Anforderungen in vollem Umfang erfüllt. Somit besteht Handlungsbedarf für die Entwicklung einer Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Die Entwicklung der Systematik erfolgt in der präskriptiven Studie in Phase 3. Die Erarbeitung der Problemanalyse und des Stands der Technik wurden iterativ umgesetzt.

Die **präskriptive Studie** wird im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 5 umgesetzt. Sie wird sowohl für die Entwicklung der Systematik an sich als auch für die Entwicklung der einzelnen Hilfsmittel durchgeführt.

Für die **deskriptive Studie 2** wird die Systematik mit allen seinen Hilfsmitteln in zwei Anwendungsbeispielen angewendet und erprobt. Entgegen dem Vorgehen bei den einzelnen Hilfsmitteln, wird hier auch das Zusammenspiel dieser evaluiert. Kapitel 6 dieser Arbeit zeigt das Resultat der Phase.

Parallel zu der Phase 2 (deskriptive Studie) und der Phase 3 (präskriptive Studie) wurden diverse Hilfsmittel für die Systematik entwickelt. Die Entwicklung und die Erprobung der Hilfsmittel geschahen in mehreren Projekten. Dabei wurden jeweils alle vier Phasen von der Klärung der Forschungsfrage bis zur deskriptiven Studie 2 durchlaufen. Dies wurde stets nach dem gleichen Schema durchgeführt. Die Forschungsfragen für die Hilfsmittel ergaben sich entweder aus der Forschungsfrage für die Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion oder stellten eigenständige Forschungsfragen im Rahmen von unterschiedlichen Projekten dar. Die Klärung der Forschungsfragen und die deskriptiven Studien 1 der Hilfsmittel erfolgten literaturbasiert. Auf dieser Basis wurden die präskriptiven Studien durchgeführt. Die Evaluation der Hilfsmittel in den deskriptiven Studien 2 erfolgte in Form von Case Studies in Industrie- und Forschungsprojekten. Die daraus resultierenden Veröffentlichungen sind in der „Liste der veröffentlichten Teilergebnisse“ aufgelistet.

3 Problemanalyse

Das Ziel dieses Kapitels sind Anforderungen an eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Den Ausgangspunkt bildet die in Kapitel 1 beschriebene Problematik. Sie wird in diesem Kapitel detailliert betrachtet und analysiert. In Kapitel 3.1 erfolgen zunächst Begriffsdefinitionen und -abgrenzungen. Kapitel 3.2 beschreibt die Produktion auf dem Weg zur Industrie 4.0. Es werden die steigenden Anforderungen an Produktionssysteme und die Reaktionen bzw. Gegenmaßnahmen im Rahmen von Industrie 4.0 beschrieben. Wie Industrie 4.0 Anwendungen systematisch eingeführt werden können, zeigt das 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung in Kapitel 3.3. In diesem Kontext wird Industrie 4.0 näher aus systemtheoretischer Sicht analysiert. Anschließend wird in Kapitel 3.4 auf Investitionsentscheidungen eingegangen. Dabei werden neben einer Strukturierung des Themas insbesondere die Herausforderungen bei Investitionsentscheidungen beschrieben. In Kapitel 3.5 werden eine Problemabgrenzung aufgezeigt und die Handlungsfelder dieser Arbeit zusammengefasst. Abschließend werden in Kapitel 3.6 die aus der Problemabgrenzung resultierenden Anforderungen an die Systematik erläutert.

3.1 Begriffsdefinitionen und -abgrenzungen

Im Folgenden werden Begriffe kurz erläutert, welche für das Verständnis dieser Arbeit von zentraler Bedeutung sind. In Kapitel 3.1.1 wird zunächst auf den Begriff *Systematik* eingegangen. Er gibt Aufschluss über die Bestandteile dieser Arbeit. Der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit sind Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Da sowohl die Industrie 4.0 Anwendungen als auch die umgebene Produktion jeweils als *Systeme* zu verstehen sind, wird der Systembegriff in Kapitel 3.1.2 erläutert. Zentrale Eigenschaften von Systemen sind die *interne Komplexität*, die *externe Komplexität* und die *Kompliziertheit*. Sie werden in Kapitel 3.1.3 definiert und voneinander abgegrenzt.

Um den Weg einer Produktion hin zu Industrie 4.0 zu erläutern, werden die Begriffe *Fertigung*, *Produktion* und *Produktionssystem* in Kapitel 3.1.4 sowie die Begriffe *Digitalisierung* und *Industrie 4.0* in Kapitel 3.1.5 analysiert. Kapitel 3.1.6 beschreibt *Cyber-Physical Systems* und *Industrie 4.0 Anwendungen* als Grundlage von Industrie 4.0. Für eine Bewertung dieser Systeme werden in Kapitel 3.1.7 zunächst die notwendigen *Begriffe des Rechnungswesens und der Statistik* und in Kapitel 3.1.8 die Begriffe *Bewertung*, *Investition* und *Wirtschaftlichkeit* erläutert.

3.1.1 Systematik

Gegenstand dieser Arbeit ist eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Der Begriff **Systematik** stellt im allgemeinen Sprachgebrauch

eine „*planmäßige, einheitliche Darstellung [bzw. eine] einheitliche Gestaltung nach bestimmten Ordnungsprinzipien*“ dar [Dud10]. Anwendung findet der Begriff in vielen wissenschaftlichen Disziplinen. Der vorwiegend aus der Biologie stammende Begriff beschreibt hier die „*Wissenschaft von der Vielfalt der Organismen und ihrer Erfassung in einem System*“ [Dud13b-ol]. Beispiele im Maschinenbau sind die Einteilung der Stähle [GS12, S. 12] oder eine Strukturierung von Maschinen- und Konstruktionselementen [BBJ+12, S. 131]. In der Statistik bezeichnet eine Systematik eine durchgängige Ordnung von Erhebungs- und Darstellungseinheiten, wenn die Ordnung nicht eindeutig vorgegeben ist [Gab18a-ol].

Im Kontext der Produktentwicklung wurde der Begriff erstmalig von BISCHOF und HANSEN genutzt. Eine Konstruktionssystematik ist demnach „*das planmäßige, wissenschaftliche Kombinieren der Einzelerkenntnisse der Technik zum Aufbau eines technischen Gebildes*“ [Han55, S. 36], [Hub76, S. 74]. Hierauf aufbauend definiert DUMITRESCU eine Entwicklungssystematik als:

„Ein universelles Rahmenwerk, das ein Vorgehensmodell sowie dedizierte Hilfsmittel zur erfolgreichen Umsetzung der Entwicklung technischer Systeme bereitstellt. Sie ermöglicht weder ein automatisiertes Entwickeln noch ist sie ein Ersatz für die kreative Leistung des Anwenders. Das Vorgehensmodell strukturiert den Entwicklungsprozess nach aufgabenspezifischen Gesichtspunkten. Hilfsmittel können bspw. Methoden, Richtlinien, Spezifikationstechniken/ Modellierungssprachen, Konstruktionsprinzipien, Entwurfsmuster oder Werkzeuge sein“ [Dum11, S. 6].

Diese Arbeit folgt der Definition von DUMITRESCU, angewendet auf den Kontext einer Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Eine Systematik wird somit als ein Rahmenwerk aus einem Vorgehensmodell und Hilfsmitteln zur Strukturierung und Lösung eines Problems betrachtet.

3.1.2 System

Das heutige Systemverständnis geht auf BERTALANFFY zurück [Ber49, S. 114ff.], [Ber69, S. 38]. Definiert ist ein System nach ERLENSPIEL folgendermaßen:

„Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Ein System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung (offenes System)“ [Ehr09, S. 19].

Dieser domänenunabhängige Systembegriff lässt sich sowohl auf komplexe technische Erzeugnisse als auch auf Produktionssysteme anwenden [HWF+12, S. 34ff.]. Eine Be-

schreibung von Erzeugnissen oder Produktionssystemen im Sinne der Systemtheorie erleichtert das Verständnis und den Umgang mit diesen [Sch05b, S. 32f.], [Lin07, S. 54], [VWB+09, S. 100ff.]. Dargestellt ist die Struktur eines Systems in Bild 3-1.

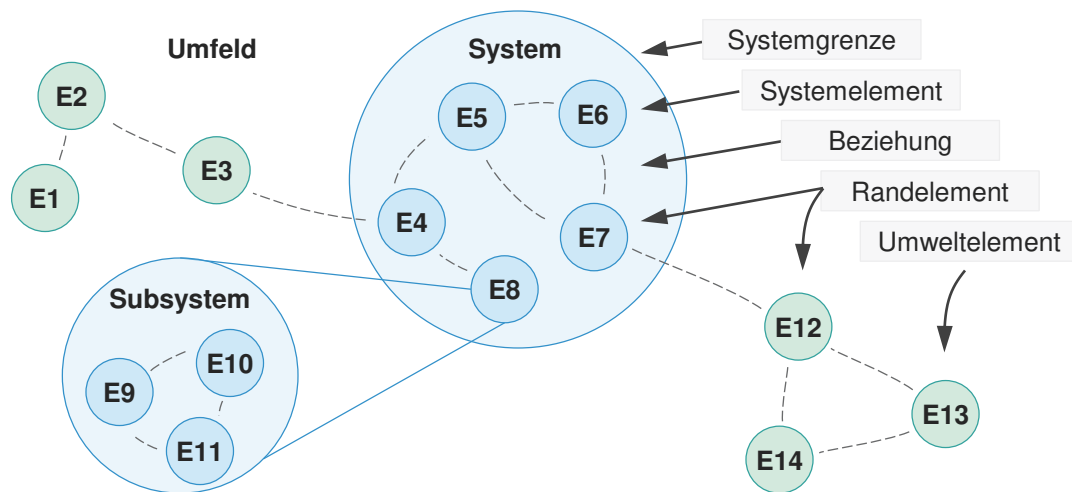


Bild 3-1: Struktur eines Systems nach [Sch18, S. 15] in Anlehnung an [HWF+15, S. 33f.] und [TBN+13, S. 44]

Systeme bestehen aus Systemelementen, welche miteinander in Beziehung stehen. Die Beziehungen können bspw. Stoff-, Energie- und Informationsflüsse sein. Ein System besitzt eine Systemgrenze und ist über Randelemente mit Umweltelementen verbunden. Die Systemgrenze beschreibt eine *mehr oder weniger willkürliche Abgrenzung zwischen dem System und seiner Umgebung bzw. dem Umfeld* [HBF+15, S. 35]. Die Beziehungen eines Systems mit den Elementen außerhalb seiner Systemgrenze stellen die Ein- und Ausgangsgrößen dar. Diese können das System sowohl positiv als auch negativ beeinflussen und vom System selber beeinflusst werden. Die Gesamtheit aller Reaktionen eines Systems wird als Verhalten bezeichnet [Ehr09, S. 19ff.], [HWF+15, S. 33f.], [PBF+07, S. 17], [Sch18, S. 15].

Ein Element ist ein System auf einer gewählten Abstraktionsebene. Elemente können somit wiederum als Systeme bzw. Subsysteme verstanden werden. Dieser Logik zur Folge lassen sich hierarchische Ordnungsbeziehungen bzw. Aggregationsbeziehungen ableiten. Die Struktur eines Systems bezeichnet die Gesamtheit aller Elemente und ihrer Beziehungen [HWF+15, S. 35f.], [Mül90, S. 58].

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Industrie 4.0 Anwendung als ein System innerhalb des übergeordneten Systems Produktion betrachtet. Dies dient sowohl der Beschreibung des Investitionsobjekts mit seinen Funktionen und Anwendungen als auch einer eindeutigen Abgrenzung des Investitionsobjekts.

3.1.3 Interne Komplexität, externe Komplexität und Kompliziertheit

In der Literatur werden unterschiedliche Arten von Komplexität aufgezeigt, welchen Unternehmen begegnen. Diese setzen die Marktanforderungen und die unternehmensinternen Anforderungen in einen Kontext. Sie werden im Folgenden beschrieben. Weiterhin wird auf die Unterscheidung zwischen Komplexität und Kompliziertheit eingegangen.

Interne und externe Komplexität

SCHUH ET AL. unterscheiden zwischen einer externen und einer internen Komplexität [SR17, S. 17]. Dargestellt sind die zwei Arten von Komplexität in Bild 3-2.

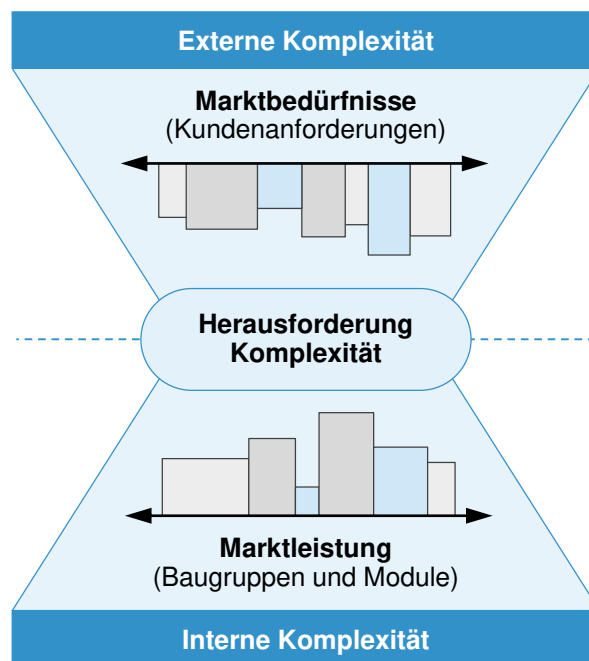


Bild 3-2: Arten von Komplexität und die resultierenden Herausforderungen für Unternehmen nach [SR17, S. 17]

Die **externe Komplexität** umfasst die Merkmale und Ausprägungen, die zur Beschreibung der [...] angebotenen Leistungsbiindel notwendig sind. Somit stellt die externe Komplexität ein Abbild der Kundenbedürfnisse bzw. Kundenanforderungen dar [SR17, S. 16].

Demgegenüber steht die **interne Komplexität**. Die interne Komplexität ist u.a. gekennzeichnet durch die Vielfalt und Vielzahl an Teilen, Komponenten und Schnittstellen, die zur Erstellung der Erzeugnisse notwendig sind. Die Kombination dieser Elemente ergibt die angebotene Marktleistung, welche bestmöglich den Marktbedürfnissen entsprechen soll [SR17, S. 16].

Die Betrachtung der Komplexität lässt sich neben den Produkten auch auf die weiteren wertschöpfenden Tätigkeiten eines Unternehmens beziehen. Komplexitätsmanagement

ist somit als eine ganzheitliche Managementaufgabe zu verstehen [SR17, S. 17f.]. Entscheidend dabei ist, dass ein Optimum an interner und externer Komplexität *nicht zwingend in einer geringen [...] Komplexität* liegt [SR17, S. 36]. Vielmehr gilt es die vom Markt erforderte externe Komplexität wirtschaftlich und mit einer adäquaten internen Komplexität abzubilden [SR17, S. 36].

Ein Aspekt der internen Komplexität im Rahmen der Fertigung zeigt WIENDAHL in Form des Polylemmas der Fertigungssteuerung auf [Wie14, S. 266]. Dabei werden die Verläufe von Leistung, Durchlaufzeit, Kosten und Termintreue in einem Diagramm aufgetragen. Die erklärende Variable ist der Bestand. Jeder Verlauf besitzt ein individuelles Optimum. Da die Verläufe qualitativer Natur und sehr unternehmensspezifisch sind, lässt sich kein generelles, ganzheitliches Optimum ableiten [Wie14, S. 266]. Die Ursache für diesen Zielkonflikt lässt sich anhand der Definition von Komplexität in Abgrenzung zur Kompliziertheit verdeutlichen. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit ermöglicht die Unterscheidung zwischen interner und externer Komplexität die Analyse von Ursachen und Wirkungen von Herausforderungen im Rahmen der Produktion. Es zeigt welche Aspekte aus Sicht eines Unternehmens beeinflussbar sind und welche nicht. Bspw. lassen sich steigende Kundenbedürfnisse von einem Unternehmen nicht direkt beeinflussen. Dementgegen ist die durch eine Vielzahl an verschiedenen Prozessabläufen entstehende Komplexität in der Produktion durch ein Unternehmen häufig vermeid- bzw. reduzierbar.

Unterscheidung von Komplexität und Kompliziertheit

Eine weitere Sichtweise auf das Thema Komplexität ist die Abgrenzung von Komplexität zur Kompliziertheit. Diese Abgrenzung ist unabhängig davon, ob von einer internen oder externen Komplexität gesprochen wird.

Systeme lassen sich anhand der Charakteristika *Vielzahl/ Vielfalt der Systemelemente* und der *Veränderlichkeit/ Dynamik* beschreiben. Es werden die folgenden vier Kategorien von Systemen unterschieden: einfache Systeme, komplizierte Systeme, relativ komplexe Systeme und äußerst komplexe Systeme³ [SR17, S. 11]. Dargestellt ist dies in Bild 3-3.

Einfache Systeme zeichnen sich durch wenige, gleiche bzw. sehr ähnliche Elemente aus. Die Elemente sind untereinander nicht bzw. nur in einem sehr geringen Maß verknüpft. Ein Beispiel stellt die Herstellung eines Holztisches dar. Werden die Anforderungen hinsichtlich einer möglichst kostengünstigen Fertigung ausgeklammert, ist die Aufgabe an sich nicht kompliziert, da bspw. keine mathematischen Probleme zu lösen sind. Auch ist

³ HABERFELLNER ET AL. unterscheiden Systemtypen wie SCHUH ET AL. auch nach den zwei Dimensionen „Dynamik/ Veränderbarkeit“ und „Vielfalt/ Vielzahl/ Größe“. Während SCHUH ET AL. jedoch von „einfachen“, „komplizierten“, „relativ komplexen“ und „äußerst komplexen“ Systemen sprechen, sprechen HABERFELLNER ET AL. von „einfachen“, „dynamisch komplizierten“, „massiv vernetzten, komplizierten“ und „komplexen“ Systemen [SR17, S. 11], [HWF+12, S. 40].

die Aufgabe nicht komplex, da keine größeren Koordinations- bzw. Abstimmungstätigkeiten notwendig sind [Sch17, S. 10f.].

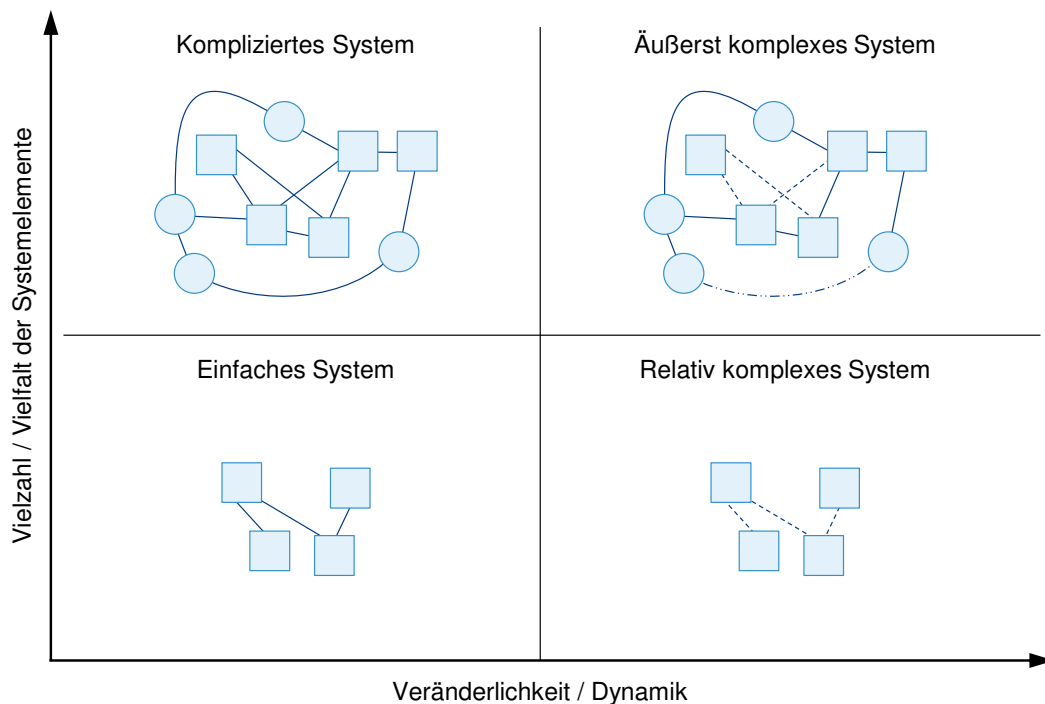


Bild 3-3: Portfolio zur Gliederung von komplizierten und komplexen Systemen nach [SR17, S. 11]

Komplizierte Systeme besitzen viele, unterschiedliche Elemente. Die Elemente sind untereinander nicht bzw. nur in einem sehr geringen Maß verknüpft. Ein Beispiel ist eine mathematische Aufgabe wie das Travelling Salesmen Problem. Die Aufgabe an sich ist sehr schwierig zu lösen und somit kompliziert. Sie ist jedoch nicht abhängig von anderen Elementen, Aufgaben, oder Stakeholdern. Somit ist die Aufgabe nicht komplex [Sch17, S. 10f.].

Relativ komplexe Systeme setzen sich aus wenigen, unterschiedlichen Elementen zusammen. Die Elemente sind untereinander verknüpft. Ein Beispiel stellt ein Hausbau dar. Die einzelnen Aufgaben wurden schon vielfach von verschiedensten Personen durchgeführt und sind an sich nicht kompliziert. Für einen reibungslosen Ablauf des Projekts sind eine Vielzahl von Abhängigkeiten zwischen Aufgaben zu berücksichtigen, sodass viel Koordination benötigt wird. Das macht die Aufgabe komplex [Sch17, S. 10f.].

Äußerst komplexe Systeme besitzen viele, unterschiedliche Elemente. Darüber hinaus sind die Elemente untereinander stark vernetzt, sodass das System eine hohe Dynamik hat [Sch17, S. 10f.].

Die Unterscheidung zwischen kompliziert und komplex ist im Rahmen dieser Arbeit von zentraler Bedeutung. Wie aufgezeigt, sind Beispiele für komplizierte Aufgaben mathematische Problemstellungen oder bspw. die Erstellung von Softwarecode. Die komplizierten Aufgaben erfordern i.d.R. ein sehr großes domänenspezifisches Wissen wie bspw.

über Mathematik oder Informatik. Ein domänenübergreifendes, interdisziplinäres Wissen bzw. Herangehensweise sind häufig nicht zwingend notwendig.

Komplexe Systeme hingegen erfordern Wissen aus verschiedenen Domänen und somit auch eine interdisziplinäre Herangehensweise. Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion sind komplexe Systeme. Die Summe der Teilsysteme repräsentiert häufig nicht das Ergebnis des Gesamtsystems. Dies erschwert eine Investitionsbewertung von entsprechenden Systemen und ist in der Literatur meist nicht explizit berücksichtigt.

3.1.4 Fertigung, Produktion und Produktionssystem

In der Fertigungstechnik bzw. **Fertigung** werden *geometrisch bestimmte, materielle Güter in einem diskreten Prozess hergestellt* [Bra14, S. 11]. Unterschieden wird zwischen der (Teile-)Fertigung und der Montage. Im Rahmen der Teilefertigung werden Einzelteile hergestellt. Diese werden in der Montage zu Baugruppen und Enderzeugnissen zusammengefügt [Bra14, S. 11].

KIENER ET AL. bezeichnen die **Produktion** als einen Ort, an dem *Produktionsfaktoren miteinander kombiniert [werden], [so] dass Güter und Dienstleistungen als Endprodukte entstehen* [KMO+12, S. 4]. SPUR bezeichnet die Produktion als *ein[en] von Menschen organisierte[n] Prozess der Wertschöpfung* [Spu79, S. 25]. Sie hat zum Ziel, Produkte zur benötigten Qualität, in möglichst kurzer Zeit und zu möglichst niedrigen Kosten sowie in ausreichender Menge zur Verfügung zu stellen. Die Produktion schließt alle relevanten Funktionsbereiche zu diesem Zweck ein. Dies sind u.a. die Fertigungssteuerung, die Fertigung und Montage [GP14, S. 16].

Darüber hinaus *kann der Begriff der Produktion auch als Prozess der Leistungserstellung [...] angesehen werden*. Die betrieblichen Entscheidungstatbestände stehen hier im Vordergrund [WKB14, S. 172]. Die VDI-RICHTLINIE 5200 definiert Produktion als:

„Alle zur betrieblichen Leistungserstellung erforderlichen Tätigkeiten, die unmittelbar an der Produktherstellung beteiligt sind und insbesondere die Prozesse Konstruieren und Arbeitsplan erstellen, Fertigen und Montieren, Lagern und Transportieren, Prüfen, Planen und Steuern, Waren vereinnahmen und versenden sowie Hilfsprozesse wie Instandhalten umfassen“ [VDI5200, S. 4].

Ein **Produktionssystem** beschreiben NYHUIS ET AL. als ein sozio-technisches System welches die Herstellung eines End- oder Zwischenprodukts zur Aufgabe hat. Ein Input (z.B. Material) wird zu einem Output (z.B. Produkte) transformiert. Dazu kommen wertschöpfende Prozesse (z.B. Fertigung und Montage) und assoziierte Prozesse (z.B. Transport und Lagerung) zum Einsatz [NHR+08, S. 85]. Die Bestandteile eines komplexen Produktionssystems nach EVERSHEIM sind in Bild 3-4 dargestellt.

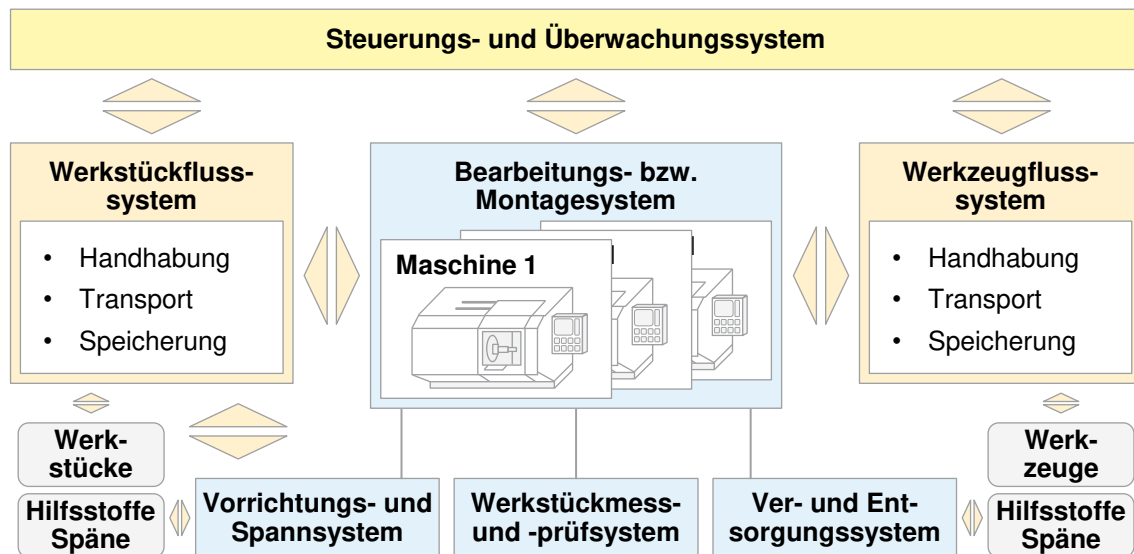


Bild 3-4: Bestandteile eines komplexen Produktionssystems nach [Eve89, S. 55]

Ein komplexes Produktionssystem führt mehrere Einzelprozesse der Fertigung und Montage sowie des Material- und Informationsflusses selbständig durch. Das wesentliche Merkmal eines komplexen Produktionssystems ist die informationstechnische Verknüpfung der einzelnen Komponenten über ein Steuerungs- und Überwachungssystem. Die Komponenten lassen sich in die Teilsysteme Steuerungs- und Überwachungssystem, Werkstückfluss- sowie Bearbeitungs- und Montagesystem unterteilen. Angrenzend an das Bearbeitungs- und Montagesystem kommen ein Vorrichtungs- und Spannsystem, ein Werkstückmess- und -prüfsystem sowie ein Ver- und Entsorgungssystem [Bra14, S. 12f], [REF90, S. 15].

Steuerungs- und Überwachungssysteme bzw. Informationssysteme sind Einrichtungen zur Speicherung, Verarbeitung, Verwaltung und Austausch von Informationen. Ihr Ziel ist eine reibungslose Abwicklung des Produktionsablaufs. Industrie-PCs und Software-Programme zur Bereitstellung von Steuerungsprogrammen stellen Beispiele dar [Ref90, S. 42]. Fördermittel und Förderhilfsmittel stellen das **Werkstückflusssystem** dar. Sie transportieren, lagern, handhaben und stellen bspw. die benötigten Werkstücke, Werkzeuge, Vorrichtungs- und Spannsysteme sowie Werkstückmess- und -prüfsysteme bereit. Darüber hinaus werden die Hilfsstoffe dem Bearbeitungs- und Montagesystem zugeführt und Abfälle entsorgt [Ref90, S. 42]. Die Betriebsmittel zur Erfüllung der Produktionsfunktion werden im **Bearbeitungs-/Montagesystem** zusammengefasst. Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen und Prüfmittel stellen Beispiele dafür dar [Bra14, S. 12f], [Ref90, S. 42].

Darüber hinaus lassen sich einstufige, mehrstufige und kombinierte Produktionssysteme unterscheiden. Die Gliederung richtet sich nach der Verteilung der Aufgaben auf die einzelnen Betriebsmittel [Ref90, S. 43]. Für eine weiterführende Typisierung der Produktion hinsichtlich Input-, Throughput- und Outputorientierung sei an dieser Stelle auf bspw. [Neb07, S. 48ff.] verwiesen.

Die Bedeutung der Begriffe Fertigung, Produktion und Produktionssystem ist für diese Arbeit wichtig. Zum einen ist dies in der Tatsache begründet, dass der Betrachtungsrahmen dieser Arbeit auf das Gebiet der Produktion eingegrenzt ist. Zum anderen ist die Analyse der Bestandteile eines komplexen Produktionssystems nach EVERSHEIM wichtig um eine Produktion im Rahmen von Industrie 4.0 zu verstehen.

3.1.5 Digitalisierung und Industrie 4.0

Nach BENDEL kann der Begriff Digitalisierung mehrere Bedeutungen haben. Im einfachsten Fall kann *die digitale Umwandlung und Darstellung von Information* gemeint sein [Ben19-ol]. Weiterhin kann bspw. die Digitalisierung von Geschäftsprozessen die *informationstechnische Unterstützung* dieser durch Maschinen bedeuten [FOS+18, S. 16]. Diese Interpretation stellt nach KOFLER eine für Unternehmen nach innen gerichtete Interpretation dar. Darüber hinaus kann die Digitalisierung nach außen gerichtet sein, um die eigenen Produkte und/oder Dienstleistungen zu innovieren [Kof18, S. 2]. In Summe geht es nach HENKE ET AL. um die *Transformation der gesamten Organisation* [HH19, S. 4].

Der Begriff Digitalisierung wird häufig auch als Synonym für die vierte industrielle Revolution genutzt, die sogenannte Industrie 4.0 [Bau16]. Die **erste industrielle Revolution** hat Ende des 18. Jahrhunderts mit der Einführung und Nutzung der Dampfmaschine begonnen. Sie beschreibt den *Übergang von der reinen Handarbeit zur maschinellen Produktion*. Zentrale Beispiele in diesem Kontext sind der Umbruch in der Textilindustrie, der Kohleförderung und der Stahlerzeugung [GDJ+14, S. 4]. Die **zweite industrielle Revolution** ist zu Beginn des 20. Jahrhunderts einzuordnen. Geprägt ist diese durch eine *starke Mechanisierung und Elektrifizierung*, gepaart mit einer Standardisierung und der Rationalisierung der Abläufe [GDJ+14, S. 4]. Henry Ford steht mit der Produktion des Model T sinnbildlich für diese Entwicklung [GDJ+14, S. 4]. Die **dritte industrielle Revolution** um die 1960er Jahre beschreibt den Einzug von IT zur Automatisierung der industriellen Produktion. Das *Paradigma der flexiblen Automatisierung* resultierte aus dem Einsatz numerisch gesteuerter Arbeitsmaschinen. Dies führte zu einer Steigerung der Flexibilität und Produktivität [GDJ+14, S. 4f.].

Mit der Durchdringung der Informations- und Kommunikationstechnik in allen Lebensbereichen wird nun von der **vierten industriellen Revolution** gesprochen, der Industrie 4.0. *Der Begriff Industrie 4.0 steht für eine neue Stufe der Organisation und Steuerung komplexer Wertschöpfungsnetzwerke* [DGK+15, S. 6]. *Produktion wird als [ein] komplexes, informationsverarbeitendes System verstanden* [GDJ+14, S. 5]. Es umfasst die vertikale Integration bzw. Vernetzung innerhalb eines Unternehmens, die horizontale Integration über die Wertschöpfungskette sowie eine digitale Durchgängigkeit des Engineerings [BDD+13, S. 6]. Nach GAUSEMEIER ET AL. ermöglicht dies eine *Ad-hoc-Vernetzung von intelligenten Maschinen, Betriebsmitteln, Produkten/Werkstücken sowie Lager-*

und Transportsystemen via Internet zu leistungsfähigen Wertschöpfungsnetzwerken [GKD+16, S. 11].

Wird im Rahmen dieser Arbeit von Digitalisierung gesprochen, ist die Digitalisierung eines Unternehmens im Sinne von Industrie 4.0 gemeint. Analog zu bspw. BAUERNHANSL ET AL., werden somit die Begriffe Digitalisierung und Industrie 4.0 als Synonyme verstanden [Bau16]. Angewendet auf die Produktion stellt sie den Kern der Betrachtung dar.

3.1.6 Cyber-Physical Systems und Industrie 4.0 Anwendungen

Grundlage von Industrie 4.0 sind sogenannte **Cyber-Physical Systems (CPS)** [GDJ+14, S. 6]. SCHUH ET AL. bezeichnen CPS als eine neue *Generation von Systemen, welche die physische Leistungsfähigkeit mitbringen, dem Anwender mittels geeigneter Benutzeroberflächen große Datenmengen und digitale Informationsflüsse zugänglich zu machen* [SPT14, S. 281f.].

WESTERMANN definiert eine Referenzarchitektur eines CPS. In der Referenzarchitektur wird zwischen Teilsystemen und dem CPS als Gesamtsystem unterschieden [Wes17, S. 93f.]. Die Referenzarchitektur ist in Bild 3-5 dargestellt.

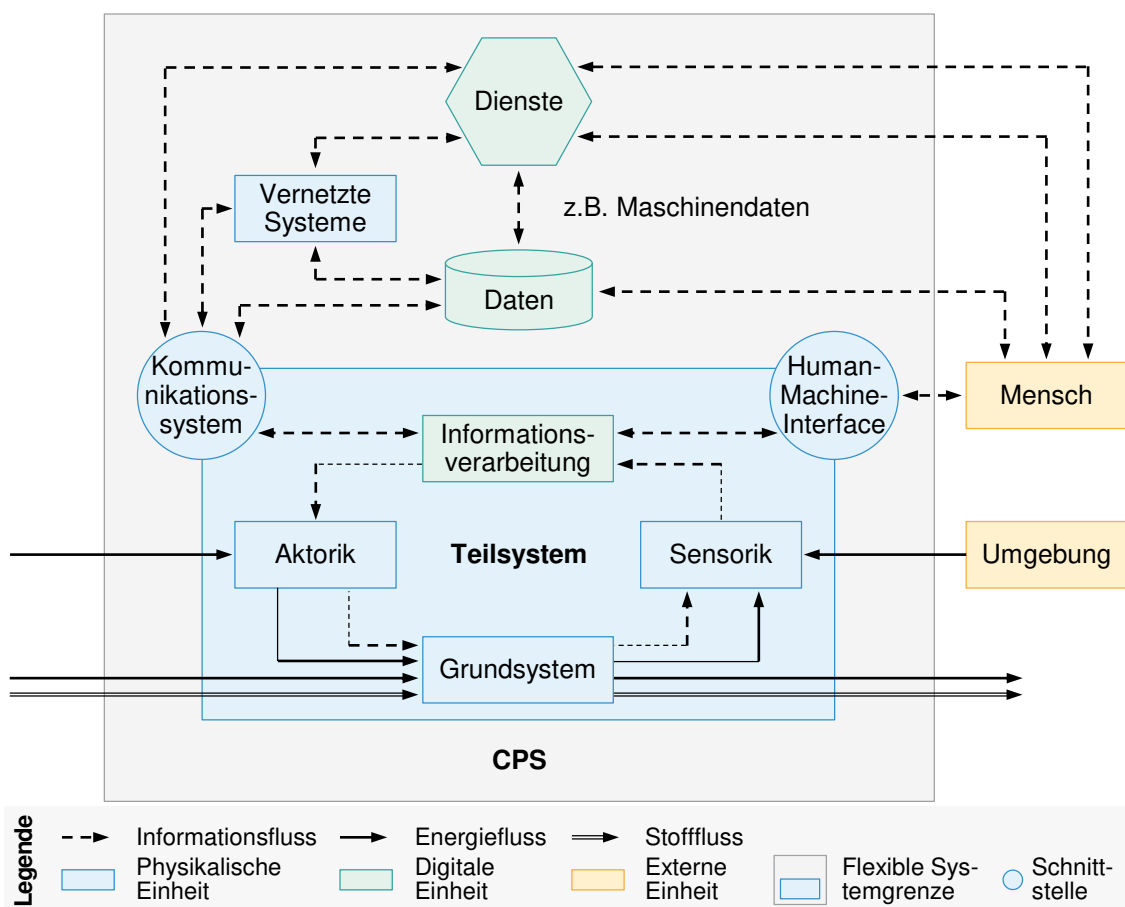


Bild 3-5: Referenzarchitektur eines Cyber-Physical Systems nach [WAD+16, S. 4] und [Wes17, S. 94]

Teilsysteme von CPS werden i.d.R. unabhängig voneinander entwickelt und dienen jeweils einem eigenen Zweck. Ein Teilsystem setzt sich aus einem Grundsystem, einer Sensorik, einer Informationsverarbeitung, einer Aktorik und einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zusammen. Die Systemgrenze des Teilsystems steht i.d.R. fest. Sofern das Teilsystem mit weiteren Systemen kommuniziert, entsteht ein CPS. Durch die Vernetzung mit anderen Systemen und die daraus veränderliche Nutzung von Daten und Diensten über den Lebenszyklus hinaus ist die Systemgrenze des CPS flexibel [Wes17, S. 93].

Die Komponenten des CPS werden in physikalische, digitale und externe Einheiten untergliedert. Sie sind über Beziehungen miteinander verknüpft. Dies können Informations-, Energie- und Stoffflüsse sein [Wes17, S. 93].

Der Begriff **Industrie 4.0 Anwendung** ist nicht explizit definiert. Vielmehr ist er durch eine Aktivität der PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 entstanden, welche eine Industrie 4.0-Landkarte etablierte [Pla19-ol]. Somit wurde der Begriff Industrie 4.0 Anwendungen im Rahmen der Veröffentlichung [FGH+18] charakterisiert. Dafür wurden 280 Anwendungsbeispiele der Industrie 4.0-Landkarte, gemeinsam mit 9 Anwendungsszenarien von Industrie 4.0, geclustert. Anschließend wurden sie mit Hilfe einer multidimensionalen Skalierung dargestellt (vgl. Kapitel 3.2.4).

Die Analyse des Betrachtungsgegenstands in der Produktion ist die Grundlage für dessen Bewertung. So wurde auf Basis der Anwendungsbeispiele und -szenarien ein Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion entwickelt. Dies wird in Kapitel 5.2.2 beschrieben. Es ermöglicht die Beschreibung des möglichen Investitionsobjekts.

3.1.7 Begriffe des Rechnungswesens und der Statistik

Die Aufgabe des Rechnungswesens ist es über betriebliche Aktivitäten und die Beziehungen der Unternehmung zu ihrer Umwelt Informationen zu sammeln und entscheidungsspezifisch aufzubereiten. Es sind interne und externe Interessen zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang sind typische Fragen wie bspw. über die Liquidität oder den Erfolg des Unternehmens zu beantworten [WKB14, S. 264f.]. Dafür sind folgende Begriffe voneinander zu unterscheiden.

Ein Zahlungsstrom bezeichnet Ein- und Auszahlungen [Hun15, S.57]. **Einzahlungen** bezeichnen *Mehrung[en] der flüssigen Mittel durch den Zugang von Bar- oder Buchgeld*. **Auszahlungen** bezeichnen *Minderungen der flüssigen Mittel durch den Abgang von Bar- oder Buchgeld* [OR12, S. 391].

Einnahmen bezeichnen *Mehrung[en] des aus den flüssigen Mitteln, zuzüglich den Forderungen abzüglich den Verbindlichkeiten, bestehenden Geldvermögens durch den Abgang von Gütern*. **Ausgaben** [bezeichnen] *Minderung[en] des aus den flüssigen Mitteln, zuzüglich den Forderungen abzüglich den Verbindlichkeiten, bestehenden Geldvermögens durch den Zugang von Gütern* [OR12, S. 391].

Einzahlungen und Einnahmen sowie Auszahlungen und Ausgaben weisen keine wertmäßigen Differenzen auf. Es können jedoch zeitliche Unterschiede vorliegen [OR12, S. 391]. Um einen Gewinn von einem Betriebsergebnis einer Unternehmung abgrenzen zu können, werden weiterhin die folgenden Begriffe unterschieden: **Gewinne** stellen die Differenz zwischen Erträgen und Aufwendungen dar, während das **Betriebsergebnis** die Differenz zwischen Leistungen und Kosten darstellt [WKB14, S. 268].

***Erträge** bezeichnen Mehrungen des Erfolgs durch die Erstellung, die Bereitstellung oder den Absatz von Gütern. **Aufwendungen** bezeichnen Minderungen des Erfolgs durch den Verbrauch oder den Gebrauch von Gütern [OR12, S. 391]. Die Ausdrücke Leistungen und Kosten grenzen diese Definitionen im Sinne der gewöhnlichen betrieblichen Geschäftstätigkeit ein. **Leistungen** bezeichnen Mehrungen des Erfolgs durch die Erstellung, die Bereitstellung oder den Absatz von Gütern im Rahmen der gewöhnlichen betrieblichen Geschäftstätigkeit der Periode. **Kosten** bezeichnen Minderungen des Erfolgs durch den Verbrauch oder den Gebrauch von Gütern im Rahmen der gewöhnlichen betrieblichen Tätigkeiten der Periode [OR12, S. 392].*

Für die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ist die Unterscheidung der aufgezeigten Begriffe erforderlich. Es ermöglicht bspw. die Verständigung darüber, wann und wodurch welche Erträge entstehen und ob durch diese Erträge auch Einnahmen bzw. Einzahlungen entstehen.

Nominal-, Ordinal- und Kardinalskala

In der Statistik werden Merkmalsausprägungen mit Hilfe von alternativen Skalen erfasst. Die drei folgenden *Hauptskalen* werden unterschieden: Nominalskala, Ordinalskala, Kardinalskala [SL15, S. 4].

*Bei der **Nominalskala** können die Ausprägungen des untersuchten Merkmals lediglich unterschieden werden. Ein Beispiel ist das Geschlecht. Es lassen sich keine sinnvollen Ordnungen oder Abstände zwischen den Ausprägungen definieren [SL15, S. 4]. Bei der **Ordinalskala** oder **Rangskala** können die Merkmale unterschieden und in eine sinnvolle Ordnung gebracht werden. Ein Beispiel stellen Schulnoten dar. Die Noten lassen sich in eine sinnvolle Reihenfolge bringen. Der Abstand zwischen mehreren Noten lässt sich jedoch nicht interpretieren [SL15, S. 5]. Bei der **Kardinalskala** oder **metrischen Skala** wird der Abstand der Merkmalsausprägungen unterschieden. Ein Beispiel stellt das Vermögen dar. Eine Person mit 2000€ besitzt doppelt so viel wie eine Person mit 1000€. Es lassen sich eine sinnvolle Ordnung der Merkmalsausprägungen definieren und die Abstände zwischen diesen messen [SL15, S. 5].*

Im Rahmen dieser Arbeit ist die Art der gewählten Skala wichtig. Entsprechend der gewählten Skala bzgl. eines Investitionsobjekts lassen sich unterschiedliche Methoden anwenden. Eine Nutzwertanalyse bspw. bewertet ein Investitionsobjekt ausschließlich auf einer Ordinalskala, während eine Kapitalwertmethode ein Investitionsobjekt auf der Kardinalskala bewertet.

3.1.8 Bewertung, Investition, Wirtschaftlichkeit und Business Case

Bewertung stellt nach OSER ein *Verfahren zur Bestimmung des Werts von Gütern oder Handlungsalternativen* dar [Ose19-ol]. Im Kontext der Produktion gilt es die Wirtschaftlichkeit von Investitionen zu bewerten. Häufig kommt für diesen Sachverhalt auch der Begriff Business Case zum Einsatz. Im Folgenden werden zunächst die Begriffe Investition und Wirtschaftlichkeit und anschließend der Begriff Business Case näher analysiert.

Der Begriff der **Investition** ist in der Literatur vielfältig belegt [LB91, S. 151]. In der Betriebswirtschaftslehre werden die folgenden vier Begriffsgruppen von Investitionen unterschieden: vermögensbestimmter Investitionsbegriff, kombinationsbestimmter Investitionsbegriff, zahlungsbestimmter Investitionsbegriff und dispositionsbestimmter Investitionsbegriff [Göt14, S. 5f.]. Nach dem zahlungsbestimmten Investitionsbegriff beginnt eine Investition mit einer Auszahlung, während Einzahlungen bzw. Einzahlungen und Auszahlungen folgen. Der vermögensorientierte Investitionsbegriff kennzeichnet eine Investition als die Bindung finanzieller Mittel in materiellen oder immateriellen Objekten, um individuelle Ziele zu verfolgen [Göt14, S. 6].

Die verschiedenen Definitionen sind nicht immer trennscharf. Gleichermaßen lassen sich Investitionen nach unterschiedlichen Betrachtungsweisen strukturieren [LB91, S. 151]. Für die Bewertung einer konkreten Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ist jedoch eine eindeutige Definition notwendig. Somit wurde in [JKH+18, S. 467] folgende Definition vorgeschlagen:

„Eine Investition im Rahmen der Produktion bedingt initial Ausgaben und initial oder verzögert Auszahlungen, mit dem wirtschaftlichkeitsorientierten Ziel zukünftig Einnahmen und ggf. auch Einzahlungen bzw. verringerte Auszahlungen zu generieren. Die Investition wird als wirtschaftlich betrachtet, sofern die Einnahmen die Ausgaben übertreffen und die (ggf. auch negative) Differenz von Einzahlungen zu Auszahlungen tragbar ist. Dies geschieht entsprechend gängiger Definitionen der relativen und absoluten Wirtschaftlichkeit.“

Wirtschaftlichkeit setzt nach WEBER ET AL. *die wertmäßige Ausbringungsmenge in das Verhältnis zur wertmäßigen Einsatzmenge. Bei gegebener Ausbringungsmenge kann durch eine Verringerung der Faktoreinsatzmenge eine Senkung der Faktorpreise oder durch eine Erhöhung der Absatzpreise eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden* [WKB14, S. 3]. Es zeigt somit auf, inwieweit eine Tätigkeit dem ökonomischen Prinzip bzw. dem Wirtschaftlichkeitsprinzip entspricht [Bar11, S. 124f.].

Es wird zwischen einer absoluten und relativen Wirtschaftlichkeit bzw. einer absoluten und einer relativen Vorteilhaftigkeit unterschieden [Göt14, S. 55]. Eine Investition ist absolut vorteilhaft, wenn *[sie] der Unterlassungsalternative vorzuziehen ist*. BARDMANN, beschreibt eine Investition als absolut vorteilhaft, wenn *die Rentabilität der Investition größer ist als eine vorgegebene Mindestrentabilität* [Bar11, S. 158]. Demgegenüber ist

ein Investitionsobjekt relativ vorteilhaft, wenn dieses gegenüber *einander ausschließenden Investitionsobjekten* vorzuziehen ist [Göt14, S. 55].

Ein **Business Case** adressiert die Frage, *welche finanziellen Konsequenzen entstehen, wenn eine (unternehmerische) Entscheidung so (und nicht anders) getroffen wird* [Tas13, S. 15]. I.d.R. werden mehrere Investitionsentscheidungen als Alternativen gegenübergestellt und mit Hilfe verschiedener Methoden der Investitionsrechnung bewertet [Tas13, S. 15].

Die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion, wie bspw. in Form eines Business Case, bedarf eines eindeutigen Verständnisses über den Begriff Bewertung. Dafür wird im Rahmen dieser Arbeit der oben aufgezeigten Definition gefolgt.

3.2 Produktion auf dem Weg zur Industrie 4.0

Im Folgenden wird auf die Entwicklung der Produktion auf dem Weg zur Industrie 4.0 eingegangen. Dazu wird zunächst in Kapitel 3.2.1 die Entwicklung von Anforderungen an Produktionssysteme beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 3.2.2 heutige Produktionskonzepte und in Kapitel 3.2.3 die Vision im Rahmen von Industrie 4.0 aufgezeigt. Ein Strukturierungsansatz der Vision mit Hilfe von Anwendungsszenarien und -beispielen von Industrie 4.0 wird in Kapitel 3.2.4 vorgestellt. Auf dieser Grundlage wird in Kapitel 3.2.5 das erste Handlungsfeld dieser Arbeit hergeleitet.

3.2.1 Entwicklung von Anforderungen an Produktionssysteme

Sowohl in der industriellen als auch in der wissenschaftlichen Literatur wird stets von steigenden Anforderungen an Produktionssysteme bzw. einer steigenden Komplexität berichtet, welche Unternehmen zu bewältigen haben [VWB+09, S. 4]. Nach GAUSEMEIER ET AL. lässt sich dies bspw. auf eine gesteigerte Produktkomplexität zurückführen [GDS+13, S. 18]. KOREN begründet dies mit der Entwicklung von Produktvolumen je Variante im Vergleich zum Gesamtproduktvolumen. In diese Entwicklung werden die Produktionsparadigmen der jeweiligen Zeit eingeordnet. Sie sind eng mit den Anforderungen an ein Produktionssystem verknüpft [Kor10, S. 34], [JEK+18a, S. 407]. Dargestellt ist die Entwicklung des Produktvolumens und der Produktvielfalt in Bild 3-6.

Fünf Meilensteine werden in der Entwicklung der Anforderung an Produktionssysteme beschrieben. Der erste Meilenstein war 1850. Es herrschte eine sehr große Produktvielfalt bei einem sehr geringen Produktvolumen pro Variante. Das vorherrschende Produktionsparadigma war die **Handfertigung**. Mit der Entwicklung neuer Fertigungstechniken und -konzepte stieg das gefertigte Volumen. Dabei sank die Produktvielfalt jedoch drastisch. 1913 ist der zweite Meilenstein. Das Ford Model T steht exemplarisch für diese Entwicklung [Bau14, S. 13], [Kor10, S. 34f.].

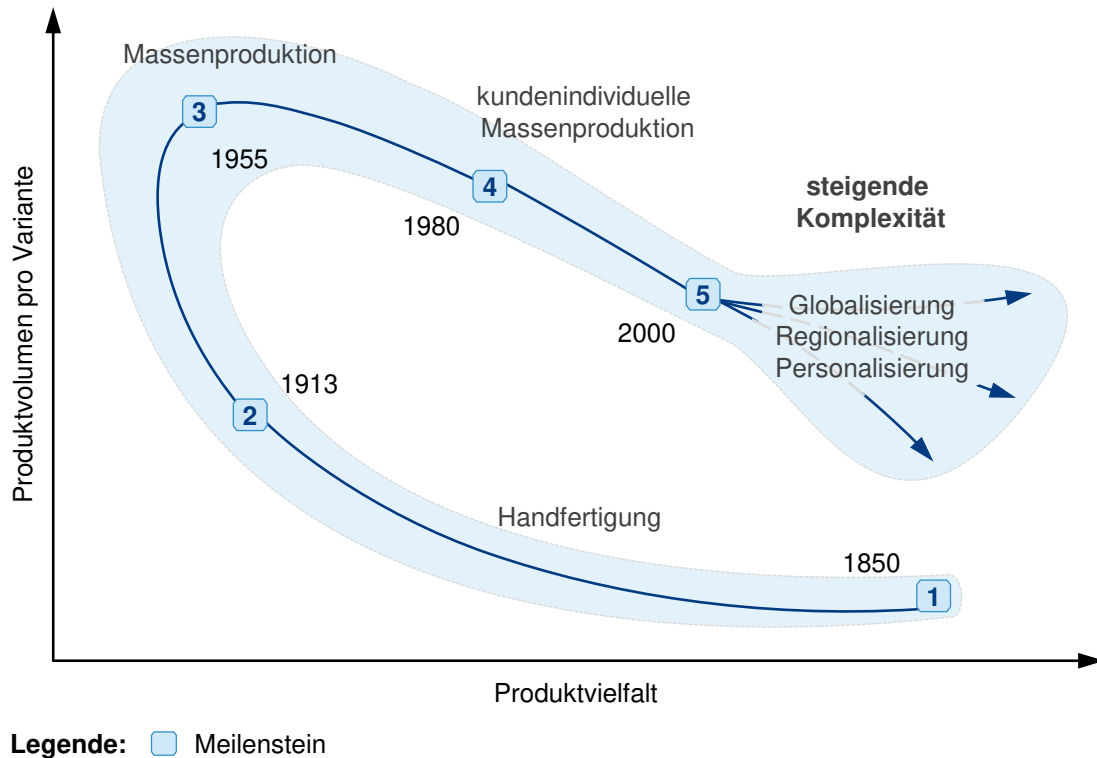


Bild 3-6: Entwicklung des Produktvolumens und der Produktvielfalt als zentrale Herausforderung für die Produktion nach [Kor10, S. 34] und [Bau14, S. 13]

Diese Entwicklung führte sich fort. 1955 stellte mit der **Massenproduktion** den dritten Meilenstein dar. Die Produktvielfalt sank weiter, wenn auch nicht so stark wie zuvor. Dafür stieg das Produktvolumen je Variante deutlich. Ein Beispiel der Zeit ist die Massenfertigung des VW-Käfers. Im weiteren Verlauf fiel das Produktvolumen je Variante wieder leicht ab. Die Produktvielfalt stieg jedoch wieder deutlich an. Meilenstein vier wird 1980 als die **kundenindividuelle Massenproduktion** bezeichnet. Produktkonfiguratoren wurden etabliert. Eines der ersten erfolgreichen Beispiele dieser Zeit stellte der Produktkonfigurator von BMW dar [Bau14, S. 13], [Kor10, S. 34f.].

Bis 2000 sank weiterhin das Produktvolumen bei steigender Produktvielfalt. Nach diesem fünften Meilenstein ist die weitere Entwicklung noch nicht eindeutig. Trends wie die Globalisierung, Regionalisierung und Personalisierung sorgen für einen unterschiedlich starken Abfall der Produktvolumina pro Variante [Kor10, S. 34f.].

Polylemma der Produktion

Die von KOREN aufgezeigte Entwicklung stellt eine Begründung für steigende Herausforderungen an Produktionssysteme dar [Kor10, S. 34]. Nach BRECHER ET AL. spiegeln sich die resultierenden Herausforderungen im Polylemma der Produktion wider [BJS+11, S. 21].

Neben dem Polylemma der Produktion gibt es noch zahlreiche weitere Zielsetzungen und -konflikte in der Produktion zu berücksichtigen. Nach SCHÖNSLEBEN ET AL. ergibt sich ein Dilemma der Produktionssteuerung durch verschiedenste, teilweise konträre betriebswirtschaftliche, technologische und individuelle Ziele. Dabei *muss [...] akzeptiert werden, dass ein Zielsystem nicht widerspruchsfrei sein kann* [SS09, S. 798f.]. DANGELMAIER unterscheidet zwischen Sach- und Formalzielen. Das Sachziel besteht darin, *eine zulässige [...] Produktion zu bestimmen* [Dan09, S. 59]. Formalziele hingegen definieren eine *Präferenzrelation [...] der zulässigen Lösungen* [Dan09, S. 62]. Ein Beispiel für ein Sachziel ist die Herstellung von bestimmten Produkten in einem Produktionssystem. Ein Beispiel für ein Formalziel ist die Gewinnmaximierung [JEK+18a, S. 408], [KMO+18, S. 5].

Nach der VDI-RICHTLINIE 3633 ist die Wirtschaftlichkeitsmaximierung das übergeordnete Ziel einer Produktion. Bspw. stellen die Minimierung der Lager-, Anlagen- und Rüstkosten Aspekte der Wirtschaftlichkeitsmaximierung dar [VDI3633, S. 9]. Die Zusammenführung von Teilzielen erfordert nach NEBL stets eine gesamtbetriebliche Betrachtung [Neb07, S. 20]. WIENDAHL fasst den Zielkonflikt in der Fertigung in dem Polylemma der Fertigungssteuerung zusammen [Wie14, S. 266]. Dies stellt den Zusammenhang und den Konflikt zwischen Leistung, Durchlaufzeiten, Kosten und Termintreue qualitativ dar. Der Bestand ist dabei die erklärende Variable. Alle beschriebenen Verläufe haben ein individuelles Optimum, d.h. ein Minimum bzw. ein Maximum [Wie14, S. 266]. Das Polylemma der Fertigungssteuerung ist in Anhang A1 dargestellt.

Die vielfältigen Ziele von Unternehmen beeinflussen eine Investitionsentscheidung über eine Industrie 4.0 Anwendung grundlegend. Je nachdem ob bspw. möglichst große Mengen zu geringen Preisen oder wenige sehr hochpreisige Produkte produziert werden sollen, haben Unternehmen grundsätzlich unterschiedliche Einstellungen gegenüber und Zielsetzungen für Investitionen. Auch können gewisse technische Lösungen in einer Massenproduktion wirtschaftlich sein, während sie in einer Einzelfertigung unwirtschaftlich sind. Ein Beispiel ist, wenn für den Einsatz einer Industrie 4.0 Anwendung bei jedem Produktwechsel ein großer Planungsaufwand anfällt. Die Industrie 4.0 Anwendung ist in einer Produktion in der sehr kleine Losgrößen gefertigt werden deutlich aufwändiger als in einer Massenfertigung. Dies gilt es bei einer potentiellen Investition zu berücksichtigen.

3.2.2 Heutige Produktionskonzepte

KUHN beschreibt eine Klassifikation an idealisierten Produktionssystemen bzw. -konzepten⁴. Demzufolge können Organisationsformen der Produktion grundsätzlich nach den

⁴ WIENDAHL stellt in Anlehnung an EVERSHEIM ET AL. eine ähnliche Klassifikation vor, welche sich auf die Fertigung beschränkt. Organisationsformen in der Fertigung werden dabei nach den zwei Dimensionen „Stückzahl je Variante“ und „Anzahl Varianten“ strukturiert [ES96], [Wie14, S. 51]. Weiterhin werden Montagekonzepte in Anlehnung an LOTTER separat nach Leistung und Produktkomplexität gegliedert [Lot85], [Wie14, S. 51f.].

zwei Dimensionen Produktivität und Flexibilität charakterisiert werden [Kuh+08, S. 124f.]. Dargestellt ist dies in Bild 3-8.

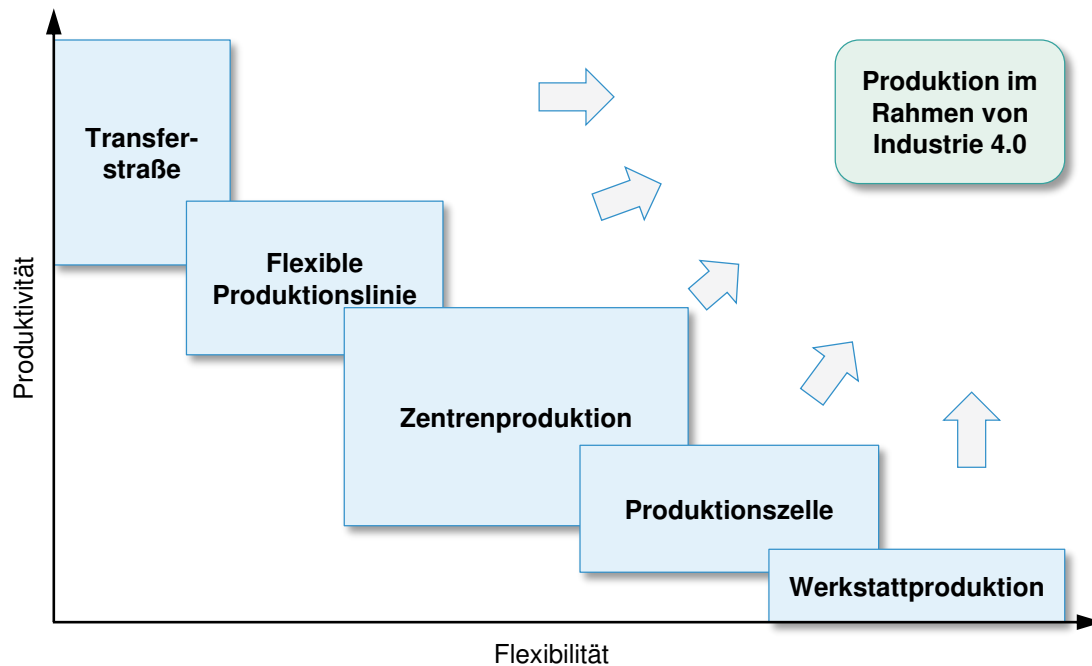


Bild 3-8: Ergänzte Klassifikation von Produktionskonzepten nach [Kuh+08, S. 125]

Fünf idealtypische Produktionskonzepte sind im Rahmen des Portfolios vorgesehen. Diese reichen von der Transferstraße, über die flexible Produktionslinie, die Zentrenproduktion und die Produktionszelle bis hin zur Werkstattproduktion [Kuh+08, S. 123f.], [MS13, S. 51ff.].

Die **Transferstraße** stellt das produktivste und gleichzeitig das unflexibelste Produktionskonzept dar. Sie kommt somit bei Großserien- und Massenprodukten zum Einsatz. Die ausführenden Maschinen sind hochspezialisiert. Die Produktionsschritte sind starr gekoppelt und starr getaktet. Für die Produktion bedeutet dies eine fest vorgegebene Reihenfolge gleicher Produkte [Kuh+08, S. 123f.].

Flexible Produktionslinien sind sehr produktiv und unflexibel, jedoch unproduktiver und flexibler als Transferstraßen. Flexible Produktionslinien sind modular zusammengesetzte, spezialisierte und automatisierte Produktionsmodule [Kuh+08, S. 123f.].

Die **Zentrenproduktion**, bzw. das flexible Produktionssystem, steht in der Mitte des Portfolios von Produktivität und Flexibilität. Zentrenproduktion wird in Produktionsinseln und flexible Produktionssysteme unterschieden. Produktionsinseln sind nicht automatisierte Produktionszentren, während automatisierte Produktionszentren als flexible Produktionssysteme bezeichnet werden [Kuh+08, S. 123f.].

Produktionszellen sind wiederum flexibler und unproduktiver als die Zentrenproduktion. Sie stellen gleichartige, zu einer Einheit zusammengefasste Bearbeitungszentren dar [Kuh+08, S. 123f.].

Die **Werkstattproduktion** stellt das flexibelste und gleichzeitig das unproduktivste Produktionskonzept dar. Sie kommt somit bei Einzel- und Kleinserien zum Einsatz und zeichnet sich durch nach Tätigkeiten strukturierte Arbeitsbereiche aus [Kuh+08, S. 123].

Die vorgestellten Produktionskonzepte stellen idealisierte Organisationsformen dar und treten häufig auch in einer Mischform auf. Gleichzeitig stellen die Konzepte auf der Diagonalen von oben links nach unten rechts technisch realisierbare und als wirtschaftlich betrachtete Produktionskonzepte dar. Der Bereich unten links ist unwirtschaftlich. Mit Hilfe von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion wird nun versucht dem Bereich oben rechts im Diagramm näher zu kommen.

Bei der Erreichbarkeit des oberen rechten Bereichs stellt i.d.R. nicht die technische Realisierbarkeit die zentrale Herausforderung dar. Vielmehr ist die Frage der Wirtschaftlichkeit zu klären. Dabei kann die Frage der Wirtschaftlichkeit einer Investition von Produktionskonzept zu Produktionskonzept grundlegend variieren. Somit sind die Rahmenbedingungen bei einer Investitionsbewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion von zentraler Bedeutung. Je Zielsystem und je Struktur eines Produktionssystems können die sowohl positiven als auch negativen Auswirkungen einer technischen Lösung grundlegend variieren.

3.2.3 Vision im Rahmen von Industrie 4.0

Die Vision von Industrie 4.0 reicht über die Produktion hinaus. DUMITRESCU ET AL. beschreiben eine umfassende Vision von Industrie 4.0 anhand der Automatisierungspyramide. Die Automatisierungspyramide repräsentiert ein Unternehmen von der Unternehmensleitebene, über die Betriebs-, Prozess- und Steuerungsleitebene bis hin zur Feldebene [DGK+15, S. 13]. Drei übergeordnete Aspekte von Industrie 4.0 lassen sich an der Automatisierungspyramide verorten: Die vertikale und horizontale Integration sowie ein umfassendes Systems Engineering [DGK+15, S. 13]. Bild 3-9 zeigt die Vision von Industrie 4.0 nach [DGK+15, S. 13].

Die **vertikale Integration** stellt die Verknüpfung von IT-Systemen auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen eines Unternehmens dar. Diese reichen von der Feldebene, über die Steuerungs- und Prozessleitebene bis hin zur Betriebs- und Unternehmensleitebene. Dies ermöglicht eine Synchronisation von Prozessen über verschiedene Unternehmensebenen hinweg. Somit ist die vertikale Integration *der Schlüssel zur Smart Factory*, in der flexible Strukturen durch *Modelle, Daten, Kommunikation und Algorithmen* ermöglicht werden [DGK+15, S. 13].

Die **horizontale Integration** beschreibt die unternehmensübergreifende Vernetzung. Dabei werden IT-Systeme für *die unterschiedlichen Prozessschritte der Beschaffung, Produktion und Distribution* zu einer durchgängigen Lösung integriert. Dies ermöglicht eine dynamische Kooperation und Ad-hoc-Vernetzung zwischen den Beteiligten über den gesamten Prozess der Wertschöpfungskette hinweg [DGK+15, S. 13].

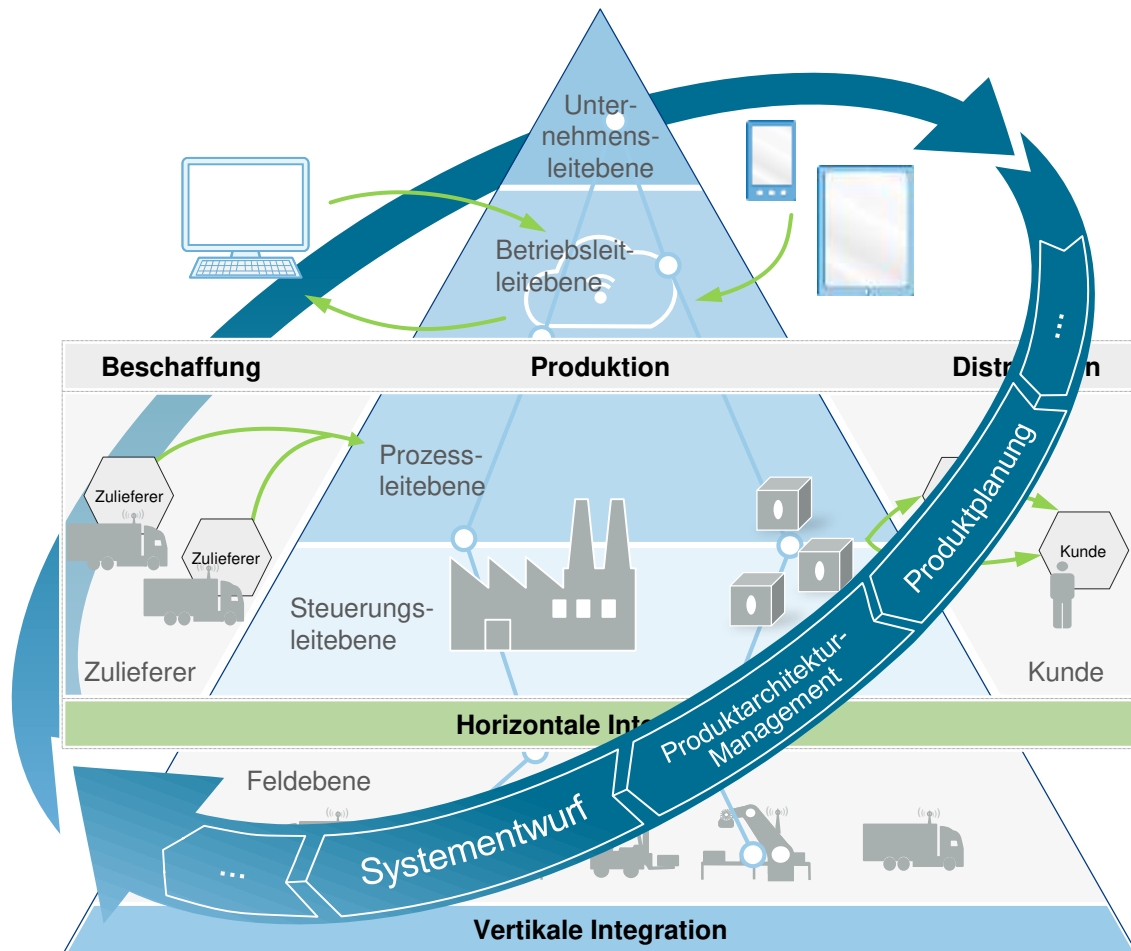


Bild 3-9: Vision von Industrie 4.0 nach [DGK+15, S. 15]

Das **umfassende Systems Engineering** ist ein *durchgängiger domänenübergreifender Ansatz zur Entwicklung multidisziplinärer technischer Systeme* [DGK+15, S. 14]. Das technische System steht dabei im Mittelpunkt und umfasst alle Entwicklungstätigkeiten. Interdisziplinarität und eine ganzheitliche Problembetrachtung sind essentiell. Im Rahmen des Model Based Systems Engineering wird dies umgesetzt. Das Systemmodell steht im Mittelpunkt einer Entwicklung, enthält alle wesentlichen Informationen über das System und dient somit als Verständigungsmittel zwischen den Entwicklern verschiedener Fachbereiche. So wird es ermöglicht, nicht nur mechanische Systeme, sondern auch hoch vernetzte Systeme im Sinne von Industrie 4.0 zu beschreiben [DGK+15, S. 14].

Die Vision Industrie 4.0 über die drei aufgezeigten Aspekte der vertikalen und horizontalen Integration sowie des umfassenden Systems Engineering zeigt auf, wie bereichsübergreifend Auswirkungen von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen sein können. Dies stellt eine große Herausforderung für eine Investitionsbewertung von entsprechenden Investitionen dar.

3.2.4 Anwendungsszenarien und -beispiele von Industrie 4.0

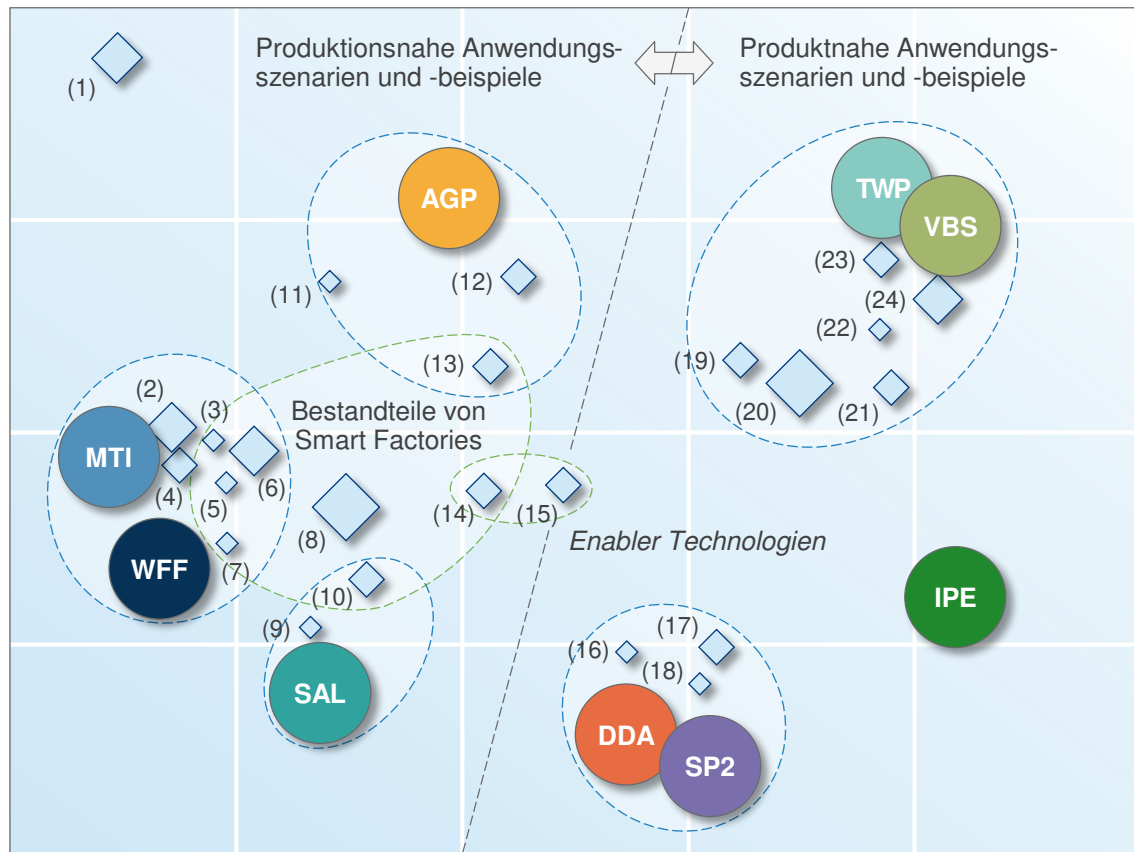
Industrie 4.0 verspricht mit der zuvor aufgezeigten Vision zahlreiche Potentiale. Diese reichen bspw. von Kosteneinsparungen über Qualitätssteigerungen bis hin zu Flexibilitätssteigerungen in der Produktion [BKV16, S. 7], [WWB15, S. 38]. Die Möglichkeiten und Potentiale von Industrie 4.0 greifbar zu machen, stellt jedoch eine große Herausforderung für Wissenschaft und Wirtschaft dar. Gründe dafür sind unter anderem die zuvor aufgezeigte, steigende Komplexität des betrachteten Produktionssystems [JTK18, S. 249f], [WWB15, S. 23].

Um die Möglichkeiten und Potentiale von Industrie 4.0 und der Digitalisierung aufzuzeigen, erarbeitete die DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (ACATECH) **Anwendungsszenarien von Industrie 4.0**. Die Anwendungsszenarien zeigen Unternehmen Visionen in unterschiedlichen Unternehmensbereichen auf, wie Industrie 4.0 bzw. die Digitalisierung die Arbeit verändern wird [ABD+16]. Beispiele der Anwendungsszenarien sind die „Auftragsgesteuerte Produktion“, die „Selbstorganisierende adaptive Logistik“ und die „Transparenz und Wandlungsfähigkeit ausgelieferter Produkte“ [ABD+16, S. 6f.], [JTK18, S. 250].

Parallel zur Erarbeitung der Anwendungsszenarien initiierte die PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 eine Industrie 4.0 Landkarte. Auf dieser werden bereits existierende **Anwendungsbeispiele von Industrie 4.0** gesammelt. So soll Unternehmen aufgezeigt werden, welche Lösungen es heute bereits gibt [BMWi18-ol].

Im Rahmen der Veröffentlichung [FGH+18], an der der Autor dieser Arbeit mitgewirkt hat, wurden die Anwendungsszenarien und Anwendungsbeispiele miteinander verknüpft. Die zu dem Zeitpunkt vorhandenen 280 Industrie 4.0 Anwendungsbeispiele wurden gemeinsam mit 9 Anwendungsszenarien geclustert und in einer multidimensionalen Skalierung dargestellt. Bild 3-10 zeigt die multidimensionale Skalierung der Anwendungsszenarien und Anwendungsbeispiele. Für die Beschreibung der Vorgehensweise zur Erstellung der multidimensionalen Skalierung sei an dieser Stelle auf [FGH+18, S. 9] verwiesen.

Mit Hilfe von 24 Clustern lassen sich die Anwendungsbeispiele der Industrie 4.0 Landkarte sinnvoll zusammenfassen. Die Zuordnung der Cluster zu den Anwendungsszenarien erfolgt über deren Nähe zueinander [FGH+18, S. 2]. Auf der linken Seite der multidimensionalen Skalierung liegen produktionsnahe und auf der rechten Seite produktnahe Anwendungsszenarien und -beispiele. In der Mitte aller Anwendungsszenarien liegen die Cluster „IT-Security“ und „Schnittstellen und Standards“. Die enthaltenen Anwendungsbeispiele sind für alle Anwendungsszenarien relevant. *Sie sind Enabler- bzw. Querschnittstechnologien*. Weiterhin liegen auf der linken Seite der multidimensionalen Skalierung Anwendungsbeispiele zwischen den Szenarien. *Diese stellen Smart Factories an sich oder Elemente von Smart Factories dar* [FGH+18, S. 2].



Legende

○ Industrie 4.0 Anwendungsszenario

◇ (Nr.) Cluster an Anwendungsbeispielen
[Anzahl der Beispiele im Cluster]

Industrie 4.0 Anwendungsszenarien

AGP Auftragsgesteuerte Produktion
WFF Wandlungsfähige Fabrik
MTI Mensch-Technik-Interaktion
SAL Selbstorganisierende adaptive Logistik
SP2 Smarte Produktentwicklung für die smarte Produktion

IPE Innovative Produktentwicklung
VBS Value Based Services
TWP Transparenz und Wandlungsfähigkeit ausgelieferter Produkte
DDA Durchgängiges und dynamisches Engineering von Anlagen

Bezeichnung der Cluster an Anwendungsbeispielen

- | | |
|--|---|
| (1) Schulung, Qualifikation & Beratung [19] | (13) Individuelle Fertigung [13] |
| (2) Kognitive Unterstützung [21] | (14) Schnittstellen und Standards [10] |
| (3) Datenbrillen [5] | (15) IT-Security [6] |
| (4) Physische Unterstützung [10] | (16) Digitale Kollaboration in der Produktentwicklung [7] |
| (5) Smarte Personaldisposition [5] | (17) Smart Engineering [13] |
| (6) Produktionsmanagementsysteme [17] | (18) Virtualisierung [5] |
| (7) Wandlungsfähige Arbeitssysteme [8] | (19) Intelligente Sensorik [12] |
| (8) Smart Factory [25] | (20) Transparenz in der Wertschöpfung [35] |
| (9) Transparenz in Logistik-Prozessen [8] | (21) Smartes Energiemanagement [14] |
| (10) Autonome Transportsysteme [10] | (22) Remote Services [7] |
| (11) Auftragssteuerung [horizontale Vernetzung] [7] | (23) Datengetriebene Analyse & Optimier. [14] |
| (12) Digitale Kollaboration in der Wertschöpfungskette [9] | (24) Datengetriebene Wartung [21] |

Bild 3-10: Multidimensionale Skalierung der Industrie 4.0 Anwendungsszenarien und Anwendungsbeispiele nach [FGH+18, S. 3]

Abgrenzung dieser Arbeit: Im Rahmen dieser Arbeit werden die produktionsnahen Anwendungsbeispiele betrachtet. Konkret werden die Anwendungsbeispiele in der Nähe der Anwendungsszenarien Mensch-Technik-Interaktion, Wandlungsfähige Fabrik und Selbstorganisierende adaptive Logistik berücksichtigt. Beispiele vollständiger Smart Factories werden nicht betrachtet.

3.2.5 Handlungsfeld 1: Strukturierung von Investitionsentscheidungen im Rahmen von Industrie 4.0

Die Anforderungen an Produktionssysteme steigen kontinuierlich. Gründe dafür sind eine steigende Komplexität der Erzeugnisse und der erforderlichen Produktionssysteme sowie die Verschiebung des Verhältnisses von Produktionsvolumina je Variante zur gefertigten Produktvielfalt in einem Unternehmen. Industrie 4.0 stellt eine vielversprechende Antwort auf diese Herausforderungen dar. Bereits heute gibt es zahlreiche Industrie 4.0 Anwendungen für die Produktion. Die aufgezeigte multidimensionale Skalierung stellt eine Strukturierung dieser Industrie 4.0 Anwendungsbeispiele dar. Zum einen ermöglicht dies eine klare Abgrenzung dieser Arbeit. Zum anderen wirft es die Frage auf, ob alle Industrie 4.0 Anwendungsbeispiele gleich zu bewerten sind. Es resultiert der Bedarf nach Klassen von Investitionsentscheidungen sowie klassenspezifischen Vorgehen.

3.3 Einführung von Industrie 4.0 Anwendungen

Unabhängig von der Art der Investition, ist diese ab einem gewissen Investitionsvolumen systematisch zu planen. Dazu wird in Kapitel 3.3.1 das 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung beschrieben. Weiterhin gilt es die Industrie 4.0 Anwendung als sozio-technisches System innerhalb eines Produktionssystems zu betrachten. Dies wird in Kapitel 3.3.2 vorgestellt. In Kapitel 3.3.3 wird das zweite Handlungsfeld dieser Arbeit hergeleitet.

3.3.1 Das 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung

Das 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung beschreibt einen idealtypischen Prozess für die Einführung neuer Systeme in ein Unternehmen [GP14, S. 38]. Der Prozess ist auf die Einführung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion anwendbar. Bild 3-11 zeigt das 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung.

Gegliedert ist das Modell in die vier Betrachtungsebenen Vorausschau, Strategie, Prozesse und Systeme. Im Rahmen der **Vorausschau** gilt es die Entwicklung von Märkten, Technologien etc. zu antizipieren, um die Chancen und Bedrohungen von morgen für das etablierte Geschäft frühzeitig zu erkennen [GP14, S. 37f.]. Die zweite Ebene ist die **Strategie**. Hier gilt es Geschäfts-, Produkt- und Technologiestrategien zu entwickeln, um

Chancen rechtzeitig zu nutzen. Grundlage dafür sind die Erkenntnisse, die in der Ebene Vorausschau gewonnen wurden [GP14, S. 38]. Die **Prozesse** stellen die dritte Ebene dar. Sie sind entsprechend dem Motto „*structure follows strategy*“ zu gestalten [GP14, S. 38f.]. Die vierte Ebene sind die **Systeme**. Auf Basis der Vorarbeiten werden Systeme ausgewählt und zur Unterstützung der Prozesse eingeführt [GP14, S. 38f.].

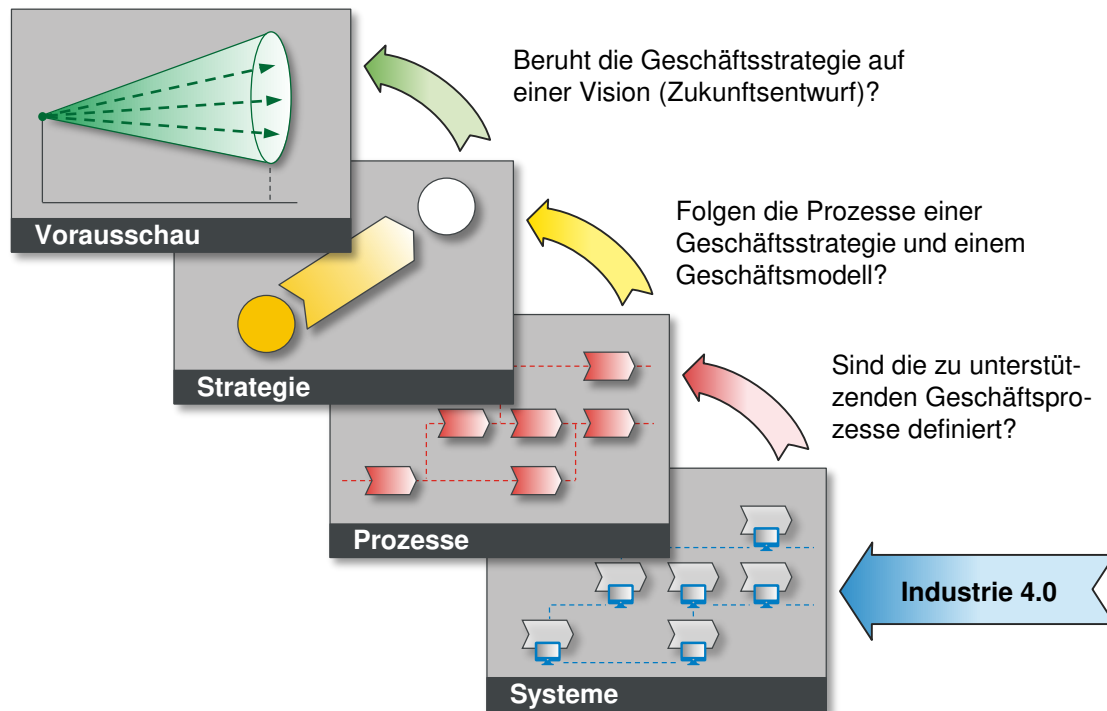


Bild 3-11: Idealtypischer Einführungsprozess neuer Systeme in der Produktion im Vergleich zum gelebten Vorgehen nach [DG18, S. 9]

In der Unternehmenspraxis wird dieser idealtypische Prozess zur Einführung neuer Systeme oft nicht durchlaufen. Insbesondere besitzen kleine und mittlere Unternehmen häufig dafür nicht die notwendigen Ressourcen oder Kompetenzen. Vielmehr wird eine konkrete technische Lösung unabhängig von den Prozessen, der Strategie und der Vorausschau evaluiert. Anschließend werden die Prozesse hinterfragt und geprüft, ob diese noch in die Geschäftsstrategie und den Zukunftsentwurf passen [DG18, S. 9].

Um in der Unternehmenspraxis Anwendung zu finden und einer fundierten Investitionsbewertung gerecht zu werden, muss eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion sowohl eine einfache Anwendbarkeit aufweisen als auch die gegebene Infrastruktur innerhalb von Unternehmen berücksichtigen.

3.3.2 Systemische Betrachtung von Industrie 4.0 Anwendungen

Das aufgezeigte, technologieinduzierte Vorgehen kann weitreichende Folgen mit sich bringen. Große Investitionen in bspw. IT oder Produktionsressourcen können ein Produktionssystem langfristig prägen. Ein Grund dafür sind die Investitionskosten und somit die

langfristige Bindung von finanziellen Mitteln. Da Unternehmen jederzeit auf verschiedenste Umweltaforderungen reagieren können müssen, orientiert sich nach BUCK die Ausgestaltung von Produktionseinheiten am Grad ihrer Umweltturbulenz [Buc09, S. 102], [Hee16, S. 3].

Hinzu kommt, dass eine Industrie 4.0 Anwendung als ein sozio-technisches System mit vielen Abhängigkeiten zu weiteren Systemen verstanden werden kann. Nach BAUER ET AL. ist ein sozio-technisches System das *Zusammenwirken von Beschäftigten, Technologien [...] und Arbeitsorganisation, um eine Arbeitsaufgabe zu erfüllen* [BDD+13, S. 87].

Eine Industrie 4.0 Anwendung ist somit nicht nur als eine technische Lösung oder als ein reines Betriebsmittel an einem Arbeitsplatz zu betrachten, sondern als ein sozio-technisches System, welches Teil eines übergeordneten sozio-technischen Systems ist. Dabei können nach GAUSEMEIER ET AL. fünf Planungsebenen im Rahmen der Arbeitsplanung unterschieden werden. Diese reichen von dem Arbeits- bzw. Betriebsmittel auf der untersten Ebene, über das Arbeitssystem, das Produktionssystem und den Produktionsbetrieb bis hin zum Branchenwertschöpfungssystem [GP14, S. 28]. Bild 3-12 zeigt die Ebenen der Arbeitsplanung.

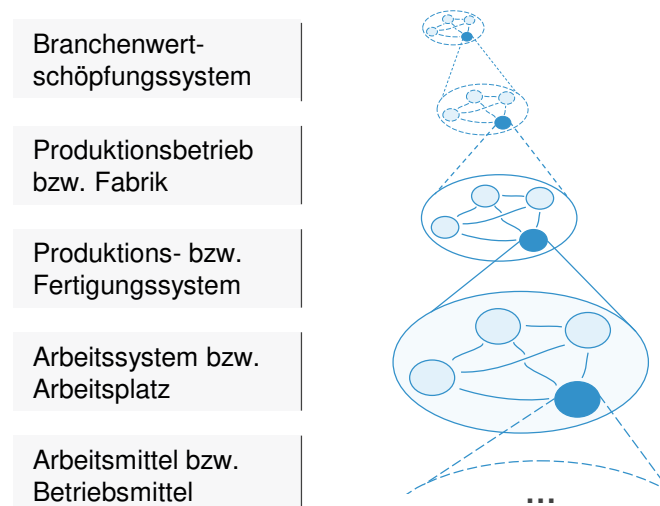


Bild 3-12: Ebenen der Arbeitsplanung nach [GP14, S. 28] und [HWF+12, S. 36]

Folgerungen aus der Systembetrachtung

Eine Industrie 4.0 Anwendung als sozio-technisches System bringt tiefgreifende Herausforderungen für eine Investitionsbewertung mit sich. Nach OBERMAIER haben Unternehmen grundlegende Schwierigkeiten die Wirtschaftlichkeit von Industrie 4.0 Anwendungen zu bewerten. Ein Grund dafür sind häufig unklare Wirkzusammenhänge. So haben neue Technologien bspw. reduzierte Rüstzeiten, höhere Termintreue oder eine höhere Qualität zur Folge. Da diese Auswirkungen häufig im Zusammenspiel mit vielen Systemen entstehen, ist eine monetäre Bewertung schwierig [Obe15, S. 56]. LAUDON ET AL. weisen darauf hin, dass eine Investition in IT einen unmittelbaren Kapitalbedarf erfordert.

Dieser führt jedoch erst sehr verzögert und in vielfältiger, häufig indirekter Form, zu Nutzen [LLS15, S. 843]. OBERMAIER ET AL. bezeichnen die gestiegene Flexibilität, Komplexität und Unsicherheit als die zentralen Herausforderungen einer Investitionsbewertung. So soll mit einer avisierten technischen oder auch organisatorischen Lösung die Produktivität bzw. Flexibilität des Systems gesteigert werden. Dies an sich ist schwierig zu bewerten. Hinzu kommt, dass bspw. eine gesteigerte Komplexität in den Prozessen und in der Organisation zu einer höheren Unsicherheit für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit führen [OHK15].

GÖTZE beschreibt die Herausforderungen von Investitionsbewertungen anhand von fünf Kriterien: Quantitative Nutzung, qualitative Nutzung, temporale Nutzung, Interdependenzweite und Unsicherheit. Je Kriterium wird der Unterschied zwischen einfachen und komplexen Problemstellungen aufgezeigt [Göt14, S. 13]. Im Rahmen der Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion zeigt sich eine starke Tendenz in Richtung komplexer Problemstellungen auf im Vergleich zu klassischen Investitionen.

Die Zeitstruktur der Wertströme stellt bspw. ein Kriterium der **quantitativen Nutzung** dar. Investitionen mit zeitlich konstanten Wertströmen stellen in diesem Rahmen einfache Problemstellungen dar. Komplexe Problemstellungen hingegen besitzen zeitlich variierende Wertströme. Hier zeigt sich bspw. eine eindeutige Entwicklung hin zu einer komplexen Problemstellung, welche durch die Digitalisierung ermöglicht wird. Ein Beispiel stellen Pay-per-Use Modelle dar [Göt14, S. 13].

Das Kriterium **qualitative Nutzung** beschreibt die Dispositionsfreiheit einer Investition. Investitionen ohne Mehrzwecknutzung stellen einfache Problemstellungen dar, während Investitionen mit Mehrzwecknutzungen komplexe Problemstellungen darstellen. Die Investition in einen Fertigungsleitstand in der Produktion stellt ein Beispiel für eine komplexe Problemstellung dar. So kann der Fertigungsleitstand zunächst für eine reine Produktionsplanung eingesetzt werden und später für ein verbessertes Controlling, eine verbesserte Instandhaltung und weitere Use Cases erweitert werden [Göt14, S. 13].

Das Kriterium **temporale Nutzung** gliedert sich in Nutzungsdauer und Wiederholung. Eine zeitliche Bestimmtheit von Investitionen stellt eine einfache Problemstellung dar, während eine zeitlich unbestimmte Investition eine komplexe Problemstellung ist. Insbesondere bei Software zeigt sich eine Entwicklung, dass neue Versionen keine eigenständigen Softwarelösungen darstellen, sondern eine Lösung kontinuierlich geupdated wird. In diesem Zuge fallen auch häufiger geringere Kosten an. Dies ist im Rahmen des Merkmals Wiederholung eine komplexe Problemstellung [Göt14, S. 13].

Die **Interdependenzweite** beschreibt den Verflechtungsgrad einer Lösung. Isolierte Investitionen stellen einfache Problemstellungen dar. Interdependente, bzw. vernetzte Investitionen sind komplexe Problemstellungen. Dies trifft insbesondere auf Software bzw. IT-Systeme zu. Für eine produktive Nutzung sind Schnittstellen zu schaffen und Systeme sowie Datenbanken zu vernetzen. So ist der Fertigungsleitstand im Unternehmen sowohl mit einer Vielzahl an Maschinen in der Produktion als auch mit dem übergeordneten

Enterprise Resource Planning System zu verbinden. Diese benötigen jeweils u.a. eine adäquate Datengrundlage. Dabei müssen teilweise über die eigenen Unternehmensgrenzen hinweg die Kunden und Partner im Wertschöpfungsnetz mit eingebunden werden. Um die Systeme zu etablieren und sinnvoll einzusetzen, werden häufig angepasste Prozesse und Kompetenzen benötigt [Göt14, S. 13].

Das letzte Kriterium stellt die **Unsicherheit** dar. Die Unsicherheit spiegelt sich im Risikomaß einer Investition wider. Einfache Problemstellungen sind bspw. sichere Investitionen. Unsichere Investitionen stellen komplexe Problemstellungen dar. Die Steigerung des Risikos bzw. der Unsicherheit einer Investition ergibt sich aus den vorherigen Merkmalen [Göt14, S. 13].

Aus **systemtheoretischer Sicht** lassen sich Charakteristika einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion unter einer steigenden Vielzahl und Vielfalt an Systemelementen sowie einer steigenden Veränderlichkeit bzw. Dynamik zusammenfassen (vgl. Kapitel 3.1.3) [HWF+15, S. 40]. Dargestellt ist dies in Bild 3-13.

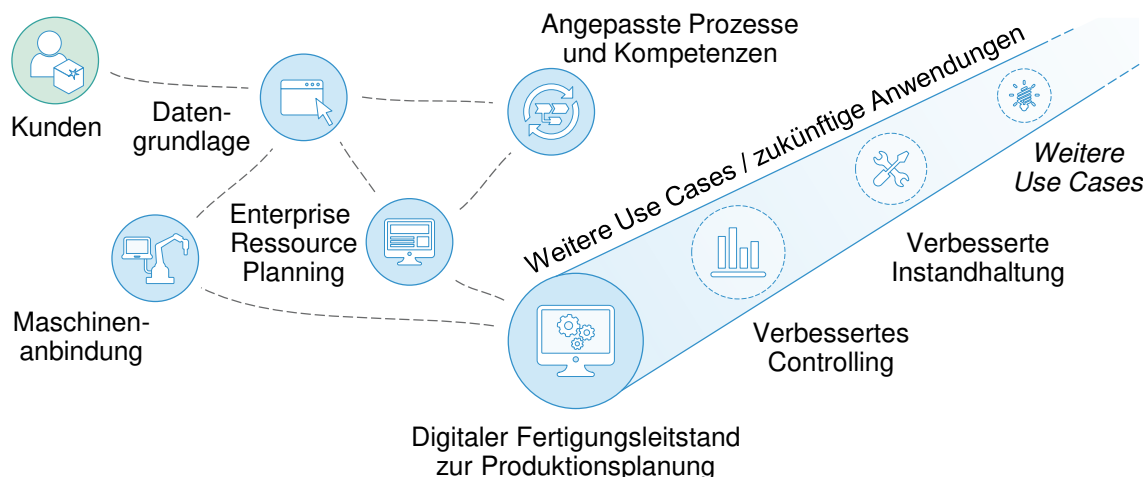


Bild 3-13: Investitionsentscheidungen in Industrie 4.0 Anwendungen aus systemtheoretischer Sicht in Anlehnung an [Göt14, S. 13] und [HBF+15, S. 33ff.]

Die steigende Vielzahl und Vielfalt an Systemelementen lässt sich am Beispiel eines Fertigungsleitstands verdeutlichen. Dieser erfüllt seine Funktionen i.d.R. nur im vollen Umfang, wenn der Fertigungsleitstand mit weiteren Systemen vernetzt ist. Das können bspw. ein Enterprise Resource Planning System oder auch Maschinen in der Produktion sein. Eine umfassende und zusammenhängende Datengrundlage ist dabei essentiell. Um diese zu bekommen, sind häufig Prozesse anzupassen, Kompetenzen mit den Systemen aufzubauen oder auch Kunden mit einzubinden.

Hinzu kommt die Veränderlichkeit bzw. die Dynamik im Sinne der zuvor beschriebenen Erweiterbarkeit des Systems. Dabei ist die Industrie 4.0 Anwendung häufig als eine Art Infrastruktur bzw. als eine Art Plattform für eine Vielzahl an möglichen Funktionen, Anwendungen und resultierenden Use Cases zu verstehen. Um den Nutzen dieser Plattform zu bewerten gilt es somit, zukünftige Funktionalitäten und Nutzenpotentiale zu

antizipieren. Diese Nutzenpotentiale haben jedoch einen sehr langfristigen und unsicheren Charakter [JEK+19, S. 486]. Die Nutzenpotentiale belastbar abzuschätzen und zu bewerten stellt eine zentrale Herausforderung dar. Bspw. ist *die Implementierung einer durchgängigen EDV-Lösung [...] eine sehr langfristige und kapitalintensive Investitionsentscheidung*. Diese Langfristigkeit des gebundenen Kapitals führt an sich zu einer erhöhten Unsicherheit im Investitionsprozess [Bun09, S. 626].

Die Betrachtung der Industrie 4.0 Anwendung als ein sozio-technisches System mit seinen vielfältigen Beziehungen zum umliegenden System impliziert, dass es viele Sichtweisen auf das System gibt. Im Rahmen der Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion gilt es die vielfältigen Beziehungen zu spezifizieren und die unterschiedlichen Sichten auf das System dabei zu berücksichtigen. Somit sind verschiedenste Stakeholder in die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion einzubeziehen.

3.3.3 Handlungsfeld 2: Analyse der Industrie 4.0 Anwendung aus systemtheoretischer Sicht

Das aufgezeigte technologieinduzierte Vorgehen zur Einführung neuer Systeme in der Industrie gilt es im Rahmen einer Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion aufzugreifen. Dabei ist die Industrie 4.0 Anwendung als sozio-technisches System innerhalb eines übergeordneten sozio-technischen Systems zu betrachten. In diesem Zuge sind sowohl die Wechselwirkungen in einem System als auch die Wechselwirkungen des Systems mit naheliegenden sowie dem übergeordneten System zu berücksichtigen. Dies erfordert eine Analyse der Industrie 4.0 Anwendung aus systemtheoretischer Sicht. Konkret sind so bspw. die gegebenen Rahmenbedingungen und Infrastrukturen in der Produktion zu berücksichtigen.

3.4 Investitionsentscheidungen

Das Betriebsgeschehen wird nachhaltig von Investitionsentscheidungen beeinflusst. Durch ihre langfristige Kapitalbindung können sie nicht *ohne erheblichen Aufwand und Kosten rückgängig* gemacht werden. Darüber hinaus fallen die *ihnen zugerechneten Aufwändungen und Kosten i.d.R. beschäftigungsunabhängig an, so dass sich bei Rückgang der Auslastung die Stückkosten erhöhen* [Hee16, S. 3].

Investitionen können je nach Umfang einen grundlegenden Einfluss auf ein (Produktions-)System bzw. dessen Wirtschaftlichkeit haben. Wie auch ein Produktionssystem kann eine Investition bzw. ein Investitionsprozess eigene Ziele besitzen [EMW13]. Diese werden in Kapitel 3.4.1 beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 3.4.2 auf Strukturierungsansätze von Investitionsarten eingegangen. In Kapitel 3.4.3 wird ein generisches Vorgehen zur Durchführung von Investitionsentscheidungen aufgezeigt. In Kapitel 3.4.4 wird auf die Herausforderungen von Investitionsentscheidungen und in Kapitel 3.4.5 auf

die benötigten Daten zur Bewertung von Investitionen eingegangen. Abschließend wird in Kapitel 3.4.6 das dritte Handlungsfeld dieser Arbeit hergeleitet.

3.4.1 Ziele von Investitionen

Nach ERMSCHEL ET AL. lassen sich die folgenden fünf Ziele definieren, welche die Vorteilhaftigkeit einer Investition definieren: Im Rahmen des ersten Ziels Rentabilitätsmaximierung ist die Vorteilhaftigkeit durch eine *möglichst hohe Verzinsung des eingesetzten Kapitals* definiert. Ist eine Vermögensmaximierung das Ziel, gilt eine Investition als vorteilhaft, sofern sie möglichst viele Geldeinheiten, *in Form von Cash*, generiert. Bei dem Ziel Gewinnmaximierung, wird der absolute oder durchschnittliche Periodengewinn als Kriterium genutzt. Sofern einer Investition keine Einzahlungen zuzuordnen sind, kann das Kriterium Kostenminimierung zur Bestimmung der Vorteilhaftigkeit genutzt werden. Das fünfte Ziel Amortisationsdauerminimierung fußt auf dem Sicherheitsbestreben eines Investors, welcher einen möglichst schnellen Rückfluss der Mittel anstrebt [EMW13, S. 32].

ERMSCHEL ET AL. betonen, dass *die aufgeführten Ziele [...] zum Teil im Widerspruch zueinander* stehen [EMW13, S. 32]. So lässt sich bspw. ein Renditebestreben mit einer großen Sicherheit und hoher Liquidität nicht ohne weiteres miteinander vereinen [EMW13, S. 32]. Dieses Spannungsfeld wird im „magischen Dreieck“ der Investitionsziele vereinfacht aufgezeigt. Dargestellt ist dies in Bild 3-14.

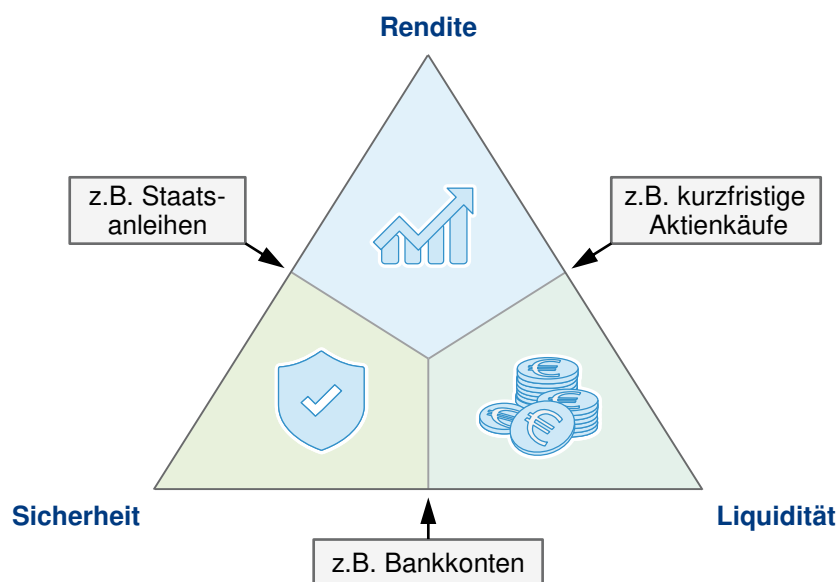


Bild 3-14: „Magisches Dreieck“ der Investitionsziele nach [EMW13, S. 34]

Deutlich wird das aufgezeigte Spannungsfeld von Rendite, Sicherheit und Liquidität anhand der drei folgenden Beispiele für Geldanlagen. Ein Beispiel für eine Anlage mit hoher Sicherheit und einer hohen Rendite stellen Staatsanleihen dar. Diese sind jedoch häufig sehr langfristig, weshalb nahezu keine Liquidität gegeben ist. Ein Beispiel

für eine mögliche, hohe Rendite und eine hohe Liquidität stellen kurzfristige Käufe und Verkäufe von (Einzel-)Aktien dar. Hohe mögliche Renditen und kurzfristige Verfügbarkeit des Geldes gehen zu Lasten der Sicherheit. Dementgegen ermöglichen Geldanlagen auf einem Bankkonto eine hohe Sicherheit und eine hohe Liquidität. In diesem Fall ist die Rendite i.d.R. sehr gering [Ste00, S. 79ff.].

Bei Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion existiert eine ähnliche Problematik. So können bspw. neuartige Pay-per-Use Modelle die Investitionskosten von teuren Maschinen drastisch reduzieren und so die Liquidität eines Unternehmens unbeeinträchtigt lassen. Die Sicherheit ist bei einer entsprechenden Maschine hoch, da ausschließlich für die Nutzung der Maschine im Produktiveinsatz bezahlt wird. Auf Grund hoher Kosten ist die Rendite jedoch ggf. geringer. Somit gilt es im Rahmen einer Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion die Investitionsziele zu berücksichtigen.

3.4.2 Strukturierung von Investitionsarten

Investitionen lassen sich nach unterschiedlichen Betrachtungsweisen beschreiben und strukturieren. Im Folgenden werden verschiedene Definitionen unterschieden und der Begriff nach dem Anlass sowie nach dem betrachteten Objekt strukturiert.

Es gibt zahlreiche Definitionen des Investitionsbegriffs [LB91, S. 151]. Nach bspw. [LB91, S. 151f], [OR09, S. 23f], [Göt14, S. 5f] werden in der Betriebswirtschaftslehre die folgenden vier Begriffsgruppen unterschieden: Der **vermögensbestimmte** Investitionsbegriff sieht eine Investition als die Umwandlung von Kapital in Vermögen bzw. eine Kapitalverwendung an. Grundlage ist die Bilanz mit der Vermögensstruktur (bzw. der Kapitalverwendung) auf der Aktivseite und der Kapitalstruktur (bzw. der Kapitalherkunft) auf der Passivseite [EMW13, S. 27], [LB91, S. 151]. Im Rahmen des **zahlungsbestimmten** Investitionsbegriffs wird eine Investition als Zahlungsstrom charakterisiert. Die Investition beginnt mit einer Auszahlung und erzeugt zu einem späteren Zeitpunkt Einzahlungen und ggf. Auszahlungen [Göt14, S. 5]. Bei dem **kombinationsbestimmten** Investitionsbegriff ist eine Investition eine Kombination aus *beschafften materiellen Anlagengütern* oder *[die Eingliederung von materiellen Anlagegütern in] bereits vorhandene materielle Anlagegüter* [Göt14, S. 5]. Der **dispositionsbestimmte** Investitionsbegriff besagt, dass die Dispositionsfreiheit eines Unternehmens durch die benötigten finanziellen Mittel für eine Investition verringert wird. Die Definitionen sind nicht trennscharf [LB91, S. 151f.]. Je nach verwendetem Begriff lassen sich alternative Typologien der Investitionsarten erstellen [EMW13, S. 29].

Die Definitionen zeigen unterschiedliche betriebswirtschaftliche Sichtweisen auf eine Investition. Bei einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung kommen Sichtweisen von Stakeholdern mit verschiedensten fachlichen Hintergründen hinzu. Für eine eindeutige Bewertung wird ein einheitliches Verständnis benötigt.

Investitionsanlässe

Es gibt zahlreiche Anlässe für Investitionen. GÖTZE unterscheidet zwischen laufenden Investitionen sowie Ergänzungs- und Einrichtungsinvestitionen. Laufende Investitionen können wiederum in Ersatzinvestitionen und Großreparaturen untergliedert werden. Ergänzungsinvestitionen lassen sich in Erweiterungs-, Sicherungs- und Veränderungsinvestitionen gliedern. Veränderungsinvestitionen können Rationalisierungs-, Umstellungs- und Diversifizierungsinvestitionen darstellen [Göt14, S. 10]. Abgebildet ist die Strukturierung nach dem Investitionsanlass in Bild 3-15.

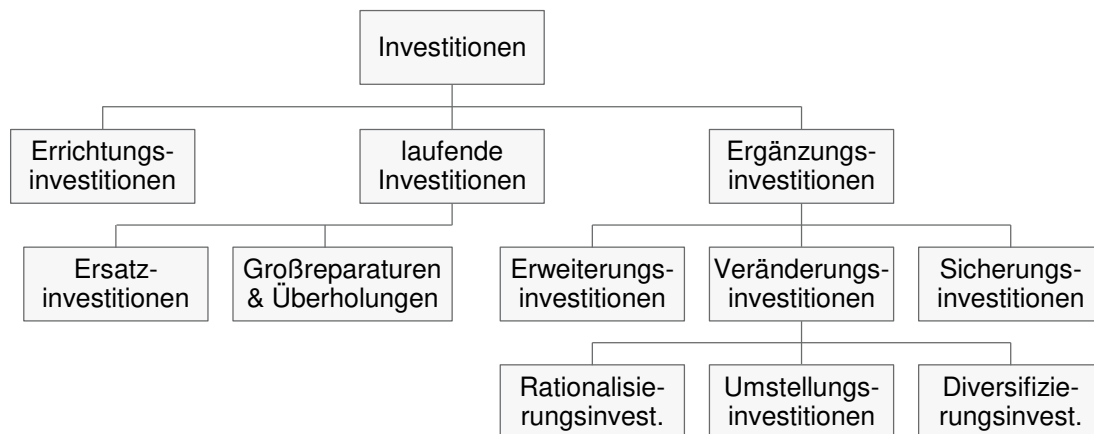


Bild 3-15: Strukturierung von Investitionen nach dem Investitionsanlass nach [Göt14, S. 10]

Die aufgezeigte Strukturierung von Investitionen nach deren Anlass stellt ausschließlich idealtypische Ansätze dar. Eine Investition in einer Produktion umfasst häufig mehrere Ansätze. Fällt bspw. eine Maschine aus und muss ersetzt werden, ist dies zum einen eine Ersatzinvestition. Zum anderen kann die Investition als Erweiterungs- oder Rationalisierungsinvestition verstanden werden, da die neue Maschine i.d.R. neue Funktionen oder bessere Spezifikationen besitzt. Gleichmaßen kann damit auch eine Umstellungsinvestition verbunden sein. Die Strukturierung lässt sich insbesondere auf realwirtschaftliche Investitionen wie im genannten Beispiel anwenden [Göt14, S. 9]. Dies stellt einen Investitionstyp dar. Die Investitionstypen werden im Folgenden erläutert.

Investitionstypen nach dem Objektkriterium

Eine weitere Strukturierung von Investitionen richtet sich nach dem Investitionsobjekt. Dies lässt sich in Finanz- und Realinvestitionen gliedern. Finanzinvestitionen stellen *Kapitalbindungen in finanziellen Anlageformen* dar [Göt14, S. 8]. Sie lassen sich in spekulative und in anlageorientierte Investitionen untergliedern. *Realinvestitionen* sind entweder *materielle bzw. güterwirtschaftliche [oder] immaterielle bzw. Potentialinvestitionen* [Göt14, S. 8]. Materielle Investitionen können bspw. Produktionsressourcen sein, während Potentialinvestitionen z.B. Aus- und Weiterbildungen sein können [Göt14, S. 8]. Dargestellt ist die Strukturierung nach dem Objektkriterium in Bild 3-16.

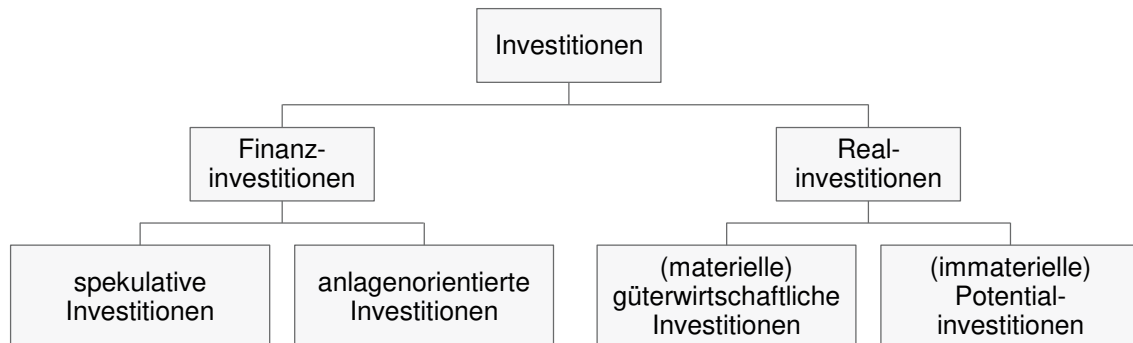


Bild 3-16: Strukturierung von Investitionen nach dem Objektkriterium nach [Göt14, S. 8]

Nach ERMSCHEL ET AL. lässt sich die Strukturierung nach dem Investitionsobjekt zudem die Unterscheidung zwischen bilanzierbaren und nicht bilanzierbaren Investitionen ergänzen [EMW13. 29].

Wie auch bei der Strukturierung nach dem Investitionsanlass, können Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen eine Mischform der aufgezeigten Investitionstypen nach dem Objektkriterium darstellen. So kann bspw. der Kauf einer Maschine mit Schulungen verbunden sein. Das bedeutet es wird eine materielle, güterwirtschaftliche Investition mit einer immateriellen Potentialinvestition verbunden. Im Rahmen der Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung sind daher verschiedenste Aspekte von Investitionen mit den einhergehenden Kosten und Nutzen zu berücksichtigen.

Merkmale von Investitionen

Unabhängig von dem Investitionsanlass und dem Investitionstyp lassen sich Entscheidungsmodelle nach den Kriterien (Un)Sicherheit, Alternativen, Ziele und Zeit klassifizieren [Göt14, S. 46]. Dargestellt sind die Merkmale von Entscheidungsmodellen in Bild 3-17.

Das Kriterium **(Un)Sicherheit** besitzt die zwei Ausprägungen Sicherheit und Unsicherheit. Die Entscheidungssituation wird je nach Umfang der Informationsbasis definiert [Bar11, S. 241f.]. Sicherheit stellt einen Umweltzustand dar, bei dem die Konsequenzen des Handelns bekannt sind [RM05, S. 20]. Das bedeutet, es *besteht volle Kenntnis darüber, was gewollt wird, zwischen welchen Handlungsalternativen gewählt werden kann [...] [und] welche Umweltsituation eintreten wird* [Bar11, S. 242].

Der Umweltzustand der Unsicherheit wird wiederum in Unwissen, Risiko und Ungewissheit untergliedert⁵. Unwissen beschreibt den Zustand, in dem im Entscheidungsmodell einige Elemente der Entscheidung vollständig unbekannt sind. Beispiele können die Ziele

⁵ GÖTZE bspw. gliedert die Umweltzustände in Unschärfe, Ungewissheit und Risiko. Unschärfe bezeichnet die Entscheidungssituationen bei denen *nicht eindeutig angegeben werden [kann], ob sie wahr oder falsch* sind [Göt14, S. 368]. Dies kann als der Umweltzustand „Unwissen“ in der Definition von BARD-MANN betrachtet werden.

oder die Handlungsalternativen sein. Liegt demgegenüber ausschließlich *über den Eintritt der Umweltzustände keine Sicherheit* vor, liegt entweder eine Entscheidung unter Risiko oder Ungewissheit vor [Bar11, S. 242].





Kriterium	Ausprägung				
 (Un) Sicherheit	Sicherheit		Unsicherheit		
			Unwissen	Risiko	Ungewissheit
 Alternativen	Einzelentscheidung				Programm- entscheidung
	absolute Vorteil- haftigkeit	relative Vorteil- haftigkeit	Nutzungs- dauer	Investitions- zeitpunkt	
 Ziele	ein Ziel		mehrere Ziele		
 Zeit	statisch		dynamisch		
			ein- stufig	mehrstufig	
				starr	flexibel

Bild 3-17: Strukturierung der Merkmale von Entscheidungsmodellen nach [Göt14, S. 46] und [Bar11, S. 242]

Bei Entscheidungen unter Risiko sind die möglicherweise eintretenden Umweltsituationen bekannt, die jedoch *nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden* können [Bar11, S. 242]. Sind den möglicherweise eintretenden Umweltsituationen keine Wahrscheinlichkeiten zuzuweisen, wird dies als Ungewissheit der Entscheidungssituation bezeichnet. Der Eintritt der Umweltzustände wird als gleich wahrscheinlich angesehen [Bar11, S. 243].

Das Kriterium **Alternativen** gliedert sich in Einzel- und Programmentscheidungen⁶. Einzelentscheidungen stellen *einander ausschließende Handlungen* dar [Göt14, S. 45]. Sie können hinsichtlich ihrer absoluten Vorteilhaftigkeit, relativen Vorteilhaftigkeit, Nutzungsdauer und ihres Investitionszeitpunktes charakterisiert werden [Göt14, S. 46]. Bei Programmentscheidungen *wird die Möglichkeit der simultanen Realisierung mehrerer Handlungen explizit einbezogen* [Göt14, S. 45].

⁶ Insbesondere die Unterscheidung hinsichtlich Einzel- und Programmentscheidungen ermöglicht eine Gliederung und Zuweisung von Methoden der Investitionsrechnung. Nach ERMSCHEL ET AL. werden die klassischen Partialmodelle wie bspw. die Kapital- oder die Annuitätenmethode den Einzelentscheidungen zugeordnet, während die lineare Programmierung ein Beispiel zur Lösung von Programmentscheidungen darstellt [EMW13, S. 34].

Im Rahmen der **Ziele** kann zwischen den Ausprägungen „ein Ziel“ und „mehrere Ziele“ unterschieden werden. Es ist weiterhin hinsichtlich der Art der Zielgrößen sowie der Erfassung der Präferenzrelationen zu unterscheiden [Göt14, S. 46].

Das Kriterium **Zeit** lässt sich in der Anzahl und der Art berücksichtigter Zeitabschnitte und Handlungszeitpunkte gliedern. Dies spiegelt sich in statischen und dynamischen Entscheidungsmodellen wider. Statische Verfahren berücksichtigen ausschließlich einen definierten Zeitabschnitt [Göt14, S. 46].

Dynamische Entscheidungsmodelle berücksichtigen mehrere Zeitabschnitte. Es wird unterschieden, ob Aktionen nur zu einem Zeitpunkt oder zu mehreren Zeitpunkten möglich sind. Werden Aktionen nur zu einem einzigen Zeitpunkt vorgesehen, kommen einstufige Modelle zum Einsatz. Mehrstufige Modelle sehen Aktionen in mehreren Zeitpunkten vor. Wenn die Folgeentscheidungen dabei nicht von den vorherigen Entscheidungszeitpunkten bestimmt werden, wird das Modell als starr bezeichnet. Wenn die vorherigen Entscheidungszeitpunkte berücksichtigt werden, wird das Modell als flexibel bezeichnet [Göt14, S. 46].

Die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung erfordert ein für die Situation geeignetes Entscheidungsmodell. Die vielfältigen Strukturierungsmerkmale machen eine Unterstützung bei der Auswahl eines geeigneten Entscheidungsmodells notwendig.

3.4.3 Vorgehen zur Durchführung von Investitionsentscheidungen

Eine Investitionsentscheidung bzw. ein Business Case stellt ein Entscheidungsmodell dar [Kru11]. *Den typischen Business Case gibt es nicht.* Es lässt sich jedoch ein typisches Vorgehen eines Investitionsprozesses sowie ein idealtypischer Prozess zur Erstellung eines Business Cases beschreiben [Hee16, S. 3], [Tas13, S. 22].

HEESEN beschreibt ein idealtypisches Vorgehen bei einer Investitionsentscheidung [Hee16, S. 3]. Zu Beginn ist eine Investitionsvorbereitung bzw. -planung durchzuführen. Es werden Ideen für Investitionsalternativen gesammelt und diese hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Fragestellungen analysiert. Anschließend werden im Rahmen der Entscheidungsfindung die Investitionsalternativen berechnet und eine Entscheidung herbeigeführt. Bei einer positiven Bewertung folgt die Umsetzung der Investition. Abschließend ist ein Investitionscontrolling durchzuführen. Dies ist eine Budgetkontrolle in Form eines Soll-Ist-Abgleichs. Sowohl der gesamte Prozess als auch die einzelnen Phasen sind iterativ zu durchlaufen [Hee16, S. 3f.].

TASCHNER konkretisiert das Vorgehen bei einer Investitionsentscheidung in Form eines idealtypischen Prozesses zur Erstellung eines Business Cases mit fünf Phasen. Der Prozess stellt die ersten zwei Phasen Investitionsvorbereitung und -planung sowie Entscheidungsfindung der Investition nach HEESEN detailliert dar. Dieser ist in Bild 3-18 dargestellt.

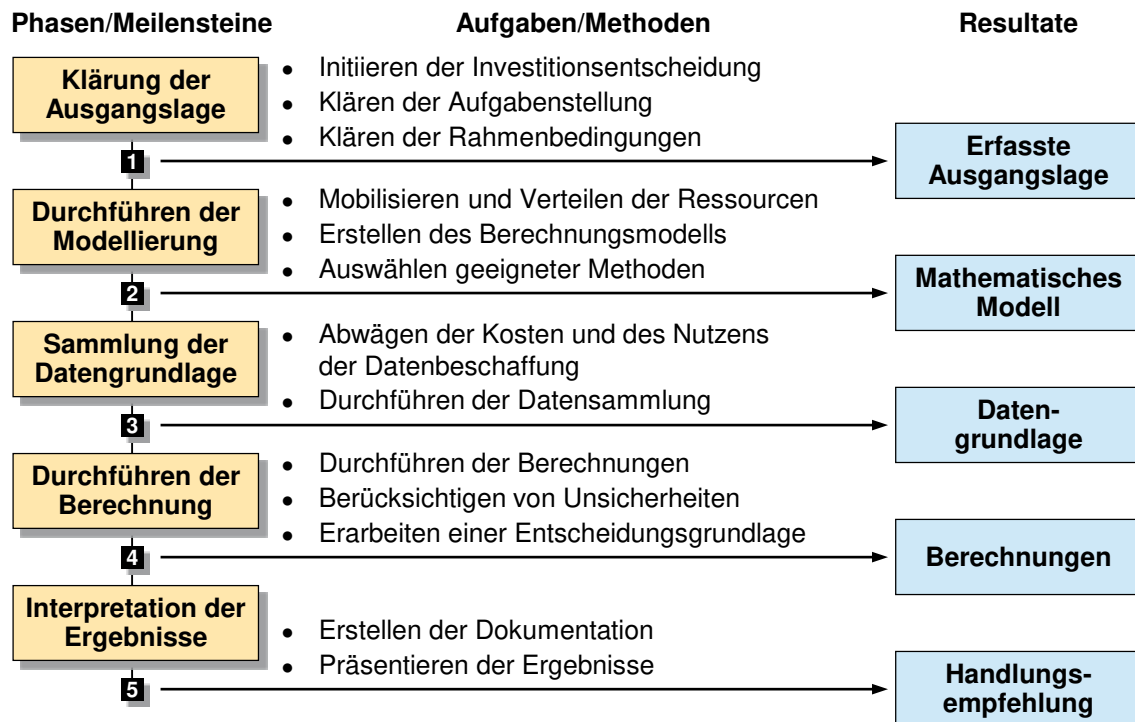


Bild 3-18: Idealtypischer Prozess der Business Case Erstellung in Anlehnung an [Tas13, S. 23]

Phase 1 stellt die **Klärung der Ausgangslage** dar. In diesem Schritt wird der Prozess der Investitionsentscheidung initiiert und die beteiligten Personen werden definiert. Dabei ist zwischen dem Auftraggeber, dem Entscheider und dem Rechner des Business Cases zu unterscheiden. Die drei Rollen können von unterschiedlichen Personen ausgefüllt sein [Tas13, S. 25]. Anschließend ist die Aufgabenstellung zu klären. Dabei ist die *Aufgabenstellung des Business Cases [...] so [zu definieren] [...], dass eine Menge von klar abgegrenzten Alternativen entsteht* [Tas13, S. 25]. Weiterhin sind die Rahmenbedingungen des Business Cases zu klären. Hier sind der zeitliche Rahmen einschließlich der definierten Meilensteine sowie die personellen und finanziellen Ressourcen zu klären. Das Resultat der ersten Phase ist die erfasste Ausgangslage [Tas13, S. 25f.].

Am Beginn der Phase 2 steht die **Durchführung der Modellierung**. Dabei ist zu beachten, dass der Business Case die richtige Aufgabenstellung adressiert und diese auch richtig berechnet. Grundsätzlich *unterscheidet sich die Erstellung des Business Cases [ab diesem Punkt nicht mehr] [...] von anderen Arten von Projekten*. Einem typischen Projekt entsprechend sind die Aufgaben zeitlich und inhaltlich zu strukturieren und personelle und finanzielle Ressourcen zu allokalieren [Tas13, S. 26f.].

Im Rahmen der Modellbestimmung wird ein vereinfachtes Abbild der Realität erstellt. Es gilt *das Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen [...] und die realen Zusammenhänge passend nachzubilden* [Tas13, S. 28]. Anschließend folgt die Auswahl einer geeigneten Berechnungsmethode. Diese legt fest *mit welchen finanzmathematischen Regeln die Inputs verarbeitet werden und welche Art von Outputs daraus erzeugt wird* [Tas13, S. 28].

Unterschieden wird zwischen statischen und dynamischen Verfahren. Dabei können auch verschiedene Verfahren kombiniert werden. Es ist zu berücksichtigen, dass *nicht alle Methoden immer zum gleichen Ergebnis kommen* [Tas13, S. 29]. Dies kann eine Interpretation erschweren [Tas13, S. 28f.].

Phase 3 ist die **Sammlung der Datengrundlage**. Dies ist ein oftmals vernachlässigter Schritt. Die Beschaffung der Daten ist häufig schwierig und mit hohen Kosten verbunden. Darüber hinaus lässt sich Unsicherheit in einem Business Case nicht eliminieren. Somit ist die Datensammlung ein *Abwägen zwischen den Kosten [...] und den Nutzen, [welche] Daten für die Brauchbarkeit und Robustheit des Business Cases [zu] liefern* [sind] [Tas13, S. 29].

Gegenstand der Phase 4 ist die **Durchführung der Berechnung**. Hier gilt es mit einer geeigneten finanzmathematischen Methode die Inputdaten des Business Cases zu verarbeiten. Dabei ist der Umgang mit der Unsicherheit des Business Cases sowie dessen Darstellung stets zu berücksichtigen [Tas13, S. 30].

Die letzte Phase ist die **Interpretation der Ergebnisse**. Hier sind die Dokumentation zu erstellen und die Ergebnisse zu präsentieren. Der Untersuchungsauftrag, die betrachteten Rahmenbedingungen und die getroffenen Annahmen sind zu beschreiben [Tas13, S. 30f.].

Der idealtypische Prozess zur Erstellung eines Business Cases nach TASCHNER stellt eine mögliche Grundlage für eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion dar. Diesen gilt es insbesondere hinsichtlich der Spezifika von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion zu prüfen, ggf. anzupassen und zu ergänzen.

3.4.4 Herausforderungen bei Investitionsentscheidungen

Es existieren verschiedene Herausforderungen bei Investitionsentscheidungen. Im Folgenden wird zunächst auf ein grundsätzliches Entscheidungsproblem bei einer Investitionsentscheidung eingegangen und beschrieben wie dies typischerweise adressiert wird. Anschließend werden die möglichen Auswirkungen von Investitionsentscheidungen und die damit einhergehenden Herausforderungen analysiert.

Entscheidungsproblem im Rahmen von Investitionen

Die Aufgabe einer Wirtschaftlichkeits- bzw. einer Investitionsbewertung stellt ein Entscheidungsproblem dar. Dies impliziert diverse Herausforderungen unabhängig von dem Vorgehen zur Erstellung eines Business Cases und den Zielen einer Investition entsprechend dem Magischen Dreieck der Investitionsziele (vgl. Kapitel 3.4.1). Nach TASCHNER scheitern die allerwenigsten Business Cases an einem mangelnden mathematischen Know-how. Die Berücksichtigung der Rahmenbedingungen und die Bestimmung des „richtigen“ Business Cases stellen deutlich größere Herausforderungen dar. Dabei ist zu

beachten, dass der Business Case die „richtige Frage“ beantwortet und diese „richtig berechnet“, d.h. dass die richtigen Methoden eingesetzt werden [Tas13, S. 25f.].

Bild 3-19 zeigt eines der grundlegendsten Entscheidungsprobleme im Rahmen von Investitionen⁷. Es ist die Frage zu klären: Soll in eine heute verfügbare technische Lösung investiert oder das Geld anderweitig genutzt werden? Diese Fragestellung spiegelt den Investitionstyp wider (vgl. Kapitel 3.4.2). Die Vielfältigkeit an Realinvestitionen stellt eine Herausforderung der Selektion an sich dar. Realinvestitionen können technische Investitionsobjekte aber auch Finanzinvestitionen in Form von Anlageinstrumenten am Kapitalmarkt sein. So kann bspw. in die Produktion investiert werden, um Tablets einzuführen, in die Logistik, um diese zu automatisieren oder in das Engineering, um eine neue Software anzuschaffen. In allen Unternehmensbereichen gibt es nahezu unzählbare Beispiele für Investitionsmöglichkeiten [Hee16].

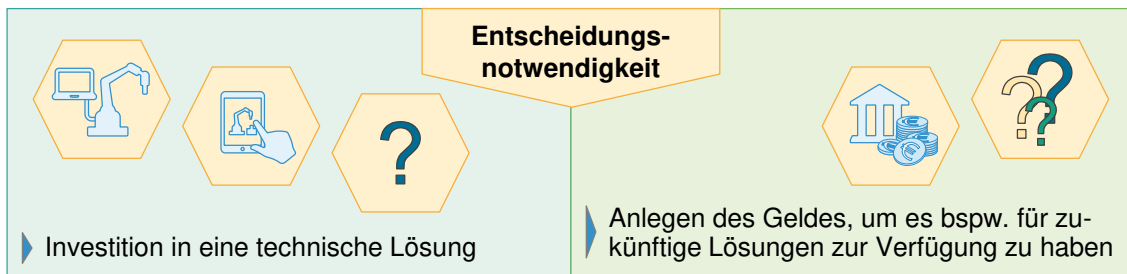


Bild 3-19: Entscheidungsproblem im Rahmen von Investitionen in Anlehnung an [Hee16]

Ist die Wirtschaftlichkeit einer möglichen Investition zu bewerten bzw. sind mehrere mögliche Investitionen gegeneinander abzuwiegen, kommen Methoden der Investitionsrechnung zum Einsatz. Beispiele sind die Kapitalwertmethode, die Interne Zinsfuß-Methode oder die Annuitätenmethode [Hee16, S. 5]. Ein Beispiel zur Berechnung des Barwerts mit Hilfe der Kapitalwertmethode ist in Bild 3-20 dargestellt. Grundlage für die Berechnung des Barwerts sind die Cash Flows bzw. Ein- und Auszahlungen einer Investition über alle abzubildenden Zeitperioden. Diese werden mit Hilfe eines Kalkulationszinssatzes auf den heutigen Zeitpunkt abgezinst [Göt14, S. 78].

Der Kapitalwert stellt *die Summe aller auf einen Zeitpunkt ab- bzw. aufgezinsten Ein- und Auszahlungen [dar], die durch die Realisation eines Investitionsobjekts verursacht werden* [Göt14, S. 78]. Dies impliziert, dass alle Informationen bspw. hinsichtlich Effizienz- und Flexibilitätssteigerungen, aber auch Komplexitätssteigerungen und Unsicherheiten in den Cash Flows abzubilden sind. Die benötigte Menge an Inputdaten ist somit nicht nur enorm groß, sondern die *Inputdaten [...] [sind] häufig schwer zu beschaffen, mit Kosten verbunden und trotzdem unsicher* [Göt14, S. 63], [Tas13, S. 29].

⁷ Darüber hinaus können die Finanzierung und mögliche Finanzierungselemente Einfluss auf die Investition besitzen [Kru11]. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit ausgeklammert.

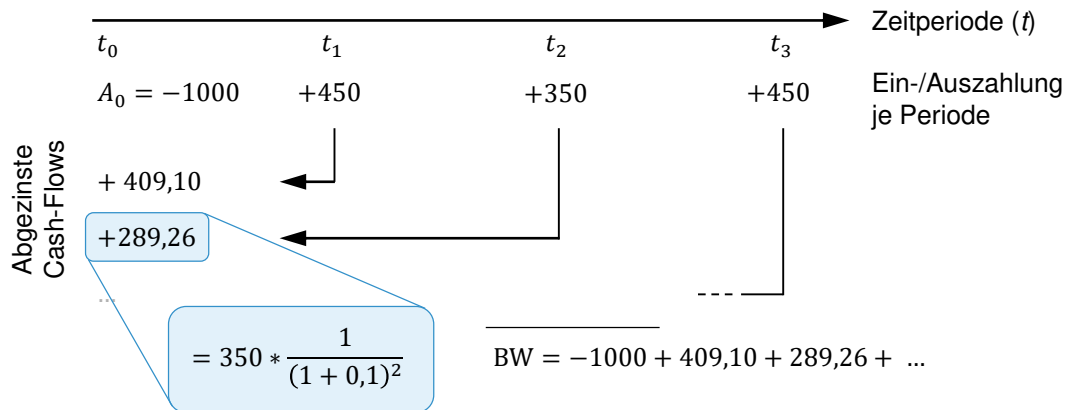
Berechnung des Barwerts (BW)Annahme: Zinssatz $i = 10\%$ 

Bild 3-20: Beispiel der Kapitalwertmethode in Anlehnung an [Göt14, S. 79]

Auswirkungen von Investitionsentscheidungen

Die vielfältigen Auswirkungen einer Investitionsentscheidung werden in den Methoden der Investitionsrechnung nicht vollständig abgebildet. So können die Auswirkungen je nach Art und Größe des Investitionsobjekts unterschiedlich sein. Um die Auswirkungen zu antizipieren, gilt es sie zunächst zu strukturieren.

Wirtschaften wird nicht lediglich als eine geplante Tätigkeit verstanden, sondern als ein planmäßiges Handeln, das sich am ökonomischen Prinzip orientiert [Bar11, S. 124]. Das ökonomische Prinzip oder auch Rationalprinzip dient in diesem Zusammenhang zur Definition von Zielen. Es ist *wertneutral und systemunabhängig, da es lediglich die Durchführung wirtschaftlichen Handelns charakterisiert, nicht jedoch die damit verfolgten Ziele* [Mül06, S. 1f.], [Pau15, S. 32f.].

Das ökonomische Prinzip stellt Inputminimierung (oder Minimalprinzip) und Outputmaximierung (oder Maximalprinzip) als die zwei rationalen Ziele gegenüber [Pau15, S. 32f.]. Bei der **Inputminimierung** wird der Output als fix angesehen. Der Input gilt als variabel und ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu minimieren. Bei der **Outputmaximierung** wird der Input als fix angesehen. Der Output gilt als variabel und ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu maximieren. Die Maximierung des Outputs bei gleichzeitiger Minimierung des Inputs gilt als nicht rational [OR12, S. 4], [Pau15, S. 32f.]. BARDMANN weist darauf hin, dass das ökonomische Prinzip in der Realität häufig nicht eingehalten werden kann, da eine *unvollständige Informationslage der Entscheidungsträger* dies nicht zulässt [Bar11, S. 126]. Dargestellt ist der Gegensatz von Inputminimierung zu Outputmaximierung in Bild 3-21.

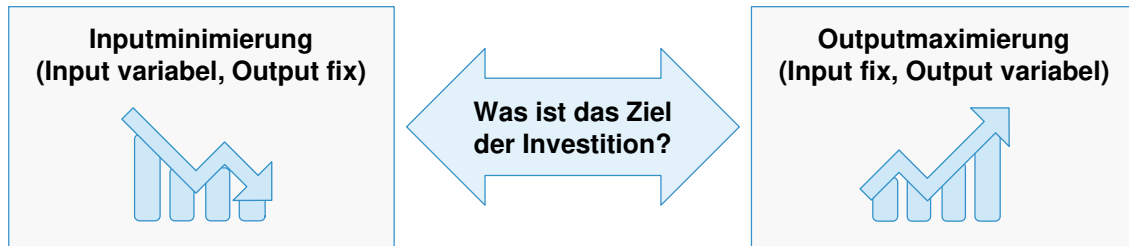


Bild 3-21: Gegensätzliche Ziele im Rahmen des ökonomischen Prinzips in Anlehnung an [Pau15, S. 32]

Ein Beispiel für die Anwendung des ökonomischen Prinzips ist das Ersetzen einer Arbeitskraft durch eine Maschine in einer Produktion, um Prozesse zu beschleunigen und eine Produktion zu rationalisieren. In diesem Fall geht es darum, die gleichen Produkte in gleicher Anzahl und gleicher Ausprägung effizienter zu produzieren. Alternativ kann eine Investition auch getätigt werden, um mehr oder bessere Erzeugnisse zu generieren [JKH+18].

Nach [GP14, S. 12] ist zwischen Erfolg und Liquidität zu unterscheiden. Im internen Rechnungswesen kommen in der Kosten- und Leistungsrechnung die Rechnungsgrößen Erlöse (bzw. Leistungen) und Kosten zum Einsatz. Die Kosten- und Leistungsrechnung *fokussiert ausnahmslos auf betriebszweckbezogene wirtschaftliche Vorgänge* und dient als Controllinginstrument [Ebe10, S. 11]. Es soll somit den Erfolg von etwas abbilden und kann demnach der **Erfolgsebene** zugeordnet werden. In der Investitionsrechnung werden Ein- und Auszahlungen genutzt [Ebe10, S. 9]. Ein- und Auszahlungen stellen Zahlungsmittel dar und lassen sich der **Liquiditätsebene** zuordnen [JKH+18], [MHK11, S. 16].

Im Rahmen einer Investition in die Produktion sind die beiden Ebenen voneinander abzugrenzen, um die Auswirkungen der Investition strukturiert zu ergreifen und voneinander trennen zu können [JKH+18, S. 469]. Die Ebenen der Auswirkungen einer Investition sind in Bild 3-22 gezeigt.

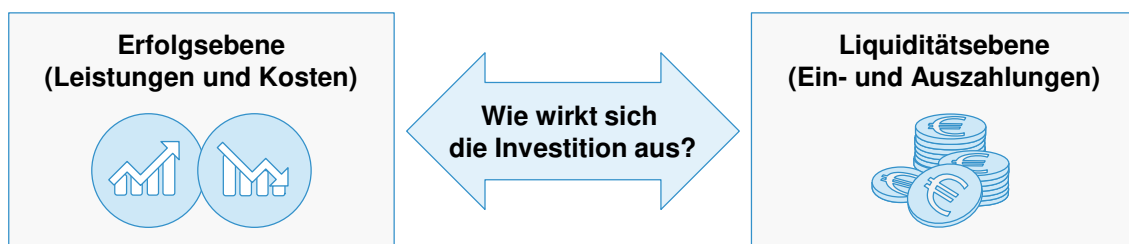


Bild 3-22: Ebenen der Auswirkungen einer Investition in Anlehnung an [Ebe10, S. 9], [JKH+18] und [Wie06, S. 40f.]

Eine Investition kann vorteilhaft aussehen, jedoch auf Grund zeitlich versetzter Finanzströme (d.h. Ein- oder Auszahlungen) unvorteilhaft sein. Dies wird in der Kapitalwertmethode berücksichtigt, da hier die Finanzströme auf den heutigen Zeitpunkt abgezinst

werden. Die Summierung der Werte auf einen Kapitalwert reduziert jedoch die Transparenz über eine Investition. Diese Reduktion an Transparenz kann recht einfach zu „Pseudo-Gewinnen“ bzw. „Pseudo-Einsparungen“ führen. Ein Beispiel für einen „Pseudo-Gewinn“ ist, wenn ein Mitarbeiter durch den Einsatz eines Tablets in der Produktion Effizienzsteigerungen erlebt. Der Mitarbeiter erledigt seine Arbeit um 5% schneller. Bekommt der Mitarbeiter jedoch keine zusätzlichen Aufgaben, oder kann dieser keine anderen Aufgaben auf Grund der Qualifikation oder der räumlichen Zuordnung übernehmen, wird diese Zeit verschwendet [JKH+18, S. 467], [Kru11].

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass in der Fertigung bzw. der Produktion i.d.R. keine direkten positiven Finanzströme erzeugt werden. So kann bspw. eine Effizienzsteigerung Einsparungen von Arbeitszeit bewirken. Das kann als ein Erlös bezeichnet werden. Bei einem gängigen Arbeitsvertrag verdient der Mitarbeiter jedoch nicht weniger, wenn dieser früher gehen kann. Somit ist kein direkter Finanzstrom zu verzeichnen [JKH+18, S. 467].

Anhand des Beispiels zur Einführung von Tablets in der Produktion lässt sich der Unterschied zwischen Erlösen und Einzahlungen bzw. Kosten und Auszahlungen verdeutlichen. Bild 3-23 zeigt exemplarische Verläufe der Rechnungsgrößen. Im oberen Teil der Darstellung sind die Erlöse und Kosten der Investition über die Zeit aufgetragen. Im unteren Teil sind die Ein- und Auszahlungen dargestellt. Positive Werte sind grün, während negative Werte rot dargestellt sind.

Zu Beginn der Einführung von Tablets in der Produktion fallen Kosten an. Das Vorhaben ist zu planen, entsprechende Software und Hardware sind auszuwählen und ggf. Dokumentationen und Schulungen zu erstellen. Diese Kosten sind jedoch nicht alle zwingenderweise Auszahlungen. Bspw. können die Dokumentationen und Schulungen eigenständig erstellt werden, sodass keine direkten Auszahlungen zu tätigen sind [JKH+18, S. 469f.].

Nach einer Einführungsphase werden Effizienzgewinne erwartet, welche bspw. in Arbeitszeiterparnissen resultieren können. Diese Arbeitszeiterparnisse können z.B. genutzt werden, um die Produktqualität zu erhöhen, mehr zu produzieren oder weitere Nebentätigkeiten durchzuführen. Die genannten Beispiele führen i.d.R. jedoch nicht zu einer direkten Steigerung der Finanzströme in Form von gestiegenen Einzahlungen oder gesunkenen Auszahlungen. Im weiteren Verlauf der Zeit fallen vermehrt Reparaturen und Ausfälle an. Gegebenenfalls müssen die Software und die Hardware schließlich entsorgt und ersetzt werden, was zu weiteren Kosten und Auszahlungen führt [JKH+18, S. 469f.].

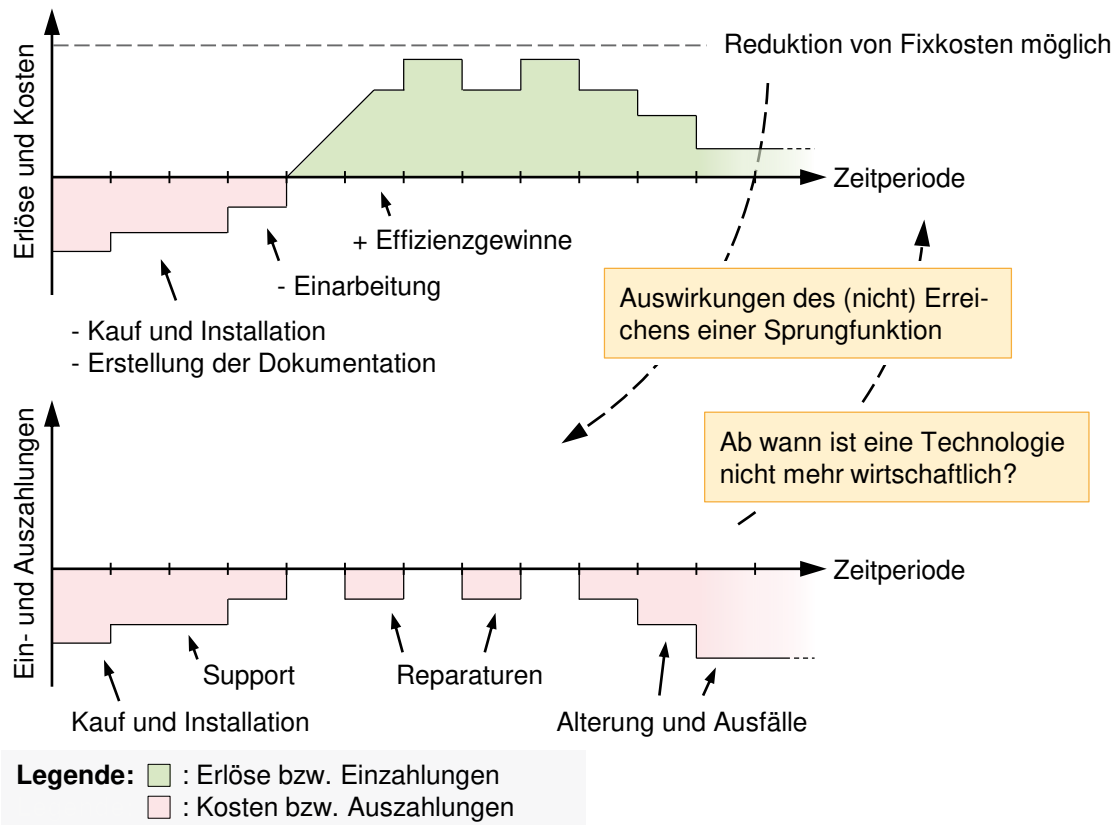


Bild 3-23: Exemplarische Erfolgs- und Finanzströme einer Investition in der Produktion in Anlehnung an [JKH+18, S. 469f.]

Die Erlöse und Kosten können (quasi-)lineare Verläufe besitzen, da Kosten oder auch Erlöse durch Effizienzsteigerungen in nahezu beliebig kleinen Schritten erfasst werden können. Die Finanzströme hingegen sind i.d.R. Sprungfunktionen. Auszahlungen für den Kauf einer Maschine stellen bspw. fixe Werte dar. Gleichmaßen können positive Finanzströme durch den Verkauf einer Maschine erzeugt werden. Da eine Maschine i.d.R. nicht über einen längeren Zeitraum in kleinen Stücken verkauft wird, ist die resultierende Einzahlung wiederum eine Sprungfunktion zum Verkaufsdatum bzw. dem Datum der Einzahlung [JKH+18, S. 469f.].

Bei einer Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion sollen die finanziellen Auswirkungen dieser analysiert werden. Dabei gilt es das grundsätzliche Entscheidungsproblem einer Investitionsentscheidung zu adressieren, die verschiedenen Zielsetzungen im Sinne des ökonomischen Prinzips zu berücksichtigen sowie die Auswirkungen der Investitionsentscheidung auf Erfolgs- und Liquiditätsebene zu analysieren.

3.4.5 Benötigte Daten zur Bewertung von Investitionen

Investitionsrechnungen sind symbolische Entscheidungsmodelle [Kru11, S. 20]. Entsprechend ist das Ergebnis [...] ebenso richtig (beziehungsweise falsch) wie die Ausgangsinformationen des Berechnungsmodells [Kru11, S. 21]. Dies betont die Wichtigkeit einer fundierten Datengrundlage für eine Investitionsentscheidung. Nichtsdestotrotz ist die Datensammlung häufig das *“Stiefkind des gesamten Prozesses“* [Tas13, S. 29]. Der Grund ist, dass die Inputdaten *häufig schwer zu beschaffen* sind, die Beschaffung hohe Kosten impliziert und die Unsicherheit in der Datengrundlage nicht vollständig eliminiert werden kann. Hinzu kommt, dass das Messen der Unsicherheit in der Datengrundlage nur unter sehr großem Aufwand möglich ist. Darüber hinaus wird der Output eines Business Cases i.d.R. als wichtiger angesehen als der verwendete Input [BKW16, S. 37], [Tas13, S. 29].

Unter der Voraussetzung, dass eine Investitionsentscheidung mit Hilfe der Kapitalwertmethode berechnet wird, werden die Kosten des Investitionsobjekts, die Zahlungsströme sowie ein Zinssatz für die Kapitalkosten benötigt. Daraus können der Nettobarwert und die Amortisationsdauer berechnet werden. Die Zahlungsströme beinhalten jegliche Aus- und Einzahlungen je Planungsperiode [Kru11]. Kennzahlensysteme und Kostengliederungsstrukturen liefern eine Unterstützung bei der Erfassung der Daten [AG98, S. 883ff.].

Der hohe Aufwand für die Gewinnung einer fundierten Datengrundlage lässt sich an einem Lebenszyklus⁸ einer Ressource in einem Produktionssystem verdeutlichen. Dieser ist an einen typischen Produktlebenszyklus angelehnt. Die Darstellung in Bild 3-24 zeigt die Verläufe von Kosten, Erlösen und Gewinnen über die Phasen Produktionssystemplanung, Entwicklung, Einführung, Reife, Sättigung und Abstieg [JKH+18, S. 468].

Jeder der drei Verläufe Kosten, Erlöse und Gewinne kann beliebig viele Verläufe nehmen. Verdeutlicht wird dies an dem Beispiel alternativer Kostenszenarien in Bild 3-24. Dargestellt ist ein Entscheidungsbaum für Wartungs- bzw. Instandhaltungskosten über mehrere Zeitperioden. In dem Beispiel wird angenommen, dass ein Maschinenausfall in der Zeitperiode (ZP 1) zu einer Wahrscheinlichkeit von 20% eintritt und 500€ kostet. Tritt der Schaden ein und wird die Maschine repariert, sinkt die Wahrscheinlichkeit eines Schadens in ZP 2 auf 5%. Liegt kein Schaden vor, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit in ZP 2 auf 25%. Anschließend gibt es für die ZP 3 erneut mehrere Ausprägungen für die möglichen alternativen Umweltzustände. Nach dieser Logik lässt sich der Entscheidungsbaum weiterführen [JKH+18, S. 467f.].

⁸ Basis sind Ansätze wie das Life Cycle Costing und Total Cost of Ownership wie bspw. nach [VDI2884] und [Kri10]. Grundgedanke ist die Berücksichtigung sämtlicher mit der Beschaffung [...] anfallenden direkten und indirekten Kosten [Mül06, S. 201].

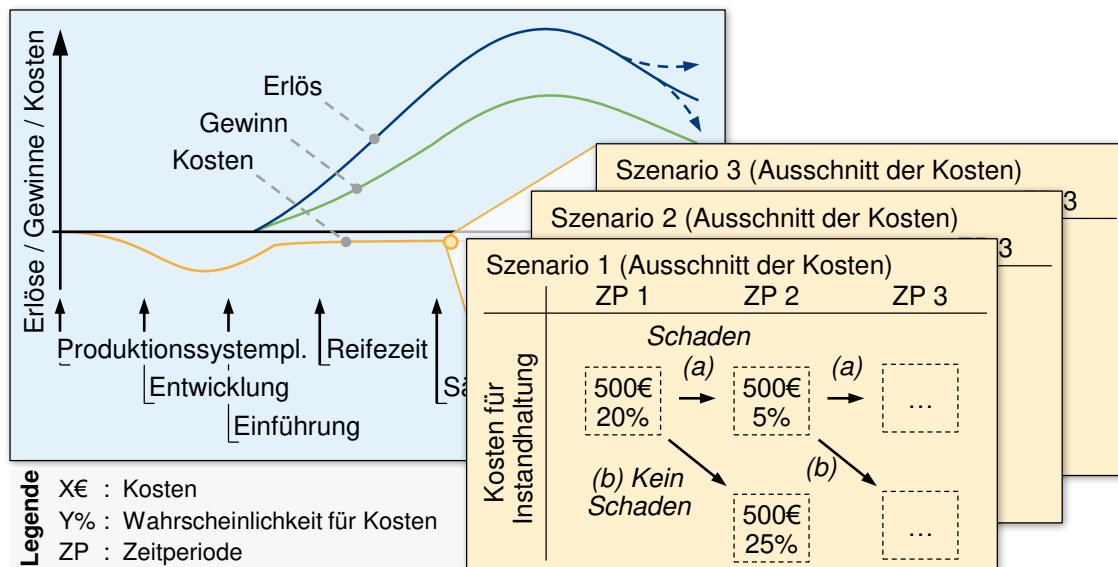


Bild 3-24: Typischer Lebenszyklus einer Ressource in einem Produktionssystem mit Auswirkung auf die Datenbeschaffung nach [EKL07] und [JKH+18, S. 468]

Im Rahmen der Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ist die Berechnung eines oder mehrerer Entscheidungsbäume nicht das Problem. In der Literatur gibt es viele Beispiele zu dem Umgang mit Entscheidungsbäumen. Beispielhaft zu nennen sind [Hun15], [Pet15], [SB09b]. Deutlich schwieriger ist die Vielfalt der möglichen Szenarien und die Beschaffung der Datengrundlage dafür. Je Variation im aufgezeigten Beispiel zur Bestimmung der Instandhaltungskosten kann ein separates Szenario bestimmt werden. Die Informationen dazu liegen häufig nicht vor bzw. sind nur sehr schwierig schätzbar [JKH+18, S. 467f.].

Darüber hinaus betont PÜMPIN, dass Potentiale – und somit auch Digitalisierungspotentiale – einem typischen Lebenszyklus unterliegen. Potentiale an sich zeichnen sich selbst durch eine Langfristigkeit und eine große Unsicherheit in deren Bewertung aus [Püm92]. Zur Bestimmung der Daten kommen häufig Prognoseverfahren zum Einsatz. Diese lassen sich in vergangenheitsbasierte und zukunftsorientierte sowie in qualitative und quantitative Verfahren untergliedern [Bre12, S. 39], [Kru11, S. 17]. Entscheidend ist, dass bei erweiterbaren Softwarelösungen die potentiellen Anwendungen und somit die Potentiale häufig zum Zeitpunkt der Anschaffung bzw. der Einführung noch nicht bekannt sind.

3.4.6 Handlungsfeld 3: Unterstützung bei der Datenerhebung für eine Bewertung

Investitionen lassen sich in vielerlei Hinsicht charakterisieren, strukturieren und analysieren. Zentral dabei sind stets die Ziele einer Investition. Um ein Investitionsobjekt umfassend zu analysieren und zu bewerten, wird in der Regel eine große Datengrundlage benötigt. Dabei ist die Datengrundlage nur schwierig oder unter sehr großem Aufwand zu erlangen. Häufig liegen viele der notwendigen Informationen nicht vor. Daraus ergibt

sich das dritte Handlungsfeld. Es erfordert eine methodische Unterstützung bei der Datenerhebung für eine Investitionsbewertung.

3.5 Problemabgrenzung

Im Rahmen der Problemanalyse wurden drei zentrale Handlungsfelder für eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion identifiziert. Diese sind in Bild 3-25 dargestellt und werden im Folgenden zusammengefasst.

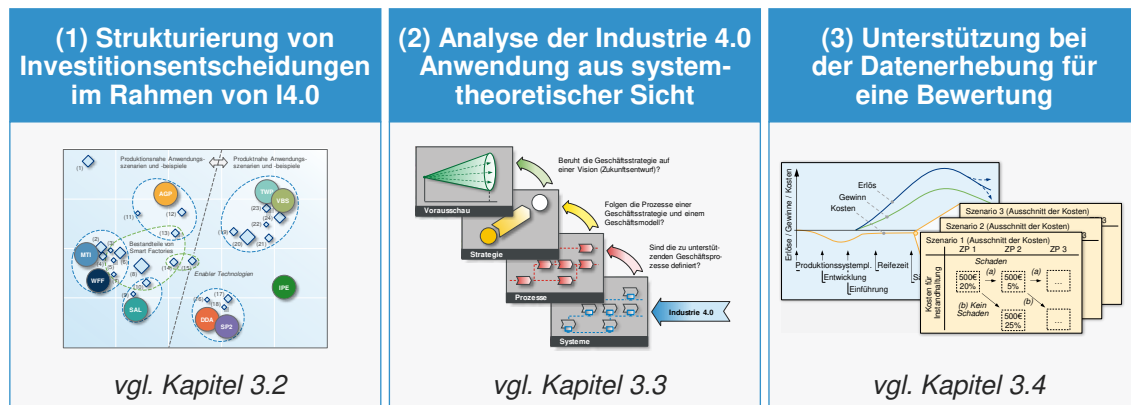


Bild 3-25: Handlungsfelder für eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion

Handlungsfeld 1: Strukturierung von Investitionsentscheidungen im Rahmen von Industrie 4.0

Im Rahmen von Industrie 4.0 gibt es eine schier unzählbare Anzahl an Lösungen für die Produktion. Diese Lösungen bzw. Industrie 4.0 Anwendungen sind häufig sehr unterschiedlicher Natur. Somit gilt es nicht alle Lösungen gleich zu behandeln. Es stellt sich die Frage nach Klassen von Investitionsentscheidungen sowie klassenspezifischen Vorgehen für eine Investitionsbewertung. Die Strukturierung von Investitionsentscheidungen im Rahmen von Industrie 4.0 und die Ableitung adäquater Vorgehen stellt das erste Handlungsfeld dieser Arbeit dar.

Handlungsfeld 2: Analyse der Industrie 4.0 Anwendung aus systemtheoretischer Sicht

Entgegen eines idealtypischen Vorgehens zur Einführung neuer Technologien sind Investitionen häufig technologiegetrieben. So wird in der Unternehmenspraxis oft eine technische Lösung beurteilt, inwiefern diese einen positiven Return on Investment hat, ohne die Auswirkungen auf die Prozesse oder die Organisationsstrukturen zu berücksichtigen. Dabei ist die steigende Komplexität in der Produktion zu berücksichtigen. Darüber hinaus können technische Lösungen je Zielsystem und je Struktur eines bestehenden Produktionssystems grundlegend unterschiedliche Auswirkungen besitzen. Die zahlreichen

technischen und betriebswirtschaftlichen Wechselwirkungen erfordern eine Analyse der Industrie 4.0 Anwendung aus systemtheoretischer Sicht.

Handlungsfeld 3: Unterstützung bei der Datenerhebung für eine Bewertung

Grundlage für jede Investitionsrechnung stellt die Datenerhebung dar. Diese gestaltet sich häufig als problematisch. Gründe dafür sind z.B. der hohe Aufwand für eine fundierte Datenerhebung oder die Unsicherheit der Daten. Ein weiterer Grund ist die Tatsache, dass gewisse Daten in einem Unternehmen nicht vorhanden sind. Somit fordert das dritte Handlungsfeld, den Anwender der zu entwickelnden Systematik bei der Datenerhebung für eine Investitionsbewertung zu unterstützen.

3.6 Anforderungen an die Systematik

Aus den aufgezeigten Handlungsfeldern resultieren zehn Anforderungen an die Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Strukturierung von Investitionsentscheidungen im Rahmen von Industrie 4.0

Im ersten Handlungsfeld wurde die Notwendigkeit für eine Strukturierung von Investitionsentscheidungen im Rahmen von Industrie 4.0 aufgezeigt. Daraus leiten sich zwei Anforderungen ab.

Anforderung 1: Klassifizierung von Investitionsentscheidungen

Der Begriff Industrie 4.0 Anwendung wird in vielen Kontexten genutzt. Die Lösungen sind häufig sehr unterschiedlich. Die multidimensionale Skalierung der Anwendungsszenarien und Anwendungsbeispiele von Industrie 4.0 (vgl. Kapitel 3.2.4) stellt einen Strukturierungsansatz dar. Sie ermöglicht, dass nicht alle Industrie 4.0 Anwendungen gleichbehandelt werden müssen. Um diesen Strukturierungsansatz zielführend zu nutzen, wird eine Klassifizierung von Investitionsentscheidungen erfordert.

Anforderung 2: Industrie 4.0 anwendungsklassenspezifische Vorgehen

Industrie 4.0 Anwendungen sind häufig unterschiedlicher Natur. Im Rahmen einer Investitionsbewertung erfordert dies unterschiedliche Herangehensweisen. Auf Basis der Herleitung von unterschiedlichen Klassen an Investitionsentscheidungen für Industrie 4.0 Anwendungen sind für diese Klassen spezifische Vorgehen zu entwickeln.

Analyse der Industrie 4.0 Anwendung aus systemtheoretischer Sicht

Im zweiten Handlungsfeld Analyse der Industrie 4.0 Anwendung aus systemtheoretischer Sicht wurde aufgezeigt wie vernetzt Industrie 4.0 Anwendungen mit ihren umliegenden, unter- und übergeordneten Systemen sind. Aus dem Handlungsfeld leiten sich die drei folgenden Anforderungen ab.

Anforderung 3: Berücksichtigung der gegebenen Infrastruktur und Restriktionen unter einer systemischen Betrachtungsweise

I.d.R. werden Produktionssysteme nicht von Grund auf neu geplant, sondern erweitert, modifiziert oder zurückgebaut. Wird somit eine neue technische Lösung hinsichtlich ihres Mehrwerts für ein Produktionssystem bewertet, ist es essentiell die aktuellen Infrastrukturen mit in die Betrachtung einzubeziehen. So kann die Integration eines schienengeführten, fahrerlosen Transportsystems auf Grund hoher Investitionskosten nicht wirtschaftlich sein. Sind die Schienen jedoch aus vorherigen Projekten bereits verlegt, mag die Investition als sehr wirtschaftlich gelten. Dieses simple Beispiel zeigt wie die gegebene Infrastruktur die Wirtschaftlichkeit einer technischen Lösung beeinflusst. Im Rahmen einer Investitionsrechnung gilt es die gegebene Infrastruktur und Restriktionen unter einer systemischen Betrachtungsweise zu berücksichtigen.

Anforderung 4: Unterstützung bei der Spezifikation des Investitionsobjekts

Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion stellen an sich komplexe Systeme dar. Weiterhin agieren sie mit zahlreichen anderen sozio-technischen Systemen. Um eine Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung zu bewerten, gilt es die Zusammenhänge zu spezifizieren. Es wird eine Unterstützung bei der Spezifikation des Investitionsobjekts erforderlich.

Anforderung 5: Unterstützung bei der Strukturierung von Industrie 4.0 Potentialen

Die Potentiale von Industrie 4.0 Anwendungen sind häufig komplexer Natur und besitzen einen langfristigen Charakter. Dabei ergeben sich aus einzelnen Industrie 4.0 Anwendungen häufig zahlreiche Potentiale. Gründe dafür sind u.a. die Erweiterbarkeit von Systemen und Funktionen durch Softwareupdates oder ein nicht vorgedachter, alternativer Einsatz von Technologien. Dies erfordert eine Unterstützung bei der Strukturierung von Industrie 4.0 Potentialen in der Produktion.

Unterstützung bei der Datenerhebung für eine Bewertung

Als drittes Handlungsfeld wurde die Unterstützung bei der Datenerhebung für eine Bewertung identifiziert. Daraus leiten sich die drei folgenden Anforderungen ab.

Anforderung 6: Unterstützung bei der Analyse von Annahmen, möglichen Zielsetzungen und Auswirkungen einer Investition

Die Annahmen und Zielsetzungen haben einen grundlegenden Einfluss auf Investitionen. Je nachdem ob eine Investition unter der Prämisse der Inputminimierung oder der Outputmaximierung durchgeführt werden soll, ergeben sich unterschiedliche Prämissen und Interpretationen. Somit gilt es eine Unterstützung bei der Analyse von Annahmen, möglichen Zielsetzungen und Auswirkungen einer Investition zu leisten.

Anforderung 7: Unterstützung bei der Datenerhebung entlang des Lebenszyklus der Investition

Eine fundierte Investitionsbewertung verlangt die Analyse einer Lösung und ihres Umfelds über den gesamten Lebenszyklus. Benötigt wird eine sehr große Menge an Daten, welche in Unternehmen häufig nicht vorhanden sind. Da die Erhebung dieser Daten sehr aufwändig ist und an sich keinen monetären Nutzen stiftet, gilt es hier Unterstützung zu leisten. Neben der Herausforderung der Aufwandsreduzierung ist so die Transparenz über die Annahmen und Rahmenbedingungen sicherzustellen.

Anforderung 8: Unterstützung bei der Bewertung von Nutzenpotentialen

Potentiale von Industrie 4.0 Anwendungen ergeben sich durch konkrete Use Cases wie bspw. einer kontextsensitiven Informationsbereitstellung. Diese Use Cases sind i.d.R. eng verknüpft mit verschiedensten Prozessen im Betrachtungsbereich und somit schwierig zuzuordnen. Die Potentiale zu identifizieren, sie zunächst qualitativ und anschließend quantitativ zu bewerten stellt an sich eine große Herausforderung dar. Dabei gilt es eine Unterstützung zu leisten.

Allgemeine Anforderungen

Neben den in der Problemanalyse erarbeiteten spezifischen Anforderungen an eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion sind die folgenden zwei weiteren allgemeinen Anforderungen zu berücksichtigen.

Anforderung 9: Monetäre Bewertung von Kosten und Nutzen

Ein Grund für den unklaren wirtschaftlichen Nutzen von neuen Technologien ist die Tatsache, dass häufig ordinale und kardinale Bewertungen bei dem Investitionsprozess vermischt werden. So wird bspw. ein Nutzwert von 9 auf einer Skala von 10 Investitionskosten von 100.000 € gegenübergestellt. Dabei bleibt nach wie vor unklar, ob die Investition in Summe sinnvoll ist. Es resultiert die Anforderung sowohl Kosten als auch Nutzen in einer kardinalen, monetären Skala zu bewerten.

Anforderung 10: Einfache Anwendbarkeit

Die Durchführung einer Investitionsrechnung erfordert zahlreiche Schritte und ist u.a. auf Grund der Komplexität der Wirkzusammenhänge in der Produktion mit Aufwand verbunden. Insbesondere haben kleine und mittlere Unternehmen beschränkte Ressourcen, um eine Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen durchzuführen. Somit ist eine einfache Anwendbarkeit für die Akzeptanz einer Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion essentiell. Es wird eine Werkzeugunterstützung gefordert.

4 Stand der Technik

Die vorangegangene Problemanalyse hat den Bedarf einer Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion aufgezeigt. Inhalt dieses Kapitels sind bestehende, repräsentative Ansätze, die im Kontext einer Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion relevant sind. Als Grundlage werden in Kapitel 4.1 zunächst Ansätze der Investitionsrechnung vorgestellt. Darüber hinaus existieren ganzheitliche, domänenspezifische Bewertungsansätze. Diese werden in Kapitel 4.2 vorgestellt. Weiterhin werden in Kapitel 4.3 Ansätze zur Systemanalyse und -bewertung beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 4.4 auf Kennzahlensysteme als Möglichkeit zur strukturierter Datenerfassung eingegangen. Kapitel 4.5 zeigt Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse bzw. -exploration auf und Kapitel 4.6 beschreibt Methoden der Entscheidungsunterstützung. Abschließend werden die Ergebnisse der Bewertung in Kapitel 4.7 zusammengefasst und der Handlungsbedarf aufgezeigt.

4.1 Ansätze der Investitionsrechnung

Die Ansätze der Investitionsrechnung dienen zur Analyse der Vorteilhaftigkeit eines oder mehrerer Investitionsobjekte. Die Ansätze können sowohl zur Vorausschau als auch zur Kontrolle genutzt werden. Heute gibt es bereits eine Vielzahl an Ansätzen, welche sich hinsichtlich Einsatzzweck, Genauigkeit, Randbedingungen und praktischer Durchführbarkeit unterscheiden [Göt14], [WBH+96, S. 30]. Im folgenden Kapitel 4.1.1 werden zunächst die klassischen Methoden der Investitionsrechnung beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 4.1.2 Modelle zur Berücksichtigung von Unsicherheit vorgestellt.

4.1.1 Klassische Methoden der Investitionsrechnung

Die Ansätze der Investitionsrechnung lassen sich hinsichtlich ihrer Berücksichtigung der Zeit in statische und dynamische Verfahren unterscheiden [Göt14, S. 56]. Ein Überblick über die Methoden wird in Bild 4-1 dargestellt.

Zu den statischen Verfahren zählen die Kosten-, die Gewinn- und die Rentabilitätsvergleichsrechnung sowie die statische Amortisationsrechnung. Zu den dynamischen Investitionsrechenverfahren gehören die Kapitalwertmethode, die Annuitätenmethode, die interne Zinssatz-Methode, die dynamische Amortisationsrechnung, die Vermögensendwertmethode, die Sollzinssatzmethode sowie die Methode der vollständigen Finanzpläne. Dieser Gliederung folgend werden in Kapitel 4.1.1.1 ausgewählte statische Verfahren und in Kapitel 4.1.1.2 ausgewählte dynamische Verfahren der Investitionsrechnung vorgestellt.

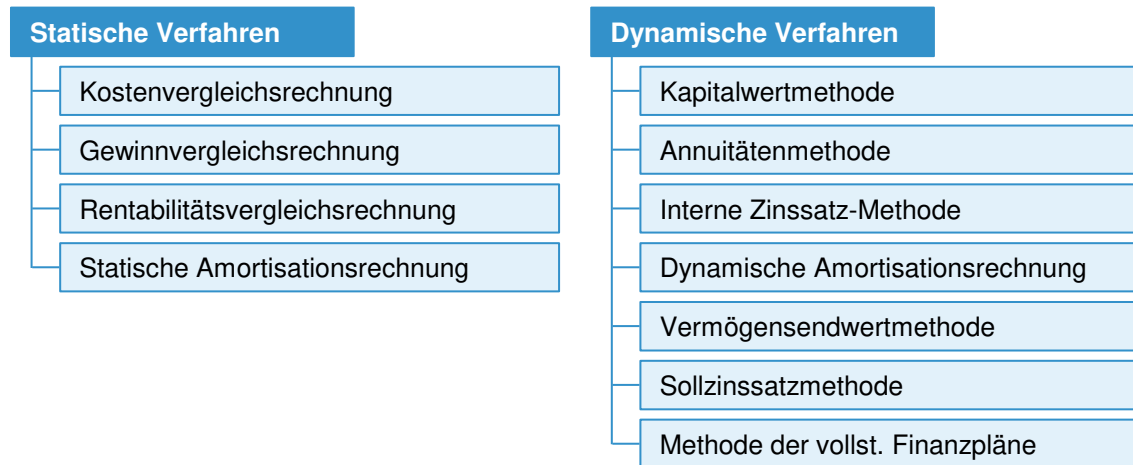


Bild 4-1: Übersicht über die Verfahren der Investitionsrechnung nach [Göt14, S. 56ff.] und [Hee16, S. 5]

4.1.1.1 Statische Verfahren der Investitionsrechnung

Statische Verfahren berücksichtigen ausschließlich eine Zeitperiode. Die Periode wird als repräsentativ für den gesamten Nutzungszeitraum einer Investition angesehen [Göt14, S. 56]. Die Kosten und Erträge einer Investition werden für alle Perioden gleich angesetzt [WBH+96, S. 77]. Weiterhin wird angenommen, dass zwischen Investitionsobjekten keine Interdependenzen vorherrschen sowie die Nutzungsdauer der Investitionsobjekte vorgegeben ist. Am Ende der Nutzungsdauer kann die Investition liquidiert werden [Göt14, S. 55f]. Die statischen Verfahren sind trotz der vereinfachenden Annahmen in der Praxis sehr beliebt. Eine einfache Handhabung und Transparenz sind Gründe dafür [Hee16, S. 6ff], [Tas17, S. 83].

Kostenvergleichsrechnung

Bei der Kostenvergleichsrechnung werden die Kosten von alternativen Investitionen gegenübergestellt, um die Kostengünstigste zu ermitteln. Dabei sind alle durch die geplante Investition verursachten Kosten einzubeziehen. Die Erlöse bzw. der Nutzen einer Investition werden nicht betrachtet. Es wird unterschieden zwischen einer periodischen und einer stückweisen Betrachtung. Bei der periodischen Betrachtung wird unterstellt, dass die Investitionen die gleichen Leistungen bringen bzw. den gleichen Nutzen stiften. Sind die Leistungen der alternativen Investitionen unterschiedlich, ist ein Stückkostenvergleich heranzuziehen [Hee16, S. 6f.], [WBH+96, S. 32f].

Eine Investition wird als absolut vorteilhaft bezeichnet, sofern die Kosten geringer als die Unterlassungsalternative sind. Relativ vorteilhaft ist eine Investition, sofern die Kosten geringer sind als die der anderen zur Wahl stehenden Investitionen [Göt14, S. 58].

Bewertung: Die Kostenvergleichsrechnung stellt einen sehr einfachen Ansatz zum Vergleich von Investitionsalternativen dar. Im Vergleich zu vielen anderen Ansätzen ist die

Datengrundlage sehr einfach zu ermitteln. Die Aussagekraft des Ansatzes ist jedoch u.a. auf Grund der ausschließlichen Kostenbetrachtung stark beschränkt.

Gewinnvergleichsrechnung

Das Entscheidungskriterium der Gewinnvergleichsrechnung ist der durchschnittliche Periodengewinn. Dieser berechnet sich aus der Differenz von Erträgen und Kosten. Somit berücksichtigt die Gewinnvergleichsrechnung auch die Erlöse im Gegensatz zur Kostenvergleichsrechnung [Göt14, S. 65].

Eine Investition wird als absolut vorteilhaft bezeichnet, sofern der Gewinn größer als Null ist. Relativ vorteilhaft ist eine Investition, sofern der Gewinn größer ist als die der anderen zur Wahl stehenden Investitionen [Göt14, S. 65].

Bewertung: Die Gewinnvergleichsrechnung stellt einen sehr einfachen Ansatz zum Vergleich von Investitionsalternativen dar. Sowohl die Erlöse als auch die Kosten werden über den gesamten Zeitraum hinweg zusammengefasst. Dies führt zu Intransparenz in der Berechnung bzw. Interpretation. So ist die Vergleichbarkeit von alternativen Investitionsobjekten nur dann gewährleistet, wenn diese *eine identische Nutzungsdauer und einen identischen Kapitaleinsatz aufweisen* [Hee16, S. 10].

Rentabilitätsrechnung

Bei der Rentabilitätsrechnung wird berücksichtigt, dass Investitionsobjekte unterschiedlich viel Kapital binden. Dabei basiert das Verfahren entweder auf der Kostenvergleichs- oder der Gewinnvergleichsrechnung. Die durchschnittlichen Gewinne bzw. Kosten werden mit dem eingesetzten Kapital ins Verhältnis gesetzt. Das Ergebnis wird als Return on Investment (ROI) bezeichnet [Hee16, S. 10], [WBH+96, S. 46].

Bei mehreren alternativen Investitionsobjekten wird der ROI für alle Investitionsobjekte berechnet. Die Alternative mit dem größten ROI wird als relativ vorteilhaft bezeichnet. Zur Evaluation eines einzelnen Investitionsobjekts gilt es dessen ROI mit einer selbst definierten bzw. *gewünschten Mindestrendite* zu vergleichen [Hee16, S. 11], [Göt14, S. 58].

Bewertung: Wie auch die Kostenvergleichs- und die Gewinnvergleichsrechnung ist die Rentabilitätsrechnung ein sehr einfacher Ansatz zum Vergleich von Investitionsalternativen. Der Ansatz stellt eine statische Betrachtungsweise dar. Das bedeutet, dass die Betrachtung einer durchschnittlichen Periode herangezogen wird und somit vernachlässigt wird, dass es nicht unerheblich ist, wann das Geld mit einem Investitionsobjekt erwirtschaftet wird [Hee16].

Statische Amortisationsrechnung

Bei der statischen Amortisationsrechnung wird bestimmt, ob sich eine Investition in einem bestimmten Zeitraum tilgt bzw. sich selbst trägt. Das bedeutet, es wird der Zeitraum ermittelt, in dem das investierte Kapital über die Erträge einer betrachteten Investition

zurückgewonnen wird. Dazu wird der Kapitaleinsatz zum Rückfluss pro Jahr ins Verhältnis gesetzt.

Die Amortisationsdauer gilt als ein einfaches Maß für die Beurteilung des Investitionsrisikos. Die Rückgewinnung des investierten Kapitals ist umso sicherer, je kürzer die Amortisationsdauer einer Investition ist [Hee16, S. 14], [WBH+96, S. 54]. Da die nach Ende des Planungszeitraums auftretenden Wirkungen der möglichen Investitionen nicht berücksichtigt werden, ist es nicht sinnvoll, *die absolute und die relative Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen allein anhand der Amortisationszeit zu beurteilen* [Göt14, S. 71].

Bewertung: Die statische Amortisationsrechnung stellt einen ergänzenden Ansatz zur Bestimmung des Risikos von Investitionen dar. Als einziges Bewertungskriterium für eine Investition ist der Ansatz jedoch nicht geeignet. Ein Grund dafür ist, dass über den Planungszeitraum hinausgehende Wirkungen nicht berücksichtigt werden [Göt14].

4.1.1.2 Dynamische Verfahren der Investitionsrechnung

Charakteristisch für die dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung ist die explizite Berücksichtigung eines Planungshorizonts. Das bedeutet, es werden je Zeitperiode unterschiedliche Zahlungsströme bestimmt [WBH+96, S. 77f], [Pog15, S. 92]. Diese werden mit einem festgelegten Zinssatz bewertet. Die Kapitalwertmethode, die Annuitätenmethode, die interne Zinssatz-Methode und die dynamische Amortisationsrechnung nutzen einen einheitlichen Kalkulationszinssatz für die Anlage und Aufnahme finanzieller Mittel. Sie fußen somit auf der Annahme des vollkommenen Kapitalmarkts⁹. Die Vermögensendwertmethode, die Sollzinssatzmethode und die Methode der vollständigen Finanzpläne nutzen unterschiedliche Zinssätze [Göt14, S. 77].

Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode (engl. Net Present Value, kurz NPV) gilt als das in der Industrie am weitesten verbreitete Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung [Göt14, S. 87], [Wöh13, S. 493]. *Der Kapitalwert ist die Summe aller auf einen Zeitpunkt ab- bzw. aufgezinsten Ein- und Auszahlungen, die durch die Realisation eines Investitionsobjektes verursacht werden* [BW90]. Mit Hilfe des Kapitalwerts werden somit die gesamten von einer Investition verursachten Zahlungen verglichen. Dazu werden Zahlungen auf das Datum des Investitionsbeginns abgezinst [Bru05, S. 387], [Hee16, S. 25].

Ein Investitionsobjekt wird als absolut vorteilhaft bezeichnet, sofern der Kapitalwert größer als Null ist. Relativ vorteilhaft ist ein Investitionsobjekt, sofern der Kapitalwert

⁹ In einem vollkommenen Kapitalmarkt können finanzielle Mittel in beliebiger Höhe zu einem definierten Zinssatz aufgenommen und angelegt werden. Weiterhin existieren keine Transaktionskosten, Steuern und Abgaben [Göt14, S. 90], [Mül14, S. 381].

größer ist als der der anderen zur Wahl stehenden Investitionsobjekte [Hee16, S. 28], [WBH+96, S. 90f]. Der Kapitalwert berechnet sich entsprechend der Gleichung 4-1:

$$K_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

Gleichung 4-1: Berechnung des Kapitalwerts nach [Hee16, S. 26]

K_0 : Kapitalwert der Investition im Jahr 0

A_0 : Anschaffungszahlung im Jahr 0

CF_t : Cashflow in der Periode t

i : Kalkulationszinssatz

t : Periode

T : Nutzungsdauer der Investition

Bewertung: Der Kapitalwert liefert eine gute Entscheidungshilfe sowohl bei der Bewertung der absoluten Vorteilhaftigkeit einzelner Investitionsobjekte als auch bei der Bewertung der relativen Vorteilhaftigkeit beim Vergleich von mehreren Investitionsobjekten. Die zentrale Herausforderung bei der Anwendung stellt die fehlende Unterstützung bei der Spezifikation des Investitionsobjekts dar, um somit auch die notwendige Datengrundlage abzuleiten. Die Datengrundlage ist insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen häufig nicht vorhanden.

Interne Zinssatz-Methode

Grundlage für die interne Zinssatz-Methode (auch interne Zinsfußmethode bzw. engl. Internal Rate of Return) sind die Modellannahmen der Kapitalwertmethode. Die interne Zinssatz-Methode trifft eine Aussage über die Rentabilität eines Investitionsobjekts. Vereinfacht ausgedrückt stellt sie die Verzinsung einer Investition dar [Göt14, S. 103ff.].

Der interne Zinsfuß ist der Zinssatz bei dem der Kapitalwert einer Investition gleich Null wird. Entsprechend wird zur Berechnung des internen Zinsfußes die Formel des Kapitalwerts gleich null gesetzt [Göt14, S. 103ff.], [WBH+96, S. 99]. Dargestellt ist dies in Gleichung 4-2.

$$K_0 = 0 = -A_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

Gleichung 4-2: Berechnung des internen Zinsfußes [WBH+96, S. 99]

K_0 : Kapitalwert der Investition

A_0 : Anschaffungszahlung im Jahr 0

CF_t : Cashflow in der Periode t

i : Kalkulationszinssatz

t : Periode

T : Nutzungsdauer der Investition

Ein Investitionsobjekt wird als absolut vorteilhaft bezeichnet, sofern der interne Zinssatz größer als der Kalkulationszinssatz ist. Relativ vorteilhaft ist ein Investitionsobjekt, sofern der interne Zinssatz größer ist als der der anderen zur Wahl stehenden Investitionsobjekte [Göt14, S. 104].

Bewertung: Die interne Zinssatz-Methode zeichnet sich insbesondere durch ihre einfache Interpretierbarkeit aus. Wie auch bei der Kapitalwertmethode ist eine der zentralen Herausforderungen die Beschaffung der notwendigen Datengrundlage.

Annuitätenmethode

Annuität bezeichnet eine *regelmäßige und gleichbleibende Zahlung* [Hee16, S. 52]. Grundlage der Berechnung ist die Kapitalwertmethode. Entgegen der Kapitalwertmethode wird somit nicht der Gesamterfolg, sondern der Periodenerfolg aufgezeigt. Die Annuität kann als Wert bezeichnet werden, welcher bei der Durchführung einer Investition je Periode entnommen werden kann [Hee16, S. 52], [WBH+96, S. 112].

Berechnet wird die Annuität durch die Multiplikation des Kapitalwerts mit dem sogenannten Wiedergewinnungsfaktor. Der Wiedergewinnungsfaktor ist abhängig von der Nutzungsdauer und dem Kalkulationszinssatz [Göt14, S. 100]. Er dient zur Umwandlung einer einmaligen Zahlungsgröße in gleichgroße Beträge über eine bestimmte Laufzeit [Wel19a-ol]. Die Annuität berechnet sich entsprechend der Gleichung 4-3:

$$A = K_0 * \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1}$$

Gleichung 4-3: Berechnung der Annuität nach [Hee16, S. 53]

A : Annuität

K_0 : Kapitalwert der Investition

i : Kalkulationszinssatz

T : Nutzungsdauer der Investition

Ein Investitionsobjekt wird als absolut vorteilhaft bezeichnet, sofern die Annuität größer als Null ist. Relativ vorteilhaft ist ein Investitionsobjekt, sofern die Annuität größer ist als die der anderen zur Wahl stehenden Investitionsobjekte. Bei der Einschätzung der Vorteilhaftigkeit liefert die Annuitätenmethode die gleichen Ergebnisse wie die Kapitalwertmethode [Göt14, S. 101].

Bewertung: Die Annuitätenmethode weist, wie die Kapitalwertmethode und die interne Zinssatz-Methode, die Vorteile von dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung auf. Das bedeutet, es werden die Zeitpunkte der Zahlungsflüsse berücksichtigt. Die Inter-

pretation der Annuitätenmethode ist jedoch schwierig bei bspw. physischen Investitionsobjekten in der Produktion. Wie bei den Methoden zuvor, ist die Datenbeschaffung häufig schwierig.

4.1.2 Ansätze zur Berücksichtigung von Unsicherheit

Investitionsentscheidungen in Unternehmen sind in der Regel mit Unsicherheiten behaftet. Auch wenn ein positiver Nutzen aus der Investition erwartet wird, können bspw. Kosten, Erlöse aber auch die Zeitpunkte der Zahlungsströme nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden. Aus diesem Grund sind Unsicherheiten im Rahmen einer Investitionsbewertung zu berücksichtigen [Göt14, S. 367]. Im Folgenden werden ausgewählte Verfahren zur Berücksichtigung von Unsicherheit im Rahmen von Investitionsbewertungen vorgestellt. In Kapitel 4.1.2.1 werden Korrekturverfahren aufgezeigt. Anschließend werden in Kapitel 4.1.2.2 die Sensitivitätsanalyse und in Kapitel 4.1.2.3 die Risikoanalyse beschrieben.

4.1.2.1 Korrekturverfahren

Das Korrekturverfahren ist ein Ansatz bei dem die Inputfaktoren von bspw. einer Investitionsbewertung mit Hilfe von Risikozuschlägen bzw. -abschlägen angepasst werden. Es werden somit pessimistischere Werte angesetzt. Bspw. werden Geldzuflüsse nur mit 90% ihres ursprünglichen Wertes angesetzt, wohingegen Geldabflüsse mit 110% angesetzt werden. Darüber hinaus kann bei der Berechnung eines Kapitalwertes neben den Zahlungsflüssen auch der Kalkulationszinssatz entsprechend angepasst werden. Grundlage der Anpassungen sind die subjektiven Risikoeinschätzungen eines Anwenders [Tas17, S. 122].

Bewertung: Das Korrekturverfahren stellt einen sehr einfachen Ansatz zur Berücksichtigung der Unsicherheiten im Rahmen von Investitionsentscheidungen dar. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich die Werte „richtig“ anzupassen. Somit würden mit diesem Ansatz nur bewusst zusätzliche Fehler akzeptiert. Nach TASCHNER sind die expliziten Korrekturverfahren in der Praxis nur selten anzutreffen. Wichtiger sind jedoch die impliziten bzw. unausgesprochenen Korrekturen bei der Erstellung eines Business Cases, welche bei den Annahmen getroffen werden [Tas17, S. 122].

4.1.2.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse dient zur Untersuchung von Beziehungen zwischen Inputgrößen und Zielwerten. Zwei Arten von Sensitivitätsanalysen werden unterschieden: die Zielgrößen-Änderungsrechnung und die Kritische-Werte-Rechnung. Bei der **Zielgrößen-Änderungsrechnung** wird untersucht, inwiefern sich ein Zielfunktionswert ändert, wenn ein oder mehrere Inputgrößen verändert werden [Bru05, S. 335]. Bei der **Kritische-Werte-Rechnung** wird analysiert, inwiefern eine oder mehrere Inputgrößen variieren dürfen,

damit ein vorgegebener Zielwert erreicht wird. Im Rahmen einer Investitionsrechnung wird bspw. der Wert einer Inputgröße ermittelt, bei dem die betrachtete Investition gerade noch vorteilhaft ist [Göt14, S. 388], [Bru05, S. 338].

Nach BRUGGER sind im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse vier Schritte durchzuführen. Zu Beginn sind die unsicheren Inputfaktoren auszuwählen. Anschließend ist die Höhe der Abweichung der Inputfaktoren zu definieren. In Schritt drei sind die Inputfaktoren um die definierten Werte einzeln zu verändern. Dabei wird angenommen, dass die nicht analysierten Größen konstant bleiben. Abschließend ist die absolute oder prozentuale Veränderung der Zielgröße festzuhalten. So kann die Abhängigkeit der Zielgröße von den Inputfaktoren analysiert werden [Bru05, S. 336]:

Bewertung: Auf Grund seiner einfachen und systematischen Anwendung ist die Sensitivitätsanalyse in der Praxis beliebt [Göt14, S. 400]. Zentrale Herausforderungen sind, dass keine Interdependenzen zwischen Inputfaktoren berücksichtigt werden sowie keine Aussage hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit von variierten Faktoren geliefert wird [Tas17, S. 123]. Die Sensitivitätsanalyse stellt an sich keine Entscheidungsgrundlage für eine Investition dar. Sie gilt ausschließlich als ergänzende Methode [WD13, S. 511], [Bru05, S. 340].

4.1.2.3 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse ist ein Ansatz zur systematischen Analyse von Risiken. Die Ausprägungen unsicherer Inputgrößen werden als Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet. Auf dieser Grundlage lässt sich für die Zielgröße eine Wahrscheinlichkeitsverteilung herleiten, welche zur Entscheidungsfindung genutzt wird. Anders als die Sensitivitätsanalyse betrachtet die Risikoanalyse somit nicht nur die Auswertung eines Entscheidungsmodells, sondern auch dessen Erstellung. Bei den Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Input- und Outputgrößen kann es sich sowohl um diskrete Verteilungen als auch um kontinuierliche Verteilungen wie die Normal-, die Dreiecks-, oder die Trapezverteilung handeln. Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen stellt eine große Herausforderung dar und kann i.d.R. nur mit subjektiven Schätzungen ermittelt werden. Einer der zentralen Gründe ist die Einmaligkeit von Investitionen. Das Vorgehen der Risikoanalyse lässt sich in vier Schritte gliedern [Göt14, S. 400f.].

Im ersten Schritt sind das **Entscheidungsmodell zu formulieren** und die Inputfaktoren zu definieren. Anschließend sind die **Ausprägungen der Inputfaktoren** mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen **abzubilden**. Dabei sind verschiedenste Verteilungsformen möglich. Sie sind vom Anwender auszuwählen. Ein Beispiel einer Verteilungsform ist die Normalverteilung. Bei der Normalverteilung sind der Erwartungswert und die Standardabweichung zu definieren [Göt14, S. 401].

Im dritten Schritt sind die **stochastischen Abhängigkeiten** zwischen den einzelnen Inputfaktoren mit Hilfe von Korrelationsanalysen **festzustellen**. Die ermittelten Korrelationen zwischen den Faktoren können zum einen mit Hilfe von Korrelationskoeffizienten abgebildet werden. Zum anderen können Verteilungsfunktionen eingesetzt werden, deren Werteverlauf von dem einer anderen Inputgröße abhängig ist [Göt14, S. 401].

Schritt vier ist die **Berechnung der Ergebnisverteilung**. Dies ist sowohl mit Hilfe eines analytischen als auch eines simulativen Ansatzes möglich. Bei dem analytischen Ansatz ist die Zielfunktionswertverteilung rechnerisch aus den Verteilungen der Inputgrößen abzuleiten. Bei dem simulativen Ansatz wird eine Vielzahl an Berechnungen mit Hilfe von zufälligen Werten aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Inputgrößen durchgeführt. Die resultierenden Ausprägungen werden genutzt, um einen Zielfunktionswert zu bestimmen. Abschließend sind die Ergebnisse in Schritt fünf zu interpretieren [Göt14, S. 402].

Bewertung: Die Risikoanalyse ermöglicht es, zu beurteilen mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Investition vorteilhaft ist. Die Bestimmung der notwendigen Daten stellt jedoch eine große Herausforderung dar. Dies gilt insbesondere für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen und die stochastischen Abhängigkeiten [BLS12, S. 260], [Mül14, S. 490]. Weiterhin lässt sich die absolute Vorteilhaftigkeit eines einzelnen Investitionsobjekts mit der Risikoanalyse nicht bestimmen. Somit ist der Ansatz maximal ein ergänzendes Element in einer Investitionsbewertung [Göt14, S. 406].

4.2 Domänenspezifische Bewertungsansätze

Im Rahmen der einzelnen Fachdisziplinen wurden ganzheitliche Ansätze zur Bewertung verschiedenster Sachverhalte entwickelt. In Kapitel 4.2.1 werden zunächst Ansätze aus der Betriebswirtschaftslehre vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 4.2.2 Ansätze aus der Ingenieurwissenschaft und in Kapitel 4.2.3 Ansätze aus der Informatik beschrieben.

4.2.1 Ansätze aus der Betriebswirtschaftslehre

Im Folgenden werden Bewertungsmethoden aus der Betriebswirtschaft vorgestellt, welche ihren Ursprung in der Finanzwirtschaft und der Unternehmensbewertung haben. In Kapitel 4.2.1.1 wird ein Ansatz zur Bewertung von Strategien für Industrie 4.0 und in Kapitel 4.2.1.2 eine Methode für ein integriertes Risikomanagement beschrieben.

4.2.1.1 Ansatz zur Bewertung von Strategien für Industrie 4.0

GLEIBNER beschreibt einen Ansatz zur Bewertung von Strategien für Industrie 4.0 mit Hilfe eines Simulationsmodells. Als zentrales Element wird der Unternehmenswert¹⁰ gesehen, der als Performancemaß die Ertrags- und Risikowirkung erfasst. Der Gesamtrisikoumfang wird in Form des Eigenkapitalbedarfs bzw. Value at Risks aggregiert [Gle17, S. 181].

Zu Beginn des Vorgehens sind die Erfolgspotentiale eines Unternehmens zu erfassen. In diesem Zuge gilt es eine Budgetierung für die zu antizipierenden Jahre vorzunehmen. Aus dem Controlling sind die Daten auf Basis von Erfahrungswerten und ergänzenden Annahmen fortzuschreiben [Gle17, S. 182]. Anschließend sind die Risiken zu erfassen. Dies gilt für die relevanten Variablen der Gewinn- und Verlustrechnung. Die Quantifizierung des Nachfragerisikos im Rahmen des Umsatzwachstums kann z.B. über die Erfassung eines Mindestwerts, eines wahrscheinlichsten Werts und eines maximalen Werts erfolgen [Gle17, S. 182f.]. Erfasst werden die Risiken bspw. in Workshops. Die Risiken werden auf einer Skala von eins für unbedeutend bis fünf für bestandsgefährdend eingestuft. Anschließend sind die erfassten Risiken in einer Risikoaggregation zusammenzufassen [Gle17, S. 182ff.].

Auf Basis der bewerteten Erfolgspotentiale und der Risikoabschätzung wird eine Verteilung der Gewinn- und Verlustrechnung ermittelt. Zum einen stellt die Verteilungsfunktion die Grundlage zur Schätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit, d.h. der Insolvenzwahrscheinlichkeit, dar. Die Ausfallwahrscheinlichkeit und die Abschätzung des Wachstums werden in einem sog. risikoadjustierten Diskontierungssatz zusammengeführt [Gle17, S. 183ff.]. Zum anderen wird die Verteilungsfunktion der Gewinn- und Verlustrechnung zur Bestimmung des sog. Variationskoeffizienten genutzt. Dieser wird aus dem Verhältnis des Ertragsrisikos zum erwarteten Ertrag berechnet und stellt eine Kennzahl für die Planungssicherheit dar. Der Variationskoeffizient führt gemeinsam mit dem risikolosen

¹⁰ Der Unternehmenswert stellt den *Wert einer Unternehmung als Ganzes* dar. Die Bewertung eines Unternehmens als Ganzes ist von der Bewertung von Unternehmensanteilen z.B. in Form von Aktien abzugrenzen, da die Werte voneinander abweichen können. Der Wert eines Unternehmens wird durch eine Unternehmensbewertung ermittelt. Beispielhafte Bewertungsverfahren sind das Ertragswertverfahren und das Discounted-Cashflow-Verfahren [Gle19a-ol], [Gle19b-ol].

Zinssatz¹¹, dem Marktpreisrisiko¹² und dem Risikodiversifikationsgrad¹³ zu den sog. risikogerechten Kapitalkosten. Schließlich wird der Ertragswert bzw. der Unternehmenswert mit Hilfe des risikoadjustierten Diskontierungssatzes und dem risikogerechten Kapitalkosten bestimmt [Gle17, S. 183ff.].

Bewertung: GLEIBNER stellt einen Ansatz zur Bewertung von alternativen Unternehmensstrategien im Rahmen von Industrie 4.0 mit Hilfe von Simulationsmodellen vor. Auf Grund der Tatsache, dass gesamte Unternehmensstrategien bewertet werden, sind die Auswirkungen einzelner Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion nicht sinnvoll bewertbar.

4.2.1.2 Methode für ein integriertes Risikomanagement von Portfolios

MITSCHLE beschreibt ein Modell für das integrierte Risikomanagement im Bankgeschäft. Dazu werden zunächst das Kredit-, Markt- und operationelle Risiko als die wesentlichen Risikoarten identifiziert und charakterisiert. Jeder Risikoart wird eine individuelle Zielfunktion im Rahmen einer Asset Allokation zugewiesen [Mit09, S. 115].

Es werden Anwendungen in der strategischen und taktischen Asset Allokation analysiert. Eine Asset Allokation beschreibt die Aufteilung eines Gesamtportfolios. Ein Portfolio ist der Gesamtbestand an Anlagen einer Bank oder eines Kreditinstituts, in Bezug auf verschiedene Assetklassen. Assetklassen sind verschiedene Anlagearten wie beispielsweise Aktien oder Anleihen [Mit09, S. 29]. Im Rahmen der strategischen Asset Allokation wird die Ausrichtung der Assetklassen im Gesamtportfolio bestimmt. Darauf folgend kann eine taktische Asset Allokation anhand einer exemplarischen Auswahl von Einzelassets durchgeführt werden [Mit09, S. 29].

Zur Analyse der strategischen und der taktischen Asset Allokation wird jeweils ein multikriterielles Optimierungsproblem mit vier Zielfunktionen definiert. In der strategischen Asset Allokation sind dies die Funktionen der Gesamtrendite, des Marktrisikos aus Aktienanlagen, des Marktrisikos aus Zinsen und des Kreditrisikos [Mit09, S. 149f.]. In der taktischen Asset Allokation sind dies die Funktionen der Gesamtrendite, des Marktrisikos, des Kreditrisikos und des operationellen Risikos [Mit09, S. 167f.].

¹¹ Der risikolose Zinssatz ist *jene Rendite, die ohne Risiko erzielt werden kann* [Fin19-ol]. Da es sich um ein theoretisches Konstrukt handelt, dienen häufig *Zinssätze von Staatsanleihen bester Bonität mit langen Laufzeiten* als risikoloser Zinssatz [Wel19b-ol].

¹² Das Marktpreisrisiko ist das Risiko *einer Marktveränderung auf Grund von Änderungen in Marktpreisen*. Dies wird weiterhin in Zinsänderungs-, Aktienkurs-, Wechselkurs- und Volatilitätsrisiko untergliedert [Wir19a-ol].

¹³ Die Risikodiversifikation stellt eine Kapitalanlagestrategie dar, bei der die Anlagesumme in *mehrere möglichst voneinander unabhängige Wertpapiere investiert wird* [Wir19b-ol]. Grundlage dieses Ansatzes ist die Portfoliotheorie nach MARKOWITZ [Mar52].

Als Lösungsansatz wird ein Optimierungsansatz auf Basis von evolutionären Algorithmen vorgeschlagen. Dieser wird auf die Portfoliooptimierung angewendet. Es resultiert eine Menge an pareto-effizienten Lösungen. Weiterhin werden verschiedene Methoden zur Visualisierung und Auswertung der Lösungen zur Verfügung gestellt. Zum Einsatz kommen das 3D-Streudiagramm, die Streudiagramm-Matrix, der Parallelkoordinatenplot und die Heatmap [Mit09, S. 145ff.].

Die unterschiedlichen Visualisierungen bieten jeweils eine unterschiedliche Betrachtungsweise auf das Optimierungsproblem bzw. deren Lösungsraum. Die Heterogenität der Risikoarten in Form von Kredit-, Markt- und operationellem Risiko sowie die unterschiedlichen Datengrundlagen in diesen Bereichen gestalten eine Aggregation des Optimierungsproblems als schwierig [Mit09, S. 179].

Bewertung: MITSCHLE beschreibt einen Ansatz zum integrierten Risikomanagement im Bankgeschäft. Die Grundlage des Modells ist die Portfolio-Optimierung nach MARKOWITZ nach [Mar52], [Mar59]. Mit Hilfe von evolutionären Algorithmen können sowohl strategische als auch taktische Portfolios in der Asset Allokation optimiert und analysiert werden.

Der Übertrag der Portfoliotheorie auf die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion erweist sich jedoch als schwierig. So lassen sich Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion i.d.R. nicht wie Aktien behandeln und in einem Portfolio ersetzen. Weiterhin werden keinerlei technische Bedingungen berücksichtigt.

4.2.2 Ansätze aus der Ingenieurwissenschaft

Im Folgenden werden Bewertungsansätze aus der Ingenieurwissenschaft vorgestellt. Die Ansätze sind i.d.R. für spezifische Anwendungsfälle entwickelt worden. Zum einen existieren Bewertungsansätze, welche sich auf eine bestimmte Technologie fokussieren. Aus dieser Kategorie wird in Kapitel 4.2.2.1 ein Vorgehen zur Planung und Bewertung eines RFID-Einsatzes vorgestellt. Der Ansatz ist exemplarisch für die Art von Ansätzen. Ein weiteres entsprechendes Beispiel wird im Anhang A2.1 beschrieben. Zum anderen gibt es Bewertungsansätze, welche einer bestimmten Lebenszyklusphase einer Produktionssystemplanung zuzuordnen sind. Kapitel 4.2.2.2 beschreibt exemplarisch eine Methode für die Bewertung von Herstellkosten in der frühen Phase der Produktentstehung. Weitere entsprechende Beispiele sind dem Anhang A2.2, A2.3 und A2.4 zu entnehmen.

Abschließend existieren übergreifende Bewertungsansätze, welche als Leitfäden bzw. Referenzprozesse zu verstehen sind. Sie beinhalten i.d.R. verschiedene Methoden bzw. stellen eigene Methodensammlungen dar. In Kapitel 4.2.2.3 wird der VDMA Leitfaden zur Investitionsrechnung für Digitalisierungsprojekte und Industrie 4.0 Vorhaben beschrieben. Weitere Beispiele sind in Kapitel A2.5 und Kapitel A2.6 aufgezeigt.

4.2.2.1 Vorgehen zur Planung und Bewertung eines RFID-Einsatzes

RHENSUS ET AL. beschreiben ein 3-stufiges Vorgehen zur Planung und Bewertung des RFID-Einsatzes. Ziel ist die *Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen für mittelständische Unternehmen* [RD09, S. 16]. Dargestellt ist das Vorgehen in Bild 4-2.

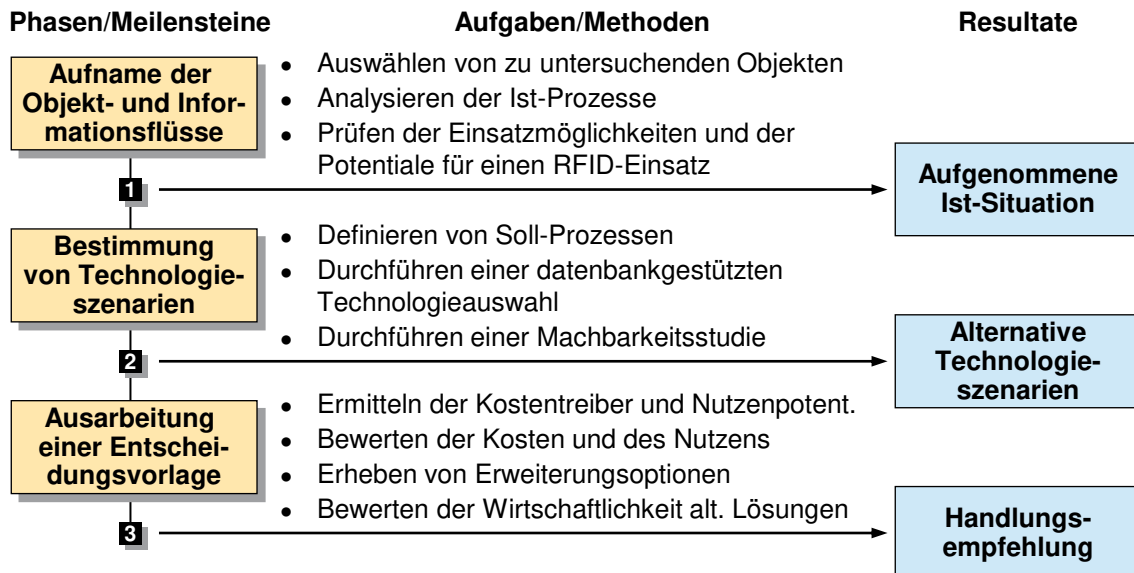


Bild 4-2: Vorgehen zur Planung und Bewertung des RFID-Einsatzes nach [RD09]

Die erste Phase ist die **Aufnahme der Objekt- und Informationsflüsse**. Die Objekte, die durch den RFID-Einsatz optimiert werden sollen, werden erfasst. Neben der Klärung was optimiert werden soll, ist die Frage zu beantworten, wozu es optimiert werden soll. Eine zentrale Aufgabe in der frühen Phase des Projekts ist es *die Zielsetzung und Abgrenzung mit vertretbarem Aufwand möglichst präzise zu formulieren* [RD09, S. 52]. Als Hilfsmittel dient eine Nutzwertanalyse [RD09, S. 51ff.].

Anschließend werden die relevanten Ist-Prozesse analysiert und Potentiale identifiziert. Dies geschieht bspw. in Form von Workshops oder Gesprächen mit Mitarbeitern. Die Prozesse können bspw. mit Hilfe einer gängigen Modellierungsmethode wie OMEGA oder ARIS dokumentiert werden. Zur Strukturierung werden die Potentiale in Haupt- und Nebenursachen gegliedert. Resultat der ersten Phase ist die aufgenommene Ist-Situation [RD09, S. 51ff.].

Die zweite Phase stellt die **Bestimmung von Technologieszenarien** dar. In diesem Rahmen werden zunächst Soll-Prozesse definiert. Dazu sind alle Prozesse zu identifizieren, welche durch die Einführung des zu bewertenden RFID-Systems unterstützt werden sollen. Darauf aufbauend wird eine Technologieauswahl durchgeführt. Unterstützt wird dies durch eine Technologie- und Fallstudiendatenbank. Schließlich ist eine Machbarkeitsstudie durchzuführen. Hier ist sowohl die technische Machbarkeit als auch das Mengengerüst an notwendiger Hardware zu klären. Resultat der zweiten Phase sind alternative, realisierbare Technologieszenarien, welche eine umfassende Beschreibung der RFID-Anwendung darstellen [RD09, S. 57ff.].

Abschließend gilt es in Phase 3 die **Ausarbeitung einer Entscheidungsvorlage** durchzuführen. Dazu werden zu Beginn die Kostentreiber und die Nutzenpotentiale ermittelt. Diese sind zu bewerten und Erweiterungsoptionen zu erheben. Schließlich ist die Wirtschaftlichkeit der alternativen Lösungen zu bewerten. Resultat der dritten Phase sind Handlungsempfehlungen für den RFID-Einsatz. Diese werden in einer Entscheidungsvorlage zusammengefasst [RD09, S. 69ff.].

Bewertung: Der Ansatz nach RHENSIUS ET AL. ermöglicht die Planung und Bewertung des RFID-Einsatzes. Das 3-stufige Vorgehen ermöglicht nachvollziehbare und reproduzierbare Ergebnisse.

Der Ansatz ist stark fokussiert auf den Einsatz von RFID Technologien. Das betrifft insbesondere die Wissensbasis und die Werkzeugunterstützung des Ansatzes. Die Übertragbarkeit auf andere Industrie 4.0 Anwendungen ist somit nicht einfach gegeben.

4.2.2.2 Methode für die Bewertung von Herstellkosten in der frühen Phase der Produktentstehung

LANZA ET AL. entwickelten eine Methode für die Bewertung von Herstellkosten in der frühen Phase der Produktentstehung. Die Methode gliedert sich in vier Phasen. Das Vorgehen ist in Bild 4-3 dargestellt [LBP12, S. 153].

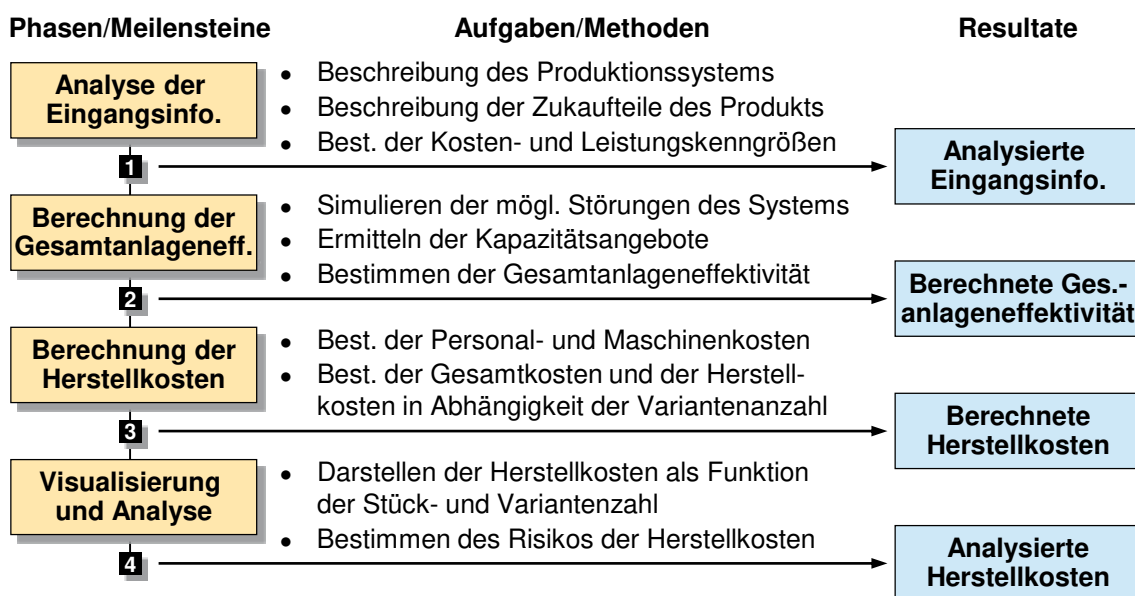


Bild 4-3: Vorgehen zur Bewertung der Herstellkosten nach [LBP12, S. 154]

Phase 1 ist die **Analyse der Eingangsinformationen**. Ausgangspunkt dafür ist die Beschreibung des zu bewertenden Produktionssystems und der Zukaufteile. Grundlage dafür sind die Partialmodelle Prozesse und Ressourcen. Weiterhin sind Kosten- und Leistungskenngrößen der Prozessschritte zu ermitteln. Dies geschieht in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen der zu bestimmenden Größen [LBP12, S. 154f.].

In Phase 2 ist die **Berechnung der Gesamtanlageneffektivität** durchzuführen. Es werden die möglichen Störungen des zu bewertenden Produktionssystems simuliert und die Kapazitätsangebote ermittelt. Auf dieser Basis wird die Gesamtanlageneffektivität nach NAKAJIMA bestimmt [Nak95]. Diese beschreibt die Wertschöpfung einer Anlage [LBP12, S. 155ff.].

Phase 3 ist die **Berechnung der Herstellkosten**. Ausgangspunkt der Kapazitäts- und Kostenanalyse sind die ermittelten Gesamtanlageneffektivitäten der betrachteten Anlagen. Der Zeitbedarf für die Maschinen und das Personal wird durch die Gegenüberstellung des Maschinenkapazitätsangebots mit dem Kapazitätsbedarf bestimmt. Mit Hilfe von Lohnkosten- und Maschinenstundensätzen können daraus Personal- und Maschinenkosten bestimmt werden. Zur Bestimmung der Gesamtkosten des Produktionssystems für einen Betrachtungszeitraum sind die Material-, Puffer- und eventuell entstehenden Ausfallkosten zu ergänzen. Folgend sind die Herstellkosten in Abhängigkeit der Variantenzahl zu bestimmen [LBP12, S. 158ff.].

Abschließend folgen in Phase 4 die **Visualisierung und Analyse**. Dazu werden die Herstellkosten als Funktion der Stück- und Variantenzahl dargestellt. Das Risiko einer Herstellkostenabschätzung wird über die Schwankungen der verschiedenen Simulationsergebnisse bestimmt [LBP12, S. 158ff.].

Bewertung: LANZA ET AL. stellen eine Methode für die Bewertung von Herstellkosten in der frühen Phase der Produktentstehung vor. Auf Basis einer Simulation können Herstellkosten in einem Produktionssystem in Abhängigkeit der Variantenzahl und der Stückzahl bestimmt werden.

Die Methode erfordert eine Vielzahl an Daten für die Simulation eines Produktionssystems. Die Datenerhebung wird nicht unterstützt. Weiterhin werden die Spezifika von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion nicht berücksichtigt. Es wird nicht auf den Nutzen einer Investition eingegangen.

4.2.2.3 VDMA Leitfaden zur Investitionsrechnung für Digitalisierungsprojekte und Industrie 4.0 Vorhaben

Der VDMA Leitfaden zur Investitionsrechnung für Digitalisierungsprojekte und Industrie 4.0 Vorhaben stellt ein Vorgehen sowie ein Berechnungsmodell zur Bewertung von Investitionsvorhaben im Rahmen der Digitalisierung dar. Grundlage des Berechnungsmodells ist die Analyse von zehn Klassen an Anwendungsfällen. Beispiele dieser Klassen an Anwendungsfällen sind „Durchgängige digitale Vertriebsplattformen mit Produktkonfiguration“, „Flexible Produktionsplanung und -steuerung“ und „Digitale Serviceprozesse“ [IPS+18, S. 34ff.].

Jeder dieser Klassen sind, entsprechend des VDMA Werkzeugkastens Industrie 4.0 nach ANDERL ET AL., vier Ausprägungen zugeordnet [APW+15]. Soll eine mögliche Investi-

tion bewertet werden, ist zunächst die aktuelle Ausprägung im Unternehmen zu definieren. Anschließend wird die Zielausprägung definiert. Dabei muss die Investition einer der zehn Klassen an Anwendungsfällen entsprechen [IPS+18, S. 34ff.]. Nach Eingabe von Basisinformationen, wie bspw. Einzel- oder Serienfertiger, Umsatz pro Jahr und Anzahl Mitarbeiter, wird das Ergebnis der Investitionsrechnung auf Basis der Erfahrungs- und Referenzwerte berechnet. Dies gilt sowohl für die Nutzen- als auch die Kostenermittlung. Die Referenzwerte der Kostenseite sind anpassbar. Bspw. werden ein interner Kostensatz von 1000€ pro Tag und je Anwender sowie Softwarekosten von 5.000€ pro Anwender als Anfangsinvestition angenommen. Als Ergebnis können die Amortisationszeit, der interne Zinsfuß sowie der Barwert der Investition dienen [IPS+18, S. 40].

Bewertung: Nach ILLNER ET AL. eignet sich der VDMA Kosten-Nutzen-Rechner zu einer *groben Selbsteinschätzung und Identifizierung erster möglicher Investitionsprojekte* [IPS+18, S. 43]. Die empirische Analyse verschiedener Projekte ermöglicht dies.

Gleichzeitig erlaubt die empirische Bestimmung der Wirtschaftlichkeit der analysierten Projekte keinerlei Transparenz über deren Berechnung. Unternehmensindividuelle Besonderheiten, wie bspw. gegebene Infrastrukturen, lassen sich nicht berücksichtigen. *Abhängigkeiten von Investitionsvorhaben [werden] nicht berücksichtigt* [IPS+18, S. 42].

4.2.3 Ansätze aus der Informatik und dem Systems Engineering

Im Folgenden werden Bewertungsansätze aus der Informatik und dem Systems Engineering vorgestellt. In Kapitel 4.2.3.1 werden zunächst allgemeine Methoden zur Aufwandsschätzung von IT-Projekten beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 4.2.3.2 die Function Point Methode erläutert. Sie stellt einen auf Erfahrungswissen basierten Ansatz zur Aufwandsschätzung von IT-Projekten dar. Ein weiterer ähnlicher Ansatz ist das Constructive Cost Model, welches dem Anhang A2.7 zu entnehmen ist.

Die Idee der auf Erfahrungswissen basierten Ansätze wurde auch im Rahmen des Systems Engineering aufgegriffen. Kapitel 4.2.3.3 beschreibt das Constructive Systems Engineering Cost Model. Aus Projektmanagement Sicht ist weiterhin exemplarisch die Netzplantechnik zur Bewertung des Aufwands von IT-Projekten zu erwähnen. Diese ist in Anhang A2.8 beschrieben.

4.2.3.1 Allgemeine Methoden zur Aufwandsschätzung von IT-Projekten

Die Aufwandsschätzung von IT-Projekten ist von zentraler Bedeutung. Immer wieder wird von scheiternden IT-Projekten berichtet, welche Zeit- und Kostenbudget deutlich übertreffen. Nach [Sch08-ol] scheitern ca. 68% aller IT-Projekte. FISCHER ET AL. zufolge werden nur ein Sechstel aller Projekte mit vertretbaren Ergebnissen, d.h. unter vertretbaren Termin-, Zeit- und Kostenaspekten, abgeschlossen [FSB08].

Allgemeine Methoden zur Aufwandsschätzung von IT-Projekten lassen sich in die drei Kategorien Vergleichsmethoden, algorithmische Methoden und Kennzahlenmethoden gliedern [WM11, S. 260]. Bild 4-4 stellt eine Klassifikation der allgemeinen Methoden zur Aufwandsschätzung von IT-Projekten dar.

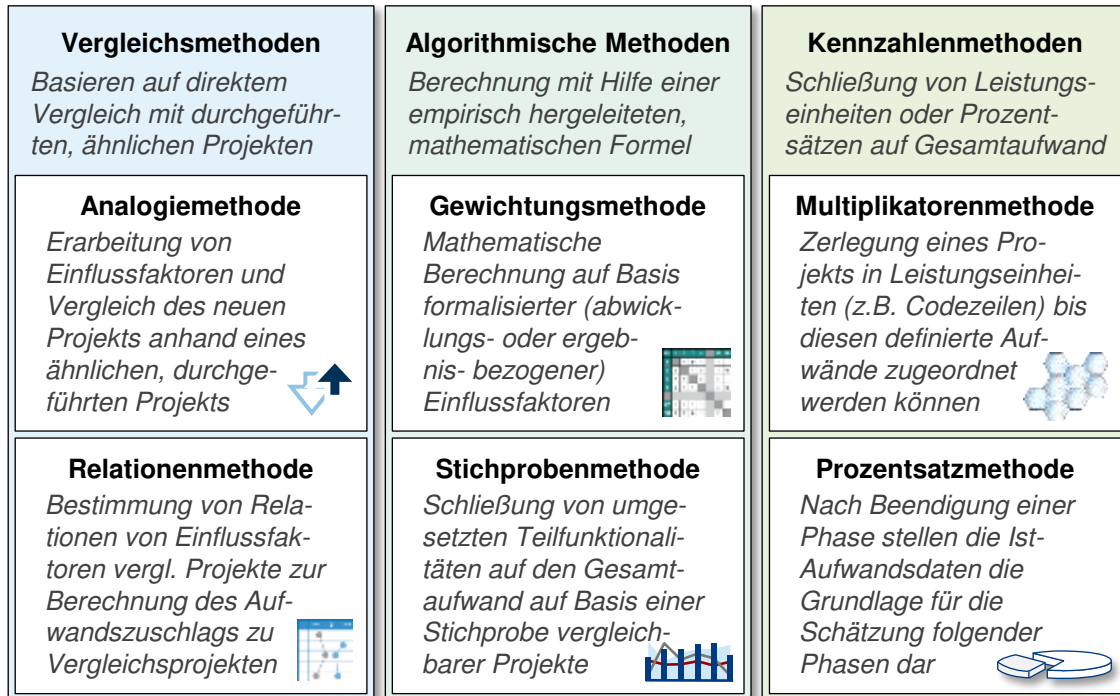


Bild 4-4: Klassifikation von allgemeinen Methoden zur Aufwandsschätzung von IT-Projekten [WM11, S. 260]

Die **Vergleichsmethoden** basieren auf einem direkten Vergleich mit ähnlichen durchgeführten Projekten. Der Aufwand eines neuen Projekts ist auf Basis der durchgeführten Projekte zu schätzen. Die Vergleichsmethoden lassen sich in die Analogiemethode und die Relationenmethode untergliedern [Bur18, S. 211], [WM11, S. 260ff.].

Bei der Analogiemethode werden für das zu bewertende Projekt zunächst zentrale Einflussfaktoren und deren Ausprägungen bestimmt. Anschließend wird das bereits durchgeführte Projekt ermittelt, für welches die Einflussfaktoren und Ausprägungen zum neuen Projekt am ähnlichsten sind. Auf Basis der Aufwände des ermittelten, bereits durchgeführten Projekts wird der Aufwand des neuen Projekts geschätzt [WM11, S. 261].

Im Rahmen der Relationenmethode werden mehrere bereits abgeschlossene Projekte analysiert. Es werden die Korrelation zwischen den Einflussfaktoren von Projekten untereinander und zu dem Aufwand der Projekte analysiert. Ziel dabei ist es, den Zusammenhang eines Einflussfaktors auf den Gesamtaufwand von Projekten zu identifizieren. Anschließend wird das zu bewertende Projekt hinsichtlich seiner Einflussfaktoren charakterisiert und auf Basis der ermittelten Korrelationen der Einflussfaktoren geschätzt [Bur18, S. 212], [WM11, S. 261f.].

Die **algorithmischen Methoden** nutzen geschlossene Formeln zur Bestimmung des Aufwands neuer Projekte. Diese können sowohl auf mathematischen Modellen beruhen als auch empirisch hergeleitet sein. Dabei hängt die Genauigkeit des Modells entscheidend von der Anzahl analysierter Projekte ab. Untergliedern lassen sich die algorithmischen Methoden in die Gewichtungsmethode und die Stichprobenmethode [Bur18, S.207f], [WM11, S. 262]

Die Gewichtungsmethode betrachtet den Gesamtaufwand von Projekten. Grundlage ist ein Wertesystem von Faktoren und Gewichtungszahlen. Es werden sowohl subjektive als auch objektive Einflussfaktoren genutzt und Werten zugeordnet. Durch eine mathematische Verknüpfung der Einflussfaktoren ergibt sich der Gesamtaufwand des zu bewertenden Projekts [Bur18, S. 210], [WM11, S. 262f.].

Die Stichprobenmethode basiert nicht auf Grundlage der Einflussfaktoren (wie die Gewichtungsmethode), sondern auf Basis einer oder mehrerer Stichproben. Beispielfhaft werden eine oder mehrere Funktionalitäten des zu bewertenden Projekts umgesetzt. Auf Basis der erfassten Aufwände wird auf den Gesamtaufwand eines Projekts geschlossen [WM11, S. 263].

Die **Kennzahlenmethoden** schließen von definierten Leistungseinheiten oder Prozentsätzen auf den Gesamtaufwand eines Projekts. Wie bei den Vergleichsmethoden werden durchgeführte Projekte systematisch gesammelt und analysiert. Die Daten werden jedoch nicht zum Vergleich herangezogen, sondern es werden aussagekräftige Kennzahlen abgeleitet. Auf Basis der Kennzahlen wird der Aufwand neuer Projekte bewertet. Die Kennzahlenmethoden gliedern sich in die Multiplikatorenmethode und die Prozentsatzmethode [Bur18, S. 212], [WM11, S. 263f.].

Die Multiplikatorenmethode basiert entgegen den vorherigen Methoden auf der Basis der Projektkosten und nicht des -aufwands. Die zu ermittelnden Kosten werden kategorisiert und deren relative Größe in Bezug auf eine definierte Leistungseinheit bestimmt. Ein Beispiel einer Leistungseinheit ist die Anzahl der Code-Zeilen einer Software. Für neue Projekte werden die Kosten dann über die Leistungseinheit bestimmt [Bur18, S.213], [WM11, S.263f.].

Grundlage der Prozentsatzmethode ist, dass bei Projekten mit identischen Vorgehensmodellen eine ähnliche Verteilung der Kosten entsteht. Für abgeschlossene Projekte wird so eine prozentuale durchschnittliche Verteilung der Kosten und Aufwände für die einzelnen Projektphasen bestimmt. Für neue Projekte können dann nach Abschluss einer Phase die restlichen Phasen bestimmt werden [Bur18, S. 215], [WM11, S.264].

Bewertung: Die aufgezeigten Methoden stellen recht einfache Ansätze zur Aufwandschätzung von IT-Projekten dar. Die Spezifikation einer möglichen Investition sowie die Datenerfassung wird von keiner der Methoden zur Aufwandsschätzung von IT-Projekten unterstützt. Weiterhin ist der Nutzen einer Investition nicht Gegenstand der Betrachtung.

4.2.3.2 Function Point Methode

Die Function Point Methode ist ein Ansatz zur Schätzung des Aufwands von Softwareentwicklungsprojekten. Der von ALBRECHT 1981 veröffentlichte Ansatz basiert auf der Relationen- und Gewichtungsmethode und ist auf die Entwicklung von IT-Anwendungen fokussiert (vgl. Kapitel 4.2.3.1). Zur Bestimmung des Aufwands eines Entwicklungsprojekts werden ergebnis- und abwicklungsbezogene Einflussfaktoren berücksichtigt. D.h. es werden die Quantität, Komplexität und Qualität des zu entwickelnden Systems sowie die Produktivität des eingesetzten Verfahrens berücksichtigt. Zur Bestimmung des Projektaufwands werden fünf Schritte durchlaufen [Bur18, S.250ff.], [WM11, S. 265].

Zu Beginn wird das Gesamtprojekt bis auf die Komponentenebene heruntergebrochen. Die Anforderungen an das System werden den folgenden Funktionskategorien zugeordnet: Eingabe-, Ausgabedaten, Abfragen, Datenbestände und Referenzdaten [WM11, S. 266].

Anschließend werden die Funktionskategorien in Schritt zwei bewertet. Da die Kategorien unterschiedliche Komplexitäten aufweisen, werden sowohl die Schwierigkeiten zur Umsetzung der Kategorien als auch die vorliegenden Projektsituationen berücksichtigt. Dies geschieht über empirisch hergeleitete Funktionspunkte für die verschiedenen Funktionskategorien. Die Bewertung der Funktionskategorien mit zugeordneten Funktionspunkten für die drei Schwierigkeitsgrade „einfach“, „mittel“ und „komplex“ ist in Tabelle 4-1 dargestellt [WM11, S. 267].

Tabelle 4-1: Funktionspunkte der einzelnen Funktionskategorien nach [WM11, S. 267]

Funktionskategorie	einfach	mittel	komplex
Eingabedaten	3	4	6
Ausgabedaten	4	5	7
Abfragen	3	4	6
Datenbestände	7	10	15
Referenzdaten	5	7	10

Weiterhin werden spezifische Tabellen für die einzelnen Funktionskategorien zur Verfügung gestellt. Die Tabellen brechen die Funktionskategorien herunter, um deren Bewertung zu unterstützen [Bur18, S.251]. Die Anzahl der Funktionen je Funktionskategorie und Komplexitätsstufe wird mit dem jeweiligen Funktionspunkt multipliziert. Die Werte werden zu der Summe *S1* aufsummiert [WM11, S. 268f.].

Schritt drei sieht die Berücksichtigung von zehn situationsbezogenen Einflussfaktoren vor. Beispiele sind die Komplexität der zu erstellenden Rechenoptionen und die Verflechtung des Systems mit anderen IT-Systemen. Die zehn Einflussfaktoren werden jeweils auf einer Skala von null bis fünf bewertet. Die Summe dieser Werte wird als *S2* bezeichnet.

net. Anschließend wird $S3$ mit der Formel $S3 = 0,7 + S2/100$ bestimmt. Dies ermöglicht einen 30-prozentigen Auf- bzw. Abschlag für die zuvor berechnete Summe $S1$ [WM11, S. 269]. Die Total Function Points (TFP) werden durch die Multiplikation von $S1$ und $S3$ bestimmt. Auf Basis der TFP können die für die zu entwickelnde Software notwendigen Aufwände in Personenmonaten bestimmt werden. Dazu kommen empirisch bestimmte Tabellen entsprechend Tabelle 4-2 zum Einsatz [WM11, S. 270].

Tabelle 4-2: Ausschnitt aus der Tabelle zur Bestimmung der notwendigen Personenmonate für ein Projekt auf Basis der Total Function Points [WM11, S. 270]

Total Function Points	Notwendige Personenmonate
150	5
200	9
250	13
300	14

Bewertung: Die Function Point Methode ist ein verbreiteter Ansatz zur Schätzung des Aufwands von Softwareentwicklungsprojekten. Grundlage ist die empirische Auswertung von Projekten, eine darauf aufbauende Metrik von Bewertungstabellen mit einer zusammenfassenden Formel. Hervorzuheben ist dabei, dass sich mit der International Function Point Users Group¹⁴ eine breite Community gebildet hat, die stetig weiterentwickelt wird.

Das Verfahren basiert auf der Auswertung zahlreicher Softwareentwicklungsprojekte. Um die Übertragbarkeit des Verfahrens auf die Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion sicherzustellen, ist eine entsprechende empirische Untersuchung notwendig. Nach wie vor bleibt der Kritikpunkt bestehen, dass ausschließlich die Aufwände und nicht der Nutzen der Projekte bewertet wird.

4.2.3.3 Constructive Systems Engineering Cost Model

Das Constructive Systems Engineering Cost Model (COSYSMO) ist eine auf Erfahrungswissen basierende Methode zur Schätzung des Aufwands von Systems Engineering Projekten¹⁵. Wie bei der Function Point Methode (vgl. Kapitel 4.2.3.2) und dem Constructive

¹⁴ Die International Function Point Users Group ist ein gemeinnütziger Verein, welcher durch seine Mitglieder verwaltet wird. Das vom Verein herausgegebene Practice Manual gilt als Industriestandard zur Anwendung der Function Point Methode [Ifp19-ol]. Homepage der Organisation ist: <http://www.ifpug.org/?lang=de>.

¹⁵ Das Modell lässt sich gleichermaßen den Ansätzen aus der Ingenieurwissenschaft (vgl. Kapitel 4.2.2) zuordnen. Auf Grund der strukturellen Nähe zu der Function Point Methode und COCOMO II wird das Modell hier vorgestellt.

Cost Model (vgl. Anhang A2.7) aus der Informatik, basiert COSYSMO auf empirischen Analysen zahlreicher Projekte. VALERDI identifizierte einen funktionalen Zusammenhang zwischen verschiedenen sog. Größen- und Kostentreibern und dem Aufwand von Systems Engineering Projekten. Somit zählt auch COSYSMO zu den algorithmischen Modellen zur Kosten- und Aufwandsschätzung von Software (vgl. Kapitel 4.2.3.1) [Val05].

Der Aufwand eines Systems Engineering Projekts lässt sich mit Hilfe der Gleichung 4-4 bestimmen. Die *Größe* bestimmt sich durch die gewichtete Summe der vier folgenden Größentreiber: Anzahl an Systemanforderungen, Anzahl an zentralen Interfaces, Anzahl an kritischen Algorithmen und Anzahl an Anwendungsszenarien. Die Größe wird mit einem Exponenten *E* versehen. Sie berücksichtigt die Economy-/Diseconomy of Scale und stellt somit die Produktivität der Organisation dar. Hinzu kommt eine Kalibrierungskonstante *A*, welche einen aus historischen Projektdaten ermittelten Anpassungsfaktor darstellt. Multipliziert wird der Term mit einem Aufwandsmultiplikator, welcher wiederum ein Produkt von vierzehn Kostentreibern darstellt [Val05, S. 33ff.].

$$PM_{NS} = A * (Größe)^E * \prod_{i=1}^n EM_i$$

Gleichung 4-4: Bestimmung des Aufwands eines System Engineering Projekts
[Val05, S. 33]

PM_{NS} : Aufwände in Personenmonaten

A: Kalibrierungskonstante, abgeleitet aus historischen Projektdaten

Größe: Größenfaktor, bestimmt durch die gewichtete Summe von vier Größentreibern

E: Faktor der Economy-/Diseconomy of Scale

n: Anzahl der Kostentreiber

EM_i : Aufwandsmultiplikator für den i-ten Kostentreiber.

Die Größen- und Kostentreiber können für neue, zu bewertende Systems Engineering Projekte jeweils mit Hilfe von bereitgestellten Tabellen ermittelt werden [Val05, S. 33ff.].

Bewertung: VALERDI entwickelte ein Modell zur Schätzung des Aufwands von Systems Engineering Projekten. Hierzu wurden Projekte empirisch ausgewertet und ein mathematisches Modell auf Basis von ausgewerteten Projekten entwickelt. Wie auch bei der Function Point Methode und COCOMO II (vgl. Kapitel A2.7) ist der empirische Charakter des Modells hervorzuheben.

Auf Grund des mathematischen Modellcharakters mit zahlreichen Parametern und Konstanten ist die Nachvollziehbarkeit der Berechnung und somit des Ergebnisses ausschließlich für Experten zugänglich. Die Kalibrierung des Modells, in Form der Parameter und Konstanten, ist für Unternehmen der Luft- um Raumfahrt im Militärbereich ausgelegt

[Val05, S. 82ff.]. Für die Übertragung des Modells auf die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ist eine entsprechende empirische Untersuchung notwendig. Darüber hinaus werden ausschließlich die Aufwände und nicht der Nutzen der Projekte bewertet.

4.3 Ansätze zur Systemanalyse und -bewertung

Die Ansätze zur Systemanalyse werden im folgenden Kapitel 4.3.1 in Ansätze zur Analyse und Bewertung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen und entsprechend Kapitel 4.3.2 in Ansätze zur Analyse und Bewertung der Komplexität von Produktionssystemen untergliedert.

4.3.1 Ansätze zur Analyse und Bewertung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen

Es gibt viele spezifische Ansätze zur Analyse und Bewertung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. In Kapitel 4.3.1.1 wird eine Methode zur Flexibilitätswertung vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 4.3.1.2 ein System zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit beschrieben. Ein Ähnlicher Ansatz nach SCHUH ET AL. wird in Anhang A2.9 aufgezeigt.

4.3.1.1 Methode zur Flexibilitätswertung

ROGALSKI schlägt eine Methode zur Bewertung der Flexibilität eines Produktionssystems vor. Es wird unterschieden zwischen drei Arten von Flexibilität: der Mengenflexibilität, der Mixflexibilität und der Erweiterungsflexibilität [Rog09, S. 70]. Diese drei Arten von Flexibilität werden in einem mehrstufigen Verfahren berechnet. Dazu wird ein mathematisches Modell mit Berechnungsparametern, Ergebnisvariablen und Neben- bzw. Randbedingungen genutzt [Rog09, S. 71ff.]. Ein Vorgehen aus fünf Schritten wird dazu durchlaufen. Das Vorgehen ist in Bild 4-5 abgebildet.

In Schritt eins werden zunächst die **Berechnungsparameter definiert**. Die für die Berechnung notwendigen Parameter gliedern sich in die Gruppen kostenbezogen, nicht-kostenbezogen und benutzerabhängig. Beispiele für nicht-kostenbezogene Berechnungsparameter sind die Menge an Zwischen- und Endprodukten sowie die Menge an Arbeitsplätzen. Beispiele für kostenbezogene Berechnungsparameter sind die variablen Produktionskosten oder die Fixkosten. Ein Beispiel für benutzerabhängige Berechnungsparameter ist der gewünschte Produktmix. Den Parametern gilt es konkrete Werte zuzuweisen. Die Daten sind i.d.R. aus der Betriebsdatenerfassung oder dem Enterprise-Resource-Planning-System zu entnehmen [Rog09, S. 72ff.].

Im zweiten Schritt wird die **Zielfunktion formuliert**. Die Zielfunktion beschreibt das Optimierungsproblem mathematisch. Ein Beispiel kann die Ermittlung des optimalen

Produktionsplans sein. Dafür ist die Zielfunktion so umzuformulieren, dass jede Komponente einen Deckungsbeitrag angibt und dieser optimiert wird. Der Produktionsplan wird im Ergebnisvektor beschrieben [Rog09, S. 76ff.].

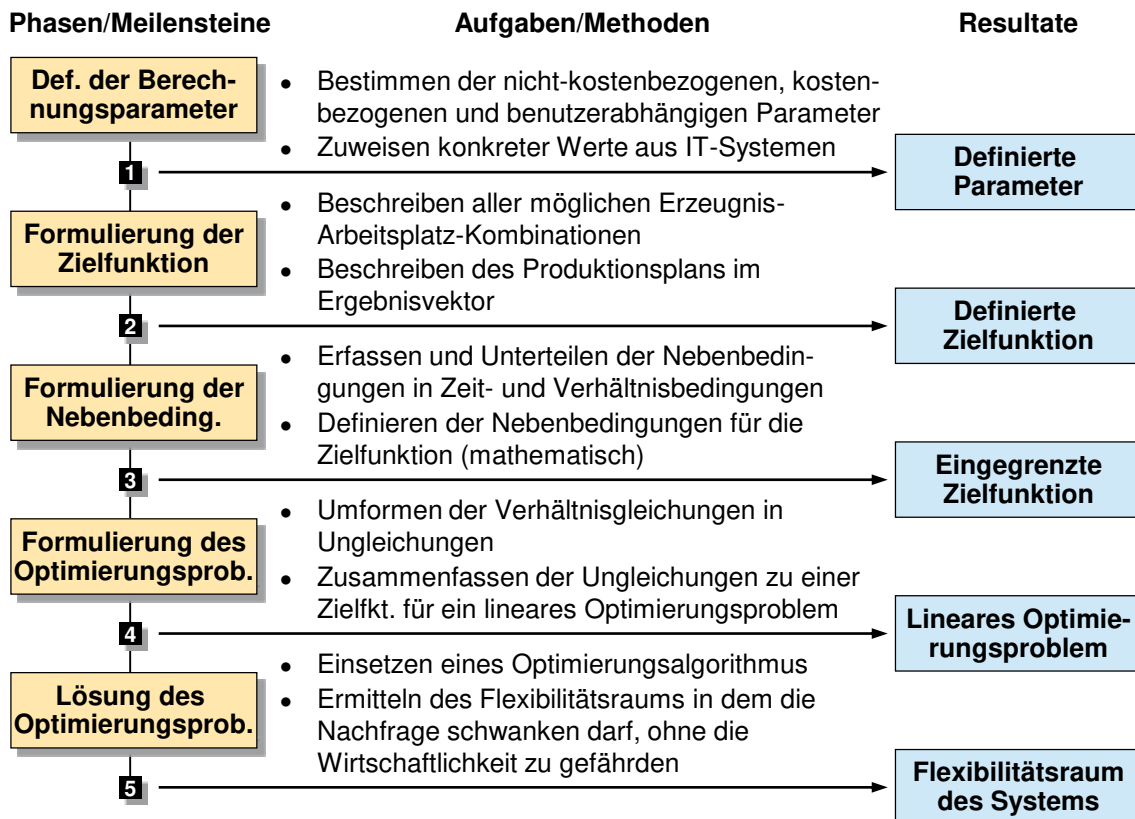


Bild 4-5: Vorgehen zur Bewertung der Flexibilität eines Produktionssystems nach [Rog09, S. 72ff.]

Schritt drei sieht die **Formulierung der Nebenbedingungen** vor. Nebenbedingungen beschreiben Restriktionen des mathematischen Modells. Es wird zwischen Zeitbedingungen und Verhältnisbedingungen unterschieden. Zeitbedingungen sind zeitliche Restriktionen von Arbeitsplätzen. So ist die Zeit eines Arbeitsplatzes durch die Prozesszeit nach oben hin begrenzt. Verhältnisbedingungen ergeben sich zum einen aus den Flexibilitätsberechnungen des Produktmixes und zum anderen aus den Bestandteileabhängigkeiten, welche in die Erzeugnisse eingehen [Rog09, S. 79ff.].

In Schritt vier wird das **Optimierungsproblem formuliert**. Um das Optimierungsproblem zu lösen, gilt es das mathematische Modell unter Berücksichtigung des entsprechenden Lösungsverfahrens zu formulieren. ROGALSKI beschreibt ein lineares Optimierungsproblem. Dazu werden eine Anforderung, eine Zielfunktion und die Nebenbedingungen definiert. Die Nebenbedingungen stellen lineare Ungleichungen dar [Rog09, S. 85ff.].

Abschließend wird in Schritt fünf das **Optimierungsproblem gelöst**. Soll bspw. der Produktionsplan ermittelt werden, für den der Gewinn über alle Arbeitsplätze maximal ist,

wird das definierte Optimierungsproblem mit Hilfe eines bestehenden Berechnungsverfahrens gelöst. Im Beispiel der Arbeit [Rog09] wird der Simplex Algorithmus genutzt [Rog09, S. 87ff.].

Nach dem Durchlaufen des aufgezeigten Algorithmus werden die Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität für das Produktionssystem bestimmt. Dazu kommen die ermittelten Größen des zuvor aufgezeigten Vorgehens zum Einsatz. Der Flexibilitätsraum für die Mengenflexibilität ergibt sich aus der Maximalkapazität und dem Break-Even-Punkt, an dem der Gesamtgewinn dem Wert null entspricht. Die Mengenflexibilität beschreibt um wie viel die Nachfrage um das Optimum schwanken darf, ohne dass die Wirtschaftlichkeit des Produktionssystems gefährdet wird [Rog09, S. 95], [Rog09, S. 104].

Die Mixflexibilität wird mit dem systemoptimalen Produktionsgewinn und dem produkteingeschränkten Gewinnoptimum bestimmt. Der systemoptimale Produktionsgewinn beschreibt den größtmöglichen Profit, der bei einem optimalen Produktionsprogramm erzielt werden kann. Das produkteingeschränkte Gewinnoptimum beschreibt den maximal erreichbaren Gewinn, wenn ein bestimmtes, technisch herstellbares Produkt nicht produziert wird. Die Mixflexibilität stellt ein Maß für die Stabilität des Gewinns und deren durchschnittliche Einbußen bei Abweichungen vom optimalen Produktmix dar [Rog09, S. 112]. Die Erweiterungsflexibilität beschreibt wie weit die aktuelle Ausbringungsmenge gesteigert werden kann, ohne Einbußen bei der Mengenflexibilität zu haben. Sie ist mit Hilfe des alternativen, spezifischen Break-Even-Punkts sowie der Zielkapazität zu bestimmen [Rog09, S. 117].

Bewertung: Die Methode nach ROGALSKI ermöglicht eine Bewertung der Flexibilität eines Produktionssystems. Dabei steht jedoch nicht die Flexibilität im Vordergrund, sondern die Wirtschaftlichkeit des gesamten Produktionssystems.

Grundlage für die Modellierung des mathematischen Modells ist ein sehr umfangreiches Wissen über die mathematische Modellierung und Simulation. Darüber hinaus erfordert der Ansatz zahlreiche Informationen über spezifische Parameter der Produktion, der Absatzmengen und über weitere markt- und unternehmensbezogene Parameter. Diese liegen häufig in der Form und der benötigten Datenqualität nicht vor.

4.3.1.2 System zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit

WIENDAHL ET AL. schlagen einen Ansatz zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems vor. Ziel ist die Bestimmung eines Wandlungsfähigkeitsindex für zu vergleichende Produktionssysteme und deren Betriebsmittel. Das Bewertungssystem beruht auf den folgenden Wandlungsbefähigern¹⁶ eines Produktionssystems nach

¹⁶ HEINEN ET AL. sehen die Wandlungsbefähiger Universalität, Mobilität, Modularität, Kompatibilität sowie Skalierbarkeit vor [HRW08, S. 26f.]. Im Rahmen des Bewertungsverfahrens nach WIENDAHL ET AL. wird die Skalierbarkeit unter die Wandlungsbefähiger Modularität bzw. Universalität gefasst. Ergänzend

[HRW08]: Universalität, Mobilität, Modularität und Kompatibilität [WNK+05, S. 84ff.]. Ein exemplarisches Ergebnis des Ansatzes ist in Bild 4-6 dargestellt.

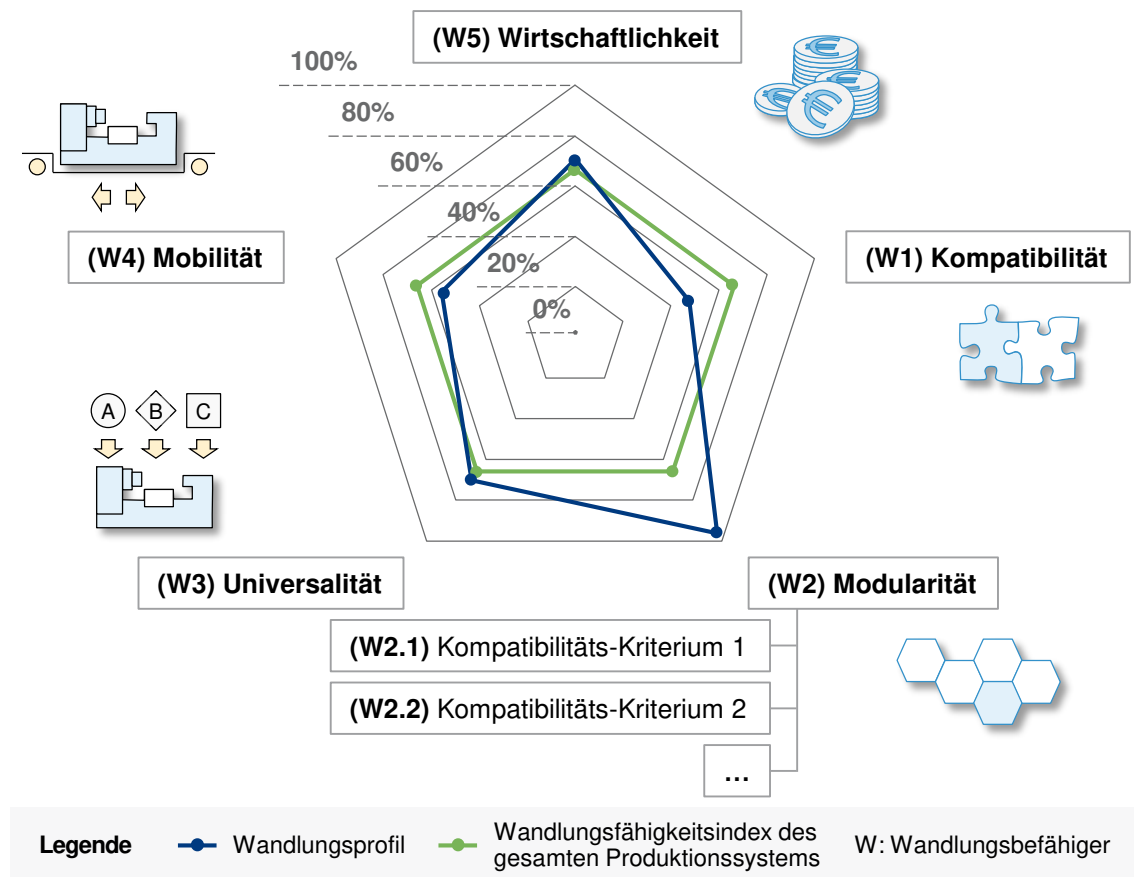


Bild 4-6: Beispiel eines Wandlungsprofils nach [WNK+05, S. 89]

Die Universalität ist die Fähigkeit, Veränderungen in Bezug auf Produkte und Technologien zu erfüllen. Mobilität beschreibt den Grad der Einschränkung, die auf Basis von räumlicher Anordnung von Ressourcen entsteht. Modularität ist das Maß in dem standardisierte Elemente des Produktionssystems ausgetauscht werden können. Kompatibilität ist der Grad der Vernetzungsfähigkeit von Elementen im Produktionssystem hinsichtlich Stoff, Energie- und Informationsflüssen [HRW08, S. 26f.]. Darüber hinaus wird der Faktor Wirtschaftlichkeit berücksichtigt, da die Wandlungsfähigkeit eines Betriebsmittels stets in direkter Relation zu seinen Kosten steht. Es herrscht ein Spannungsfeld aus „Low-cost-Einzelmaschinen“ auf der einen Seite und extrem teuren „High-Tech-Universalmaschinen“ auf der anderen Seite vor [WNK+05, S. 84].

Grundlage des Bewertungsverfahrens auf Basis der Wandlungsbefähiger ist ein Zielbaumverfahren, welches eine Art Nutzwertanalyse darstellt. Es ist eine dreistufige Krite-

kommt der Faktor Wirtschaftlichkeit zum Bewertungssystem hinzu. In [WRN14, S. 133] werden diese hingegen separat aufgeführt.

rien-Hierarchie [vorgegeben], welche die Bewertungskriterien logisch gliedert und gruppiert. Die erste Stufe stellt einen zusammengefassten Wandlungsfähigkeitsindex des betrachteten Produktionssystems dar. Die zweite Stufe beinhaltet die Wandlungsbefähiger, welche in der dritten Stufe in bewertbare Kriterien heruntergebrochen werden. Diese Kriterien können über einen paarweisen Vergleich bewertet und zu den vorherigen beiden Stufen aggregiert werden [WNK+05, S. 84ff.].

Die Aggregation der Kriterien zu den Wandlungsbefähigern und die Aggregation der Wandlungsbefähiger zu dem Wandlungsfähigkeitsindex geschieht durch die Multiplikation der bewerteten Kriterien bzw. der Wandlungsbefähiger mit ihren Gewichtungen. Sowohl für die Kriterien als auch für Wandlungsbefähiger werden Gewichtungen vorgeschlagen. Anschließend werden der Wandlungsfähigkeitsindex und das Wandlungsprofil dargestellt. Das Wandlungsprofil eines Produktionssystems sind die Ausprägungen der Wandlungsbefähiger [WNK+05, S. 88f].

Bewertung: Der Ansatz nach WIENDAHL ET AL. ermöglicht eine Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. So können unterschiedliche Produktionssysteme miteinander verglichen werden. Der Ansatz eignet sich nicht, um einzelne Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen zu bewerten. So würde sich mit dem Ansatz ausschließlich die möglicherweise gesteigerte Wandlungsfähigkeit aufzeigen lassen.

4.3.2 Ansätze zur Analyse und Bewertung der Komplexität von Produktionssystemen

Im Rahmen der Ansätze zur Analyse und Bewertung der Komplexität von Produktionssystemen wird im folgenden Kapitel 4.3.2.1 zunächst die Design Structure Matrix mit Erweiterungen vorgestellt. Im anschließenden Kapitel 4.3.2.2 wird ein Modell zur empirischen Bewertung von Produktionssystemen beschrieben.

4.3.2.1 Design Structure Matrix mit Erweiterungen

STEWART führte 1981 erstmals die Matrixform zur Strukturierung von Aufgaben und Prozessen ein [PAA+17, S. 86]. Die sogenannte Design Structure Matrix (DSM) und damit einhergehende Verfahren zur Clusterung werden seitdem zur Abbildung und Analyse von Systemen eingesetzt. Das Ziel ist eine Strukturierung von Systemen verschiedenster Art in Gruppen, welche innerhalb einer Gruppe viele Beziehungen und zu anderen Gruppen wenige Beziehungen aufweisen [PE94]. Seit der Entwicklung wurde die DSM mit ihren Anwendungen und Auswertemethoden stetig von bspw. STEWART, EPPINGER UND PIMMLER weiterentwickelt [Ste81], [EWS+94], [PE94], [UE95], [ECW+98].

Die klassische DSM ist eine symmetrische Matrix. In den Zeilen und den Spalten stehen die Systemelemente, während in den Zellen der Matrix die Beziehungen definiert werden [Mau07]. Bild 4-7 zeigt ein vereinfachtes Beispiel einer DSM zur Abbildung von Baugruppen eines Autos.

Bauteil	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Rahmen	1		X	X	X		X	X	X	X		
Lenksystem	2	X										
Motor	3	X			X	X	X	X	Mögliches Modul 1			
Abgassystem	4	X		X								
Motorsteuergerät	5			X			X					
Kraftstoffversorg.	6	X		X		X						
Pedale	7	X		X								
Antriebswelle	8	X									X	
Differenzial	9	X									X	X
Antriebskette	10								X	X		X
Getriebe	11				Mögliches Modul 2					X	X	

Bild 4-7: Beispiel einer Design Structure Matrix nach [Mau07, S. 55] und [HHA13, S. 89] in Anlehnung an [PE94]

Die Art der Beziehungen, welche mit Hilfe der DSM beschrieben werden, ist vielfältig. BROWNING gliedert die Arten der DSM in statisch und zeitbasiert. Die statischen DSM werden wiederum in komponenten- und personenbasiert untergliedert. Die zeitbasierten DSM werden in aktivitäten- und parameterbasierte DSM untergliedert [Bro01, S. 293]. Komponentenbasierte DSM haben das Ziel, eine Systemarchitektur mit seinen Komponenten darzustellen, um Rückschlüsse auf die baulichen Zusammenhänge zu ermöglichen. Personenbasierte DSM dienen zur Modellierung von organisatorischen Strukturen. Aktivitätenbasierte DSM bilden Aktivitätsabfolgen ab und parameterbasierte beschreiben physikalische Abhängigkeiten eines Produkts [Bro01, S. 293ff.]. Die Übersicht über die Arten der DSM ist in Bild 4-8 dargestellt.

Das Vorgehen zur Strukturierung eines Systems mit Hilfe der DSM gliedert sich nach PIMMLER in drei Schritte [PE94, S. 3]. Der erste Schritt ist die **Dekomposition des Systems in Elemente**. Das grobe Modell des zu strukturierenden Systems stellt die Grundlage dafür dar. Die relevanten Flussbeziehungen in Form von Stoff-, Energie- und Informationsflüssen sowie räumliche Beziehungen zwischen den Systemelementen werden beschrieben [PE94, S. 3].

Im zweiten Schritt wird die **Dokumentation der Beziehungen zwischen den Elementen** durchgeführt. Das bedeutet, es werden die Beziehungen in die DSM übertragen und die Beziehungen zwischen den Systemelementen in den Matrixfeldern bewertet. Dies geschieht auf einer Skala von stark negativ bis stark positiv [PE94, S. 4f.].

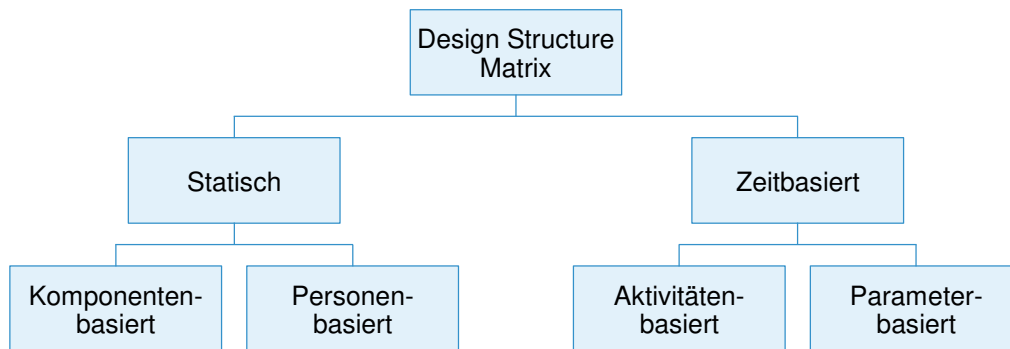


Bild 4-8: Übersicht über die Arten der DSM nach [Bro01, S. 293]

Abschließend wird das **Clustern der Elemente in Blöcke** durchgeführt. Im Rahmen einer Clustering der Systemelemente wird die Matrix umsortiert, um die Systemelemente in Blöcke zu strukturieren. Dafür werden schrittweise Spalten und Zeilen gleichgerichtet verschoben. Gleichgerichtet bedeutet, dass wenn ein Systemelement in der Matrix nach rechtsverschoben wird, es gleichzeitig um eine Zeile nach unten rückt. Diese Umsortierung wird so lange durchgeführt, bis die Systemelemente mit positiven Beziehungen zueinander nah beieinander liegen. I.d.R. liegen die Zellen mit starken Abhängigkeiten in der Nähe der Matrixdiagonalen. So besitzen die Cluster idealerweise starke interne Beziehungen, während die Beziehungen zu Elementen außerhalb des Clusters schwach sind [PE94, S. 5f.].

Anwendungen und Erweiterungen der Design Structure Matrix

MAURER stellt eine Übersicht von Anwendungen und Erweiterungen der Design Structure Matrix zusammen. Exemplarische Anwendungen reichen von einer Wissenserfassung über die Abbildung von Aktivitäten und Informationen im Rahmen von Prozessen bis hin zur Analyse von Produkten und deren Architekturen [Mau07, S. 55f.].

Die Domain Mapping Matrix (DMM) ist bspw. eine Erweiterung der DSM über mehrere Domänen bzw. Disziplinen. Dabei wird die Design Structure Matrix entweder horizontal oder vertikal erweitert, sodass sie nicht mehr zwingend symmetrisch ist [DB07, S. 306]. Weiterhin kann nicht nur die Größe der Matrix an sich verändert werden, sondern auch die Zelleninhalte. Bspw. beschreiben PIMMLER ET AL. ein Klimatisierungssystem über die vier Parameter „Spatial“, „Energy“, „Information“ und „Material“, welche als räumliche Nähe, Energie-, Informations- und Stofffluss übersetzt werden können [PE94, S. 7]. Dabei werden die Parameter als separate Sichten auf das System gesehen und können somit in einzelne Matrizen aufgetragen werden [PE94, S. 5].

Graphendarstellung

Eine graphische Darstellungsart von Systemen sind Graphendarstellungen. Nach MAURER können sie zur Visualisierung von Informationen zu Abhängigkeiten in der Produktentwicklung eingesetzt werden. Dabei gibt es verschiedene Arten von Graphendarstellungen. Ein simples Beispiel sind Mind Maps [Mau07, S. 45f.].

Graphen können die gleiche Information wie Matrizen bzw. Design Structure Matrizen darstellen. Beide Darstellungsarten können ineinander transformiert werden [And91, S. 133ff.]. MAURER ET AL. stellen ein Tool MOFLEPS (**M**odel **F**lexible **P**roduct **S**tructures) vor, mit dem Design Structure Matrizen automatisiert in Graphendarstellungen überführt werden können. Stark vernetzte Systemelemente werden mit ihren Verbindungen zentral dargestellt, während weniger vernetzte Elemente am Rand liegen. Die Graphen sind dynamisch und selbstordnend. Das bedeutet, dass die Elemente sich durch einfaches anklicken der Knoten in den Mittelpunkt der Struktur rücken lassen, um sie so zu analysieren [MBS+05]. Bild 4-9 zeigt ein Beispiel der Graphendarstellung.

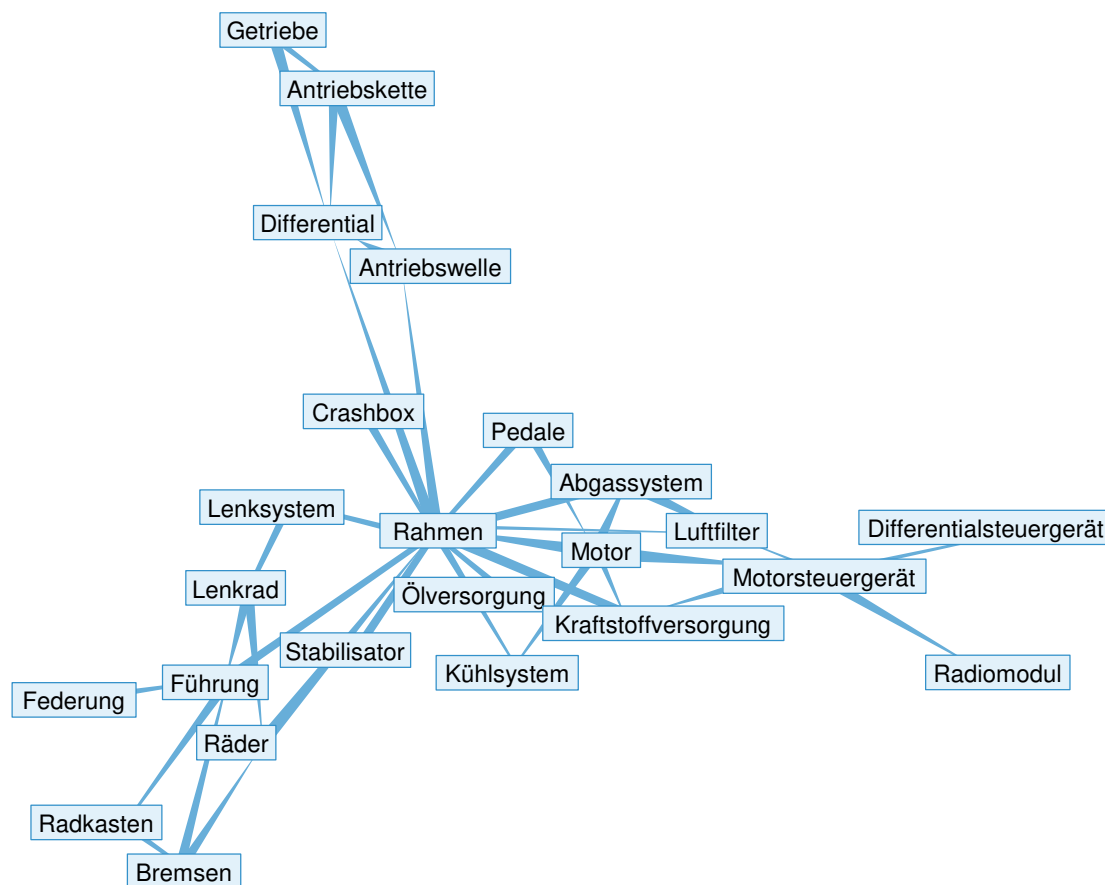


Bild 4-9: Beispiel einer Graphendarstellung nach [Mau07, S. 165f.]

Bewertung: Die Design Structure Matrix ist ein verbreitetes Verfahren zur Strukturierung von Systemen. Hervorzuheben sind die zahlreichen Forschungsarbeiten, welche die DSM und Abwandlungen der DSM stetig weiterentwickelt haben.

Im Rahmen einer Investitionsbewertung kann eine DSM zur Strukturierung des Problems helfen. Die zentralen Herausforderungen bei der Bewertung wie bspw. die Bewertung des Nutzens und der Erweiterbarkeit von Industrie 4.0 Anwendungen (vgl. Kapitel 3.6) werden jedoch nicht adressiert.

4.3.2.2 Modell zur empirischen Bewertung von Produktionssystemen

BECKER ET AL. entwickelten einen Ansatz zur Analyse von komplexen Produktionssystemen auf der Basis der Systemtheorie in Kombination mit klassischen Leistungskennzahlen. Ziel ist die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Struktur und Leistung des Maschinenverbundes in einem Fertigungssystem [BMW13, S. 324].

Zu Beginn werden Arbeitsstationen des Produktionssystems als Knoten dargestellt. Materialflussbeziehungen werden als Kanten zwischen den Knoten beschrieben. Die Kanten werden entsprechend der Anzahl an bewegtem Material sowie an Zwischen- und an Endprodukten gewichtet. Weiterhin wird ein Zentralitätsmaß bestimmt. Für einen Knoten wird dies durch den Quotienten der Anzahl der kürzesten Wege, die durch den besagten Knoten passieren, normiert durch die Gesamtzahl der kürzesten Wege zwischen allen Knoten, bestimmt. Das Zentralitätsmaß kann als Wichtigkeit einer Arbeitsstation im Produktionssystem interpretiert werden. Dafür wird angenommen, dass je wichtiger eine Arbeitsstation ist, desto eher befindet sie sich in der Mitte einer Produktion [BMW13, S. 327f.].

Auf der Basis einer empirischen Analyse von sechs Unternehmen identifizierten BECKER ET AL. einen Zusammenhang zwischen einem steigenden Zentralitätsmaß eines Produktionssystems und einer höheren durchschnittlichen verspäteten Auslieferung. Gleichermassen wird eine Ungleichverteilung zwischen der kumulierten Anzahl an Knoten bzw. Arbeitsstationen und vom Work in Progress¹⁷ im Produktionssystem identifiziert. Konkret wird identifiziert, dass sich der Großteil des Work in Progress auf eine relativ geringe Anzahl an Arbeitsstationen verteilt [BMW13, S. 335f.]. Ebenso werden weiterführende Analysen über einen sogenannten Clusterings-Koeffizienten zur Analyse der Produktionssystemstruktur durchgeführt.

Bewertung: Der Ansatz zur Analyse von komplexen Produktionssystemen basiert auf der empirischen Erhebung und Auswertung von großen Datenmengen über mehrere Produktionssysteme. Dabei ist die empirische Herangehensweise hervorzuheben.

Die Übertragung des Ansatzes auf die Bewertung einer Investitionsentscheidung ist jedoch nicht einfach gegeben. Ein zentraler Grund ist, dass die Datengrundlage vor und nach der Investition gesammelt werden müsste, um sie retrospektiv zu bewerten. Dies ist i.d.R. zu aufwändig und entspricht nicht den gestellten Anforderungen (vgl. Kapitel 3.6).

¹⁷ Der Work in Progress bzw. auch Work in Process stellt eine Kenngröße für das sich in der Bearbeitung befindliche Material dar. Gemessen werden kann der Work in Progress sowohl in Stückzahlen als auch in Arbeitsstunden [Got16, S. 117f.].

4.4 Kennzahlensysteme

Im Folgenden wird auf Kennzahlen und Kennzahlensysteme als Instrument der Unternehmenssteuerung eingegangen. Ein Kennzahlensystem stellt eine Strukturierung von einer Vielzahl an Kennzahlen dar. Die Kennzahlen werden in einen sachlogischen und bzw. oder eine rechnerische Beziehung gesetzt [Pre08, S. 17], [Ste14, S. 121]. Nach TAVASLI lassen sich Kennzahlen mit Hilfe von dreizehn Klassifikationsmerkmalen beschreiben [JEG+19, S. 761], [Tav07, S. 173].

Die Klassifikationsmerkmale reichen von der Einordnung eines Kennzahlensystems zu einer betrieblichen Funktion, über die Beschreibung der quantitativen und inhaltlichen Struktur bis hin zur Zielorientierung [JEG+19, S. 761], [Tav07, S. 173]. Bild 4-10 und Bild 4-11 zeigen die Merkmale zur Klassifikation von Kennzahlen.

Entsprechend den Klassifikationskriterien gibt es eine Vielzahl an Kennzahlensystemen für verschiedenste Unternehmensbereiche und Anwendungszwecke. Es wird zwischen zwei Kategorien von Kennzahlensystemen unterschieden. In Kapitel 4.4.1 werden zunächst die allgemeinen und in Kapitel 4.4.2 die spezifischen Kennzahlensysteme vorgestellt. In den Kategorien werden exemplarisch jeweils zwei Kennzahlensysteme vorgestellt [JEG+19, S. 761].

Klassifikations- merkmal	Arten betrieblicher Kennzahlen							
betriebliche Funktionen	Kennzahlen aus dem Bereich							
	Beschaffung	Logistik	Produktion	Absatz	Personal- wirtschaft	Finanz- wirtschaft		
statistische Form	absolute Zahl				Verhältniszahl			
	Einzel- zahlen	Summen	Differenzen	Mittelwerte	Beziehungs- -zahlen	Gliederungs- -zahlen	Index- zahlen	
quantitative Struktur	Gesamtgrößen				Teilgrößen			
inhaltliche Struktur	Wertgrößen				Mengengrößen			
zeitliche Größen	Zeitpunktgrößen				Zeitraumgrößen			
Erkenntniswert	Kennzahlen mit							
	selbständigem Erkenntniswert				unselbständigem Erkenntniswert			
Quelle im Rechnungs- wesen	Kennzahlen aus der							
	Bilanz		Buchhaltung		Kostenrechnung		Statistik	
Gebiet der Aussage	gesamtbetriebliche Kennzahlen				teilbetriebliche Kennzahlen			
Zeitbezug	Soll-Kennzahlen (zukunftsorientiert)				Ist-Kennzahlen (vergangenheitsorientiert)			
Handlungs- bezug	normative Kennzahlen				deskriptive Kennzahlen			

Bild 4-10: Merkmale zur Klassifikation von Kennzahlen (1/2) nach [Tav07, S. 173]

Objektbereich	globale Kennzahlen		spezifische Kennzahlen		
Datenherkunft und Zweck	intern		extern		
Ziel-orientierung	zeitlicher Horizont				
	strategische Kennzahlen	operative Kennzahlen		taktische Kennzahlen	
	Zielinhalt				
	Struktur- und Rahmen-kennzahlen	Produktivitäts-kennzahlen		Leistungs-kennzahlen	
				Zeit	Kosten

Bild 4-11: Merkmale zur Klassifikation von Kennzahlen (2/2) nach [Tav07, S. 173]

4.4.1 Allgemeine Kennzahlensysteme

Aus der Betriebswirtschaftslehre und insbesondere aus dem Bereich der Finanzwirtschaft stammen zahlreiche Kennzahlensysteme [Ste14, S. 125]. Beispiele sind das DuPont System of Financial Control welches in Kapitel 4.4.1.1 und das ZVEI Kennzahlensystem welches in Kapitel 4.4.1.2 vorgestellt werden.

4.4.1.1 DuPont System of Financial Control

Der amerikanische Chemiekonzern DuPont entwickelte 1919 das finanzwirtschaftliche Kennzahlensystem „System of Financial Control“. Ziel ist eine Unterstützung der Planung, Steuerung und Kontrolle des Unternehmenserfolgs. Das gesamte Kennzahlensystem unterliegt einer Rechensystematik. Das impliziert eine rechnerische Beziehung zwischen den Kennzahlen [Aic97, S. 92], [Ste14, S. 127ff.]. Die Kennzahlen werden in der Spitzenkennzahl Return On Investment (ROI) zusammengeführt. Dieser setzt sich aus den beiden Kennzahlen Umsatzrentabilität und Kapitalumschlag zusammen, welche auf weiteren Ebenen wiederum untergliedert werden [Ste14, S. 128], [Joo06, S. 67]. Dargestellt ist ein Ausschnitt aus dem DuPont System of Financial Control in Bild 4-12.

Das Kennzahlen-System beschreibt die Rentabilität eines bestimmten Kapitaleinsatzes und ihre Einflussgrößen. Die Untergliederung des Kapitalumschlags gibt Auskunft über das Anlage- und Umlaufvermögen, während die Untergliederung der Umsatzrentabilität Auskunft über die Aufwands- und Ertragsgrößen gibt. Mit Ausnahme der Kennzahlen Return on Investment, Kapitalumschlag und Umsatzrentabilität, werden ausschließlich absolute Zahlen im Kennzahlensystem genutzt [Ste14, S. 128ff.].

Bewertung: Das DuPont System of Financial Control unterstützt bei der Planung, Steuerung und Kontrolle des Unternehmenserfolgs. Die rechnerische Verknüpfung der Kennzahlen erzeugt eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

Eine Einschränkung ist die ausschließliche Fokussierung des Kennzahlensystems auf die Rentabilitätsmaximierung. Weiterhin stellt die Informationsbeschaffung eine zentrale Herausforderung dar. Insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen liegen die notwendigen Informationen für das Ausfüllen des Kennzahlensystems für eine Investitionsbewertung häufig nicht bzw. nur in unzureichender Form vor.

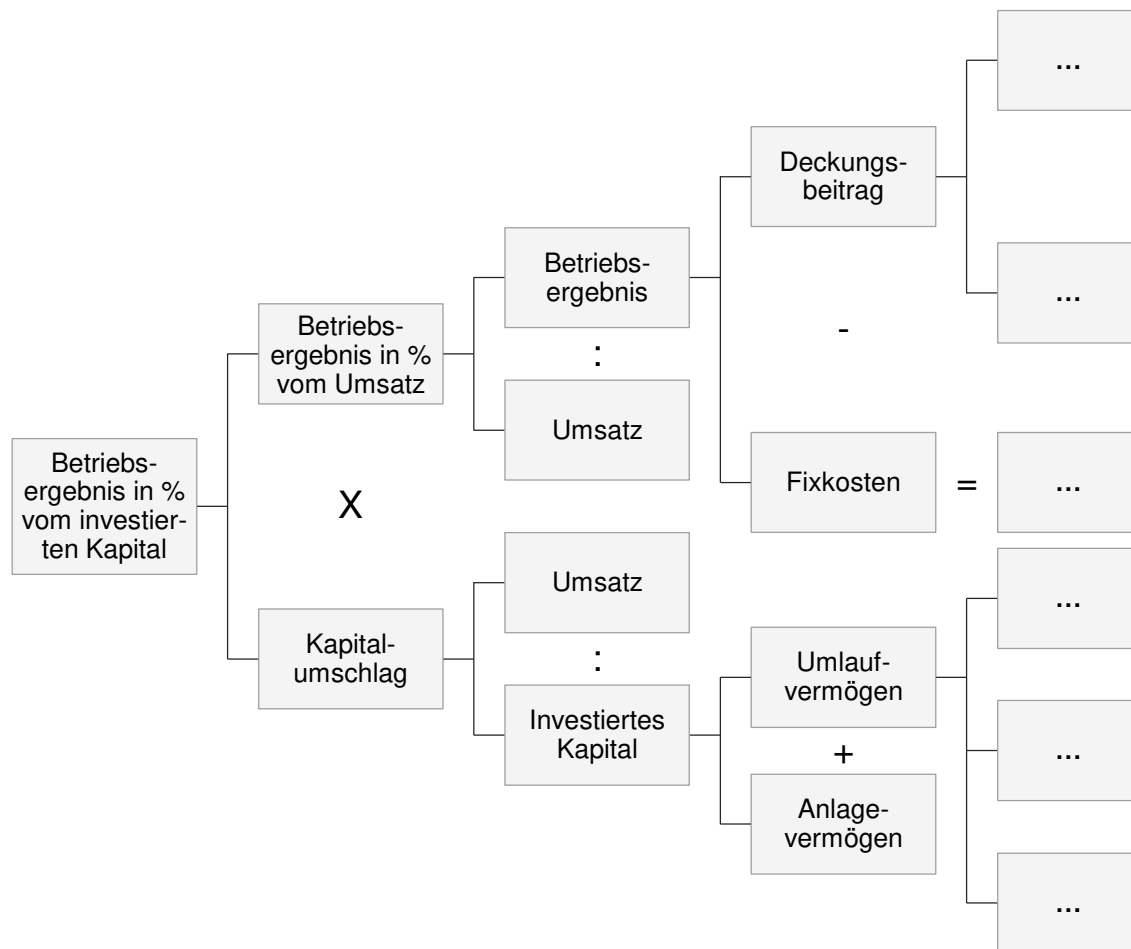


Bild 4-12: Ausschnitt aus dem DuPont System of Financial Control nach [Ste14, S. 129], [Joo06, S. 67]

4.4.1.2 ZVEI Kennzahlensystem

Der Zentralverband der Elektrotechnischen Industrie (ZVEI) veröffentlichte 1969 das ZVEI Kennzahlensystem. Wie das DuPont System of Financial Control ist es als Kennzahlen-Pyramide aufgebaut [Ste14, S. 131]. Dargestellt ist die Struktur des ZVEI Kennzahlensystems in Bild 4-13.

Die Ermittlung der Effizienz eines Unternehmens ist das Ziel des ZVEI Kennzahlensystems. Grundlage ist eine Wachstums- und Strukturanalyse. Im Rahmen der **Wachstumsanalyse** wird die Entwicklung des Unternehmens im Vergleich zur Vorperiode beschrieben und analysiert. Dies geschieht auf Basis von Wachstumsgrößen wie Vertriebstätigkeit, Ergebnis, Kapitalbindung, Wertschöpfung und Beschäftigung [Ste14, S. 131].

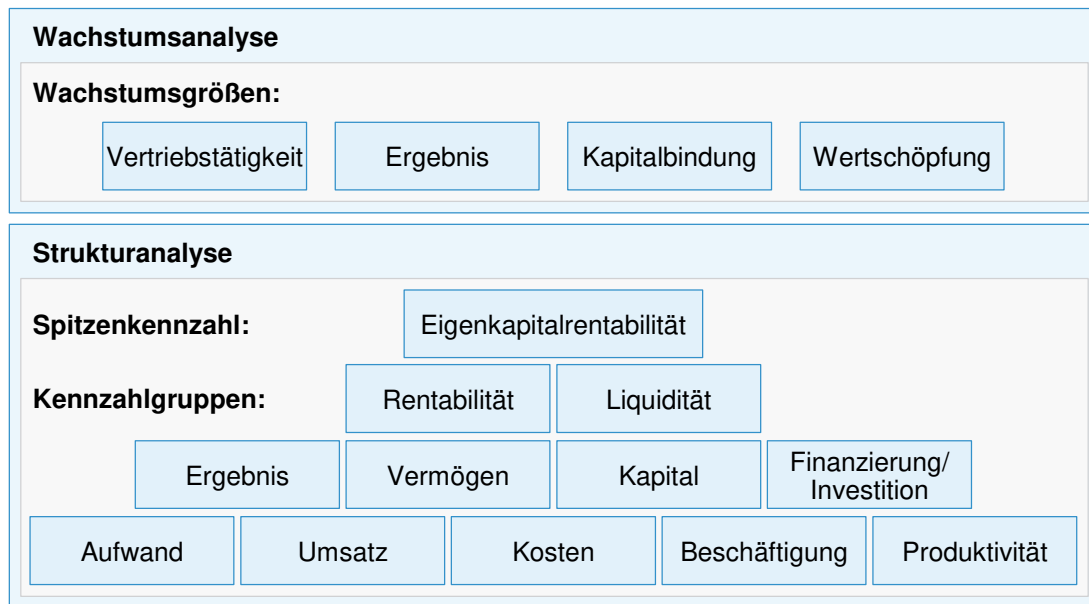


Bild 4-13: Struktur des ZVEI Kennzahlensystems nach [Ste14, S. 132]

In der **Strukturanalyse** wird die Unternehmenseffizienz in vier Sektoren mithilfe von Ertragskraft- und Risikokennzahlen untersucht. Diese Analyse wird ausgehend von der Spitzenkennzahl „Eigenkapitalrentabilität“ durchgeführt und bezieht sich ausschließlich auf eine Periode [Ste14, S. 132f].

Das ZVEI Kennzahlensystem umfasst insgesamt 210 Kennzahlen, welche rechnerisch miteinander verknüpft sind. Grundlage der erforderlichen Daten sind das interne und das externe Rechnungswesen [Joo06, S. 68].

Bewertung: Das ZVEI Kennzahlensystem dient zur Ermittlung der Effizienz eines Unternehmens. Wie bei dem DuPont System of Financial Control erzeugt die rechnerische Verknüpfung der Kennzahlen eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

Eine Entscheidungsunterstützung bei Investitionen bietet das ZVEI Kennzahlensystem nicht. Insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen liegen die notwendigen Informationen für das Ausfüllen des Kennzahlensystems häufig nicht bzw. nur in unzureichender Form vor.

4.4.2 Spezifische Kennzahlensysteme

Neben den beschriebenen, allgemeinen Kennzahlensystemen existieren bereichsspezifische Kennzahlensysteme. Im Rahmen der Produktion und Logistik werden im folgenden Kapitel 4.4.2.1 das Wertstromkennzahlensystem mit Fokus Produktion und in Kapitel 4.4.2.2 das Logistikkennzahlensystem für die Produktion vorgestellt.

4.4.2.1 Wertstromkennzahlensystem mit Fokus Produktion

GOTTMANN entwickelte ein Wertstromkennzahlensystem mit dem Fokus Produktion. Motivation ist die These, dass eine *Wertstrombetrachtung die konsequente Ausrichtung der Produktion auf wertschöpfende Tätigkeiten und damit auf eine Konzentration auf die Effizienz der Produktionsabläufe* darstellt. Oberster Maßstab dabei ist die Kundenorientierung [Got16, S. 157].

Aus der obersten Zielsetzung der Kundenorientierung leiten sich die fünf sog. Zielkennzahlen Kosten, Zeit, Qualität, Flexibilität und Innovation ab. Entlang des Wertstromprozesses werden weiterhin die fünf Erfolgsfaktoren Anlieferprozesse, Produktionsprozesse, Logistikprozesse, Produktionsplanung und -steuerung sowie Kundenprozesse definiert. Sie dienen dazu die übergeordneten Zielkennzahlen zu konkretisieren. Dies geschieht in einer Gegenüberstellung der Wertstromzielkennzahlen und der Erfolgsfaktoren in einer Matrix [Got16, S. 158ff.]. Dargestellt ist das Wertstromkennzahlensystem in Bild 4-14.

Zielkennzahl	Anlieferprozesse	Produktionsprozesse	Logistikprozesse	PPS und Organisation	Kundenprozesse
Kosten/ Einheit	Materialkosten	Produktionskosten	Logistikkosten	Prozesskosten	Transportkosten
Fließgrad	Wiederbeschaffungszeit	Bearbeitungszeiten	Liegezeiten/ Reichweiten	Losgrößen	Transportzeiten
Termin-treue	Abweichung Liefertermin	Abweichung Produktionszeit	Materialverfügbarkeit	Abweichung Lieferzeit	Abweichung Transportzeit
Auslieferqualität	Fehlerquote	Produktionsfehlerquote	Handlungsfehlerquote	Falschverbauquote	Transportschädenquote
Reaktionsfähigkeit	Wiederbeschaffungszeit	Gesamtanlageneffektivität	Materialverfügbarkeit	Losgrößen	Transportwege
Variantenflexibilität	Variantenflex. Lieferant	Variantenflex. Produktion	Variantenflex. Logistik	Variantenflex. PPS, Orga.	Variantenflex. Transport
Innov.-grad Wertstrom	Innovationsgrad Anlieferprozesse	Innovationsgrad Produktion	Innovationsgrad Logistik	Innovationsgrad Organisation	Innovationsgrad Kundenprozesse

Abkürzung: PPS: Produktionsplanung und -steuerung

Bild 4-14: Wertstromkennzahlensystem nach [Got16, S 159ff.]

GOTTMANN betont, dass das Wertstromkennzahlensystem *lediglich einen Rahmen [vorgibt], an dem sich der Anwender orientieren kann*. Dieser ist auf branchen- bzw. unternehmensspezifische Eigenheiten und Anforderungen anzupassen [Got16, S. 158].

Bewertung: Im Rahmen des Wertstromkennzahlensystems werden Kennzahlen entlang abstrakter Wertstromprozesse eines Unternehmens gegliedert. Dies ermöglicht eine gute Strukturierung der Kennzahlen für den Bereich der Produktion.

Entsprechend den anderen Kennzahlensystemen gilt jedoch, dass das Wertstromkennzahlensystem keine eigenständige Entscheidungsunterstützung bei Investitionen bietet. Insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen liegen die notwendigen Informationen für das Ausfüllen des Kennzahlensystems für eine Investitionsbewertung häufig nicht bzw. nur in unzureichender Form vor.

4.4.2.2 Logistikkennzahlensystem für die Produktion

Im Rahmen der VDI-RICHTLINE 4400 wurde eine Kennzahlenhierarchie mit dem Schwerpunkt auf die Produktionslogistik entwickelt. Oberstes Ziel ist eine hohe Logistikeffizienz. Diese gliedert sich in Logistikleistung und Logistikkosten. Die Logistikleistung lässt sich wiederum in die Teilziele hohe Verfügbarkeit, eine kurze Durchlaufzeit und ein hoher Lieferservice gliedern. Die Logistikkosten lassen sich in geringe Bestandskosten sowie geringe Prozesskosten gliedern [VDI4400, S. 5]. Das Kennzahlensystem ist in Bild 4-15 dargestellt.

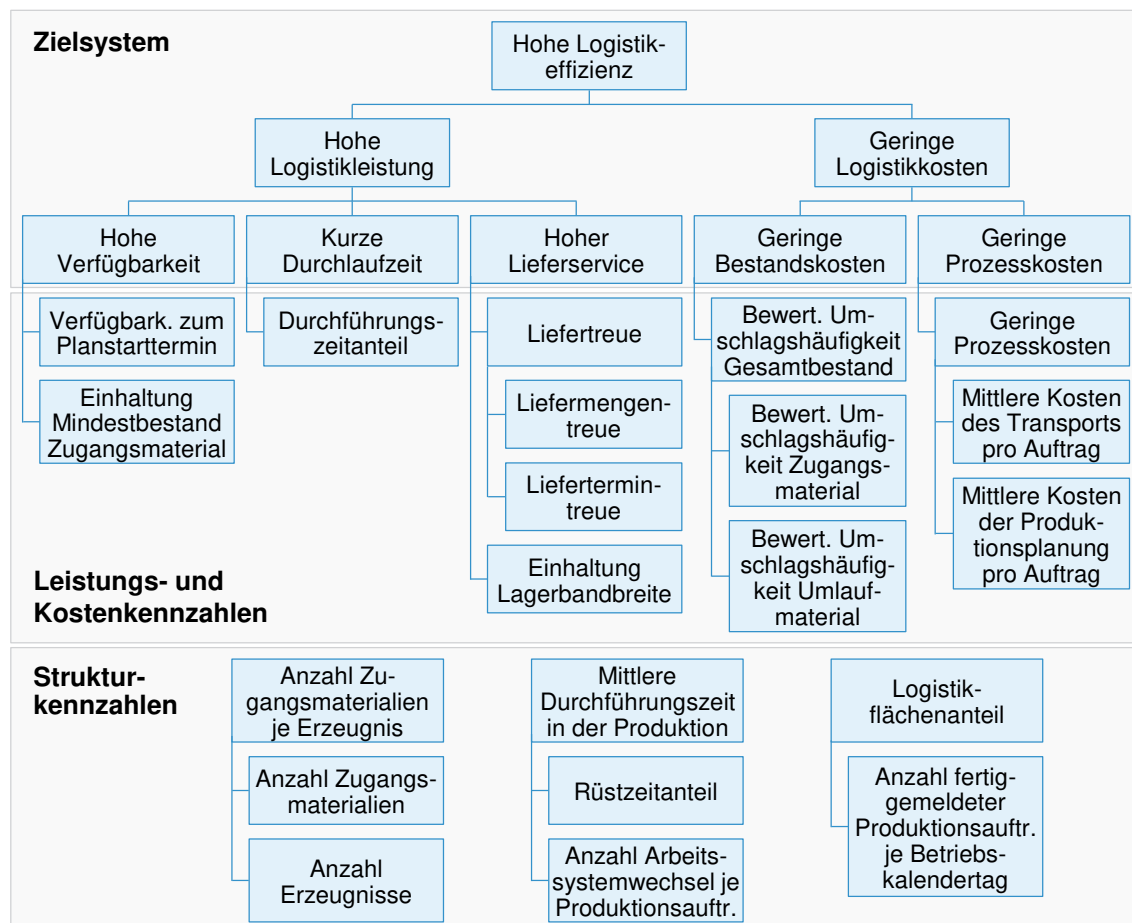


Bild 4-15: Logistikkennzahlensystem für die Produktion nach [VDI4400, S. 6]

Zur Operationalisierung der Logistikziele sind Leistungs- und Kostenkennzahlen definiert. Beispiele von Leistungskennzahlen zur Erreichung einer hohen Verfügbarkeit sind

die Verfügbarkeit zum Planstarttermin sowie die Einhaltung des Mindestabstands an Zugangsmaterial. Beispiele für geringe Prozesskosten sind die mittleren Kosten des Transports pro Produktionsauftrag [VDI4400, S. 6]. Weiterhin sind Strukturkennzahlen definiert, welche im Rahmen von Benchmarkinguntersuchungen zur Interpretation der Leistungs- und Kostenunterschiede zwischen Unternehmen gedacht sind. Sie sind keinem übergeordneten Ziel zugeordnet. Beispiele der Strukturkennzahlen sind die Anzahl der Erzeugnisse und der Rüstzeitanteil [VDI4400, S. 7].

Bewertung: Die VDI-RICHTLINE 4400 stellt ein Kennzahlensystem mit dem Schwerpunkt auf die Produktionslogistik vor. Es dient bei einer ganzheitlichen Betrachtung somit insbesondere als sinnvolle Ergänzung zu weiteren Kennzahlensystemen für die Produktion. Wie die zuvor vorgestellten Kennzahlensysteme erlaubt es keine eigenständige Entscheidungsunterstützung bei Investitionen.

4.4.3 Weitere Kennzahlensysteme

Entsprechend der in Kapitel 4.4 aufgezeigten Klassifikationskriterien für Kennzahlensysteme nach TAVASLI existieren zahlreiche weitere Kennzahlensysteme für unterschiedlichste Anwendungs- und Unternehmensbereiche.

Beispielsweise entwickelten KAPLAN und NORTON das Balanced Scorecard. Das Balanced Scorecard stellt einen Strukturierungsrahmen für einen Einsatz von Kennzahlen im Rahmen der strategischen Unternehmensführung dar [GP14, S. 214], [KN97]. KLEIN ET AL. entwickelten ein Konzept für ein fertigungswirtschaftliches Kennzahlensystem. Untergliedert wird dies in die drei Gruppen Input, Prozess und Output [Sch12].

ACHELE entwickelte eine weitere Kennzahlensystematik, welche sich an strategischen Zielen sowie den Wettbewerbern orientiert. Unterscheiden lässt sich die Systematik insbesondere dadurch, dass neben einem Kennzahlensystem die Entwicklung des Kennzahlensystems in den Vordergrund der Arbeit gestellt wird [Aic97, S. 153f].

Im Rahmen der Produktion liefert die ISO-NORM 22400 einen weiteren Strukturierungsrahmen von Kennzahlen. Der Überblick über relevante Kennzahlen und die Einordnung in die Betriebsleitebene der Automatisierungspyramide sind das Ziel dieser Arbeit [ISO22400].

4.5 Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse bzw. -exploration

Im Rahmen der Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse bzw. -exploration wird im Folgenden auf drei Kategorien von Ansätzen eingegangen. Das sind zum einen Kreativitätstechniken, welche in Kapitel 4.5.1 vorgestellt werden. Weiterhin werden in Kapitel 4.5.2 Ansätze der Prozessmodellierung und -analyse und in Kapitel 4.5.3 Methoden der Vorausschau beschrieben.

4.5.1 Kreativitätstechniken

GAUSEMEIER ET AL. unterscheiden im Rahmen der Kreativität zwischen intuitivem Denken und diskursivem Denken. Bei dem intuitiven Denken läuft die Suche nach neuen Ideen im Unterbewusstsein des Problemlösers ab. In einer Inkubationsphase werden vorhandene Informationen bewertet, verglichen und in Beziehung gesetzt. Eine gefundene Idee äußert sich bei dem Problemlöser als plötzlicher Einfall. Bei dem diskursiven Denken handelt es sich um ein bewusstes, strukturiertes Vorgehen. Das Gesamtproblem wird dabei in Teilprobleme zerlegt. Anschließend werden die Teilprobleme einzeln gelöst. Dabei werden *bewusst Informationen zu dem Gesamtproblem und den Teilproblemen gesammelt, analysiert, variiert, neu kombiniert, geprüft, verworfen und wieder in Betracht gezogen*, um Denkblockaden zu überwinden [GDE+19, S. 183].

Kreativitätstechniken lassen sich in ein Portfolio mit den zwei Achsen intuitivem Denken und diskursivem Denken einordnen. Bei den Achsen wird jeweils zwischen einer niedrigen, mittleren und hohen Ausprägung unterschieden. Je weiter oben rechts sich eine Methode im Portfolio befindet, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für innovative Produktideen. Im Portfolio wird zwischen einzelnen Methoden und Methodensammlungen unterschieden [GDE+19, S. 184]. Dargestellt ist das Portfolio in Bild 4-16.

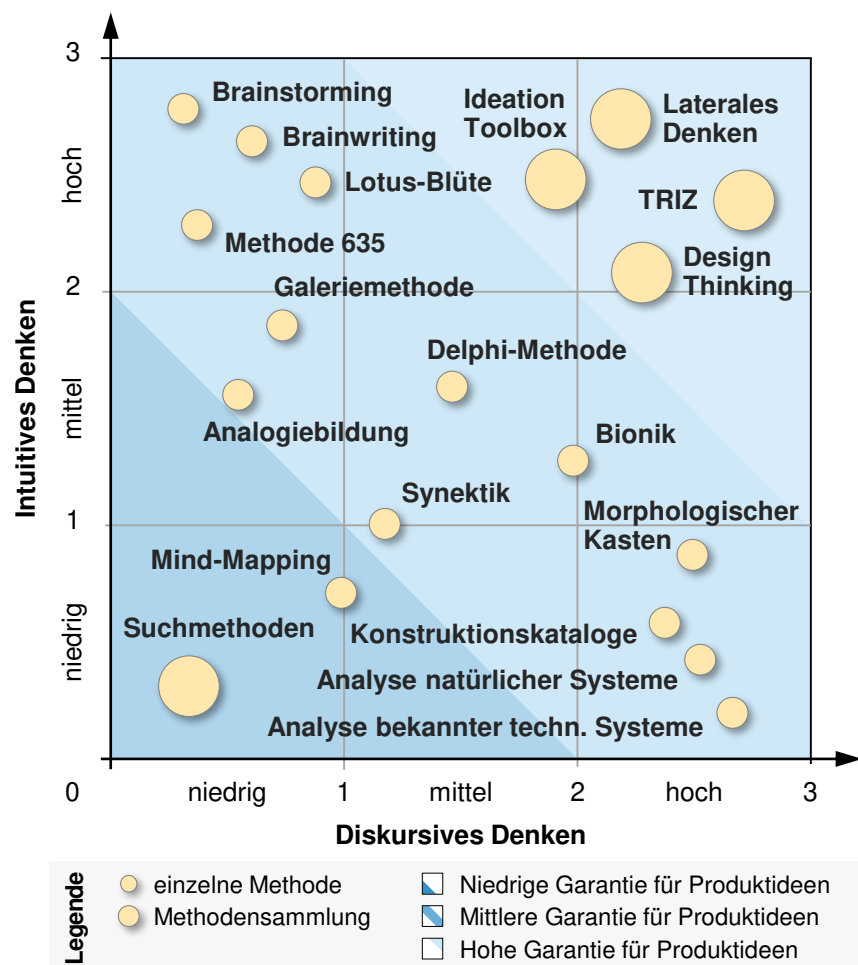


Bild 4-16: Portfolio an Kreativitätstechniken nach [GEK01, S. 123], [GDE+19, S. 184]

Ein Beispiel einer einzelnen Methode ist das Mind-Mapping. Im Rahmen des Mind-Mappings wird in der Mitte eines Papiers das Problem beschrieben. Von dem Problem ausgehend, werden Ideenbereiche festgehalten. Um diese Ideenbereiche werden konkrete Ideen beschrieben. Das Mind-Mapping ordnet sich in der unteren linken Ecke des Portfolios an Kreativitätstechniken ein [GDE+19, S. 186].

Ein Beispiel einer Methodensammlung ist die Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ). Kern der Methodensammlung bilden 40 innovative Prinzipien, die zur Generierung neuer Ideen eingesetzt werden. TRIZ ordnet sich in der oberen rechten Ecke des Portfolios an Kreativitätstechniken ein [GDE+19, S. 186].

Bewertung: Es gibt zahlreiche Kreativitätstechniken welche sich für verschiedenste Anwendungsfälle gut eignen. Die Kreativitätstechniken ermöglichen eine Identifikation von Potentialen einer Investition. Sie unterstützen jedoch nicht bei der eigentlichen Investitionsbewertung und stellen somit maximal nur einen Bestandteil des Investitionsbewertungsprozesses dar.

4.5.2 Ansätze der Prozessmodellierung und -analyse

Die Ansätze zur Modellierung von Geschäftsprozessen lassen sich hinsichtlich des Formalisierungsgrads und des Detaillierungsgrads bzw. der Modellierungstiefe gliedern. In dem resultierenden Portfolio wird der Formalisierungsgrad in die Kategorien „nicht formale (semantische) Modellierung“, „semiformale Modellierung“ und „formale Modellierung“ untergliedert. Nicht formale Modellierungsansätze sind Visualisierungen eines Sachverhalts mit anschaulichen Grafiken. Sowohl semiformale als auch formale Modellierungsansätze besitzen definierte Konstrukte und Modellierungsregeln. Formale Modellierungsansätze haben darüber hinaus das Ziel präzise und interpretationsfrei zu sein. Der Detaillierungsgrad wird in „grob“, „mittel“ und „fein“ gegliedert [GP14, S. 246].

Im Portfolio werden Zielsetzungen verortet. Nicht formale und semiformale Modellierungsansätze mit einem groben bis mittleren Detaillierungsgrad dienen zur Modellierung von Leistungserstellungsprozessen zur Optimierung der Ablauforganisation. Semiformale Modellierungsansätze mit einem mittleren Detaillierungsgrad dienen zur Modellierung der Leistungserstellungsprozesse um bspw. Systeme der Informationstechnik oder Fertigungssteuerungen zu konzipieren. Formale Modellierungsansätze mit einem feinen Detaillierungsgrad dienen zur Modellierung der Leistungserstellungsprozesse um bspw. Produktdatenmanagement- oder Workflowmanagement-Systeme zu implementieren [GP14, S. 246]. Dargestellt ist das Portfolio in Bild 4-17.

Verbreitete Methoden der Prozessmodellierung sind die Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse (OMEGA), Architektur Integrierter Informationssysteme (ARIS) mit erweiterten ereignisgesteuerten Prozessketten (eEPK), Business Process Model and Notation (BPMN), Structured Analysis and Design Technique (SADT), Petri-Netze und Unified Modeling Language (UML) [GP14, S. 248ff.].

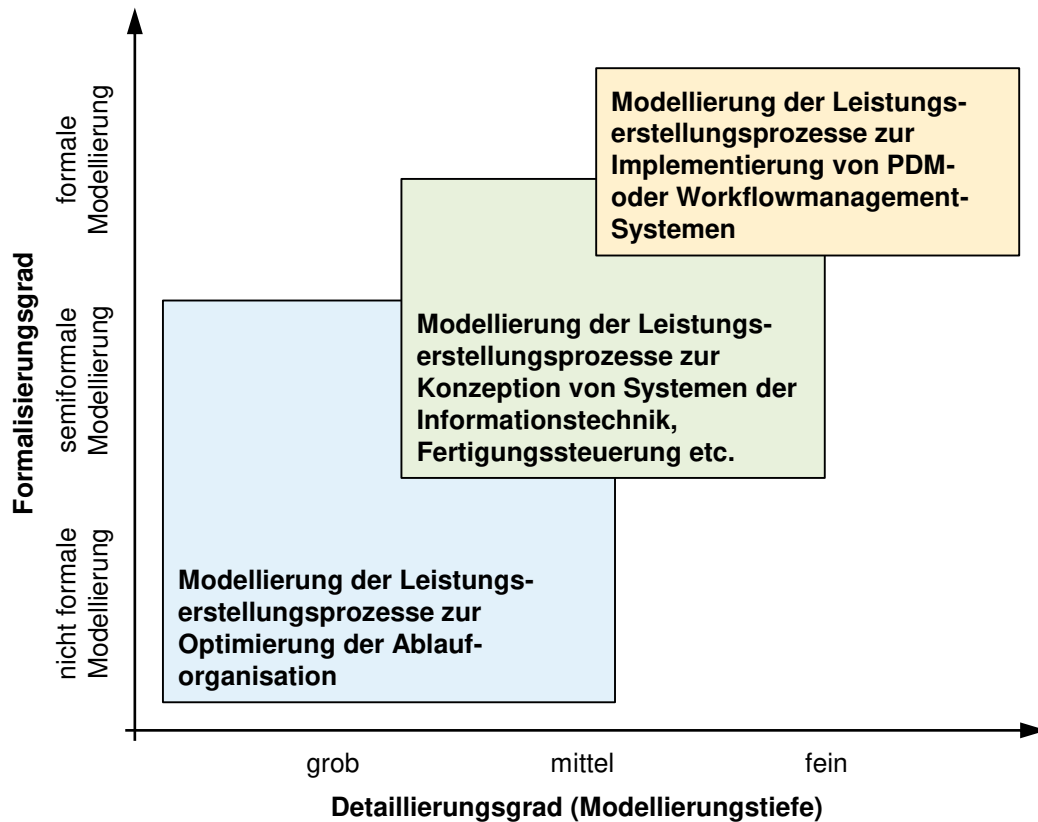


Bild 4-17: Gliederung der Ansätze zur Modellierung von Geschäftsprozessen nach [GP14, S. 246]

Bewertung: Die Ansätze der Prozessmodellierung und -analyse ermöglichen eine intuitive Abbildung von Geschäftsprozessen. Sie können eingesetzt werden, um die Rahmenbedingungen von Investition zu klären und Potentiale zu identifizieren.

Wie auch die Kreativitätstechniken, unterstützen die verschiedenen Ansätze der Prozessmodellierung jedoch nicht bei der eigentlichen Investitionsbewertung und stellen somit maximal einen Bestandteil des Investitionsprozesses dar.

4.5.3 Methoden der Vorausschau

Es gibt zahlreiche Methoden der Vorausschau. Die Methoden lassen sich hinsichtlich ihres Grades der Formalisierung und ihres zeitlichen Horizonts strukturieren. In einem Portfolio mit den entsprechenden Achsen ordnen GAUSEMEIER ET AL. 19 Methoden der Vorausschau ein [GDE+19, S. 155]. Dargestellt ist dies in Bild 4-18.

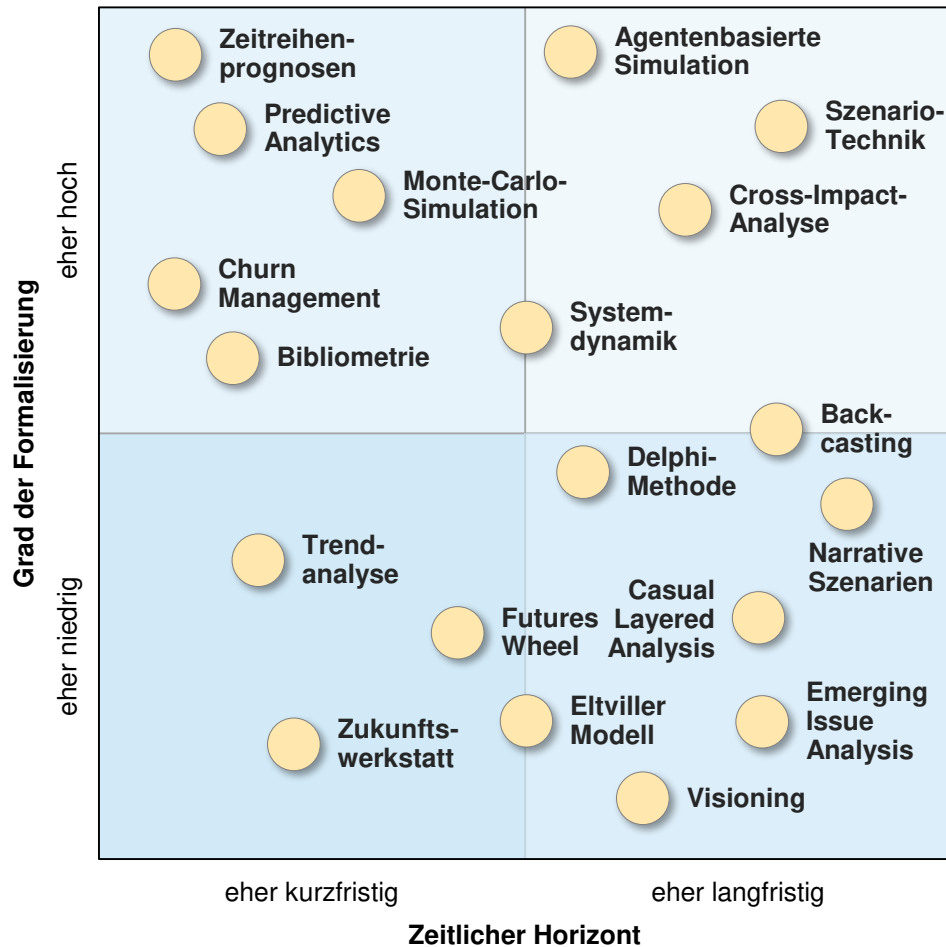


Bild 4-18: Portfolio an Methoden der Vorausschau nach [GDE+19, S. 155]

Beispielsweise umfasst eine Trendanalyse ein systematisches Suchen, Aufbereiten und Auswerten von Trends, welche als relevant für die Geschäftstätigkeit angesehen werden. Bei der Trendanalyse ist der Formalisierungsgrad eher niedrig und der Zeithorizont eher kurzfristig. Sie ordnet sich somit links unten im Portfolio ein [GDE+19, S. 156].

Eine agentenbasierte Simulation stellt eine Simulation von Märkten mittels künstlicher Individuen, sogenannten Agenten, dar. In der Simulation besitzen die Agenten Eigenschaften und können Aktionen ausführen. Die agentenbasierte Simulation ordnet sich auf Grund eines eher hohen Formalisierungsgrades und eines eher langfristigen Zeithorizonts oben rechts im Portfolio ein [GDE+19, S. 155].

Bewertung: Die Methoden der Vorausschau werden i.d.R. im Kontext der strategischen Führung eingesetzt. Im Rahmen einer Investitionsentscheidung können bspw. verschiedene Szenarien antizipiert oder Trends analysiert werden. Wie auch die Kreativitätstechniken und die Ansätze der Prozessmodellierung, unterstützen die Methoden der Vorausschau jedoch nicht bei der eigentlichen Investitionsbewertung und stellen somit maximal einen Bestandteil des Investitionsprozesses dar.

4.6 Methoden der Entscheidungsunterstützung

Im Rahmen der Methoden der Entscheidungsunterstützung werden exemplarisch drei Ansätze vorgestellt. Das sind die Nutzwertanalyse in Kapitel 4.6.1, Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution in Kapitel 4.6.2 und das Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation in Kapitel 4.6.3.

4.6.1 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein Verfahren zur *Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen* [FGN+13, S. 390]. Die Bestimmung eines Nutzwertes für zu bewertende Alternativen ermöglicht die Bewertung der Vorteilhaftigkeit sowie die Bildung einer Präferenzrelation zwischen den Alternativen und somit die Auswahl der relativ besten Alternative [LCW16, S. 388ff.]. Bild 4-19 zeigt ein Beispiel der Nutzwertanalyse. In dem Beispiel sind Alternativen im Rahmen einer IT-Systemauswahl zu bewerten.

Bewertungs- kriterien (Zielsystem) Bewertung: 0 bis 10	Gewichtung [in %]	Systemvarianten			
		System 1		System 2	
		Bew.	Nutzw.	Bew.	Nutzw.
1 Einmalige Kosten	(35)				
1.1 Hardware	10	3	0,3	5	0,5
1.2 Software	15	6	0,9	7	1,05
1.3 Einführung	10	7	0,7	8	0,8
2 Laufende Kosten	20	5	1,0	9	1,8
3 Akzeptanz	10	7	0,7	3	0,3
4 Funktionalität	15	3	0,45	9	1,35
5 Integrationsfähigkeit	10	4	0,4	5	0,5
6 Techn. Attraktivität	10	9	0,9	6	0,6
	100		5,35		6,9

Bild 4-19: Beispiel einer Nutzwertanalyse nach [GP14, S. 418]

Typischerweise werden dazu vier Schritte durchlaufen. Zu Beginn wird das Bewertungsziel bzw. die übergeordnete Kennzahl zur Bewertung definiert [Zan76, S. 89ff.]. Im zweiten Schritt werden die relevanten Kriterien zur Bewertung des Ziels identifiziert und gewichtet. Die Gewichtungen der Kriterien ergeben in Summe 100%. Anschließend wird die Leistung bzw. der Zielerfüllungsgrad der einzelnen Alternativen bewertet. Das kann bspw. auf einer Skala von 0 bis 10 Punkten geschehen [Zan76, S. 59ff.]. Die Punktbewertungen werden mit den Gewichtungen der Kriterien multipliziert und aufsummiert. Die Summe aller Teilprodukte ergibt den Nutzwert einer Alternative [Zan76, S. 73].

KUSTER ET AL. schlagen einen abschließenden, fünften Schritt vor, bei dem die Sensitivität bzw. die Stabilität des Ergebnisses analysiert wird. Dazu werden die Gewichte und Ausprägungen leicht variiert und der Einfluss auf die Rangfolge der Ergebnisse beobachtet [KHL+11, S. 423f.].

Für die IT Systeme werden exemplarisch die folgenden sechs Bewertungskriterien definiert: Einmalige Kosten, laufende Kosten, Akzeptanz, Funktionalität, Integrationsfähigkeit und technische Attraktivität. Die Einmaligen Kosten werden wiederum in Hardware, Software und Einführung untergliedert. Die Kriterien stellen das Zielsystem der Bewertung dar. Den Bewertungskriterien werden Gewichtungen zugewiesen, die Systemvarianten anhand der Kriterien bewertet und der Nutzwert berechnet. Im aufgezeigten Beispiel hat System zwei den höchsten Nutzwert und gilt so als die favorisierte Variante [GP14, S. 418].

Nach [KHL+11, S. 425] ist die Nutzwertanalyse in Muss-Ziele bzw. K.O.-Kriterien und Wunsch-Ziele zu gliedern. Im Beispiel von [GP14, S. 418] sind die Muss-Ziele vorab zu prüfen. In die eigentliche Nutzwertanalyse werden dann nur Beispiele aufgenommen, welche alle Muss-Ziele erfüllen.

Bewertung: Die Nutzwertanalyse stellt eine sehr einfache Methode zur Bewertung von Alternativen dar. Die Einfachheit in der Anwendung und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sind Gründe, warum die Methode sehr weit verbreitet ist.

Die Bewertungen erfolgen jeweils ausschließlich nur auf ordinalen Skalen, bzw. werden in eine solche umgerechnet. So werden im Rahmen von alternativen Investitionen Nutzwerte monetären Werten gegenübergestellt. Es bleibt nach wie vor unklar ob eine Investition einen absoluten Nutzen stiftet.

4.6.2 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

Die Methode Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) ist ein weiterer multikriterieller Ansatz zur Lösung komplexer Entscheidungsprobleme. Entsprechend des Analytic Hierachy Processes stellt TOPSIS einen relativen Bewertungsansatz dar. Der Bewertungsmaßstab hängt von den zur Verfügung stehenden Alternativen ab [PZ07, S. 9].

Für die Bewertung der Alternativen werden eine fiktive Best-Case- und eine fiktive Worst-Case-Lösung gebildet. Der Abstand der realen Alternativen zu den fiktiven, idealisierten Alternativen beschreibt dann die Güte der Lösungen. Es sind acht Phasen zur Bewertung von Alternativen vorgesehen [PZ07, S. 9f.]. Diese sind in Bild 4-20 dargestellt.

Zu Beginn gilt es das **Problem zu modellieren**. Dazu sind die Bewertungsaufgabe mit dem Bewertungsziel zu formulieren sowie die notwendigen Kriterien mit den zur Verfü-

gung stehenden Alternativen zu definieren. Die Kriterien werden in Kosten- und Nutzenkriterien gegliedert. Damit wird unterschieden, ob die Kriterien zu minimieren oder zu maximieren sind [PZ07, S. 9f.].

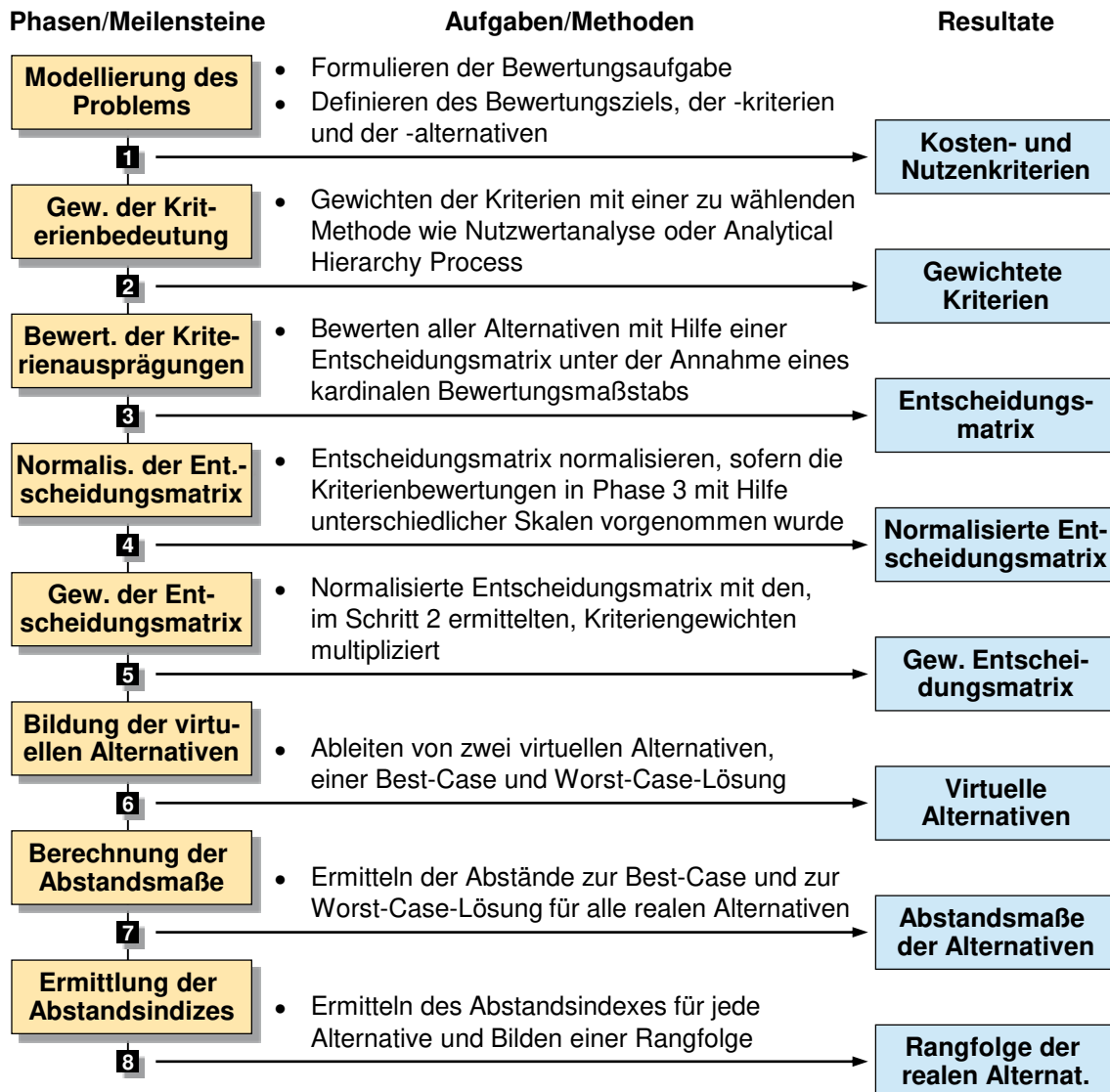


Bild 4-20: Vorgehen der Methode TOPSIS nach [PZ07, S. 9f.]

Im zweiten Schritt sind die **Kriterienausprägungen zu gewichten**. Dazu ist keine spezifische Methode vorgesehen. Es kann bspw. durch eine einfache Zuordnung von Punktbewertungen oder durch einen paarweisen Vergleich wie bei dem Analytic Hierarchy Process durchgeführt werden [PZ07, S. 10].

Anschließend werden die **Kriterienausprägungen bewertet**. Die Bewertung der Alternativen geschieht mit Hilfe einer sog. Entscheidungsmatrix. Dazu werden alle Kriterien hinsichtlich ihrer Leistungserfüllung in einem kardinalen Maßstab bewertet [PZ07, S. 10f.].

Die bewertete **Entscheidungsmatrix** wird im nächsten Schritt **normalisiert**. Dieser Schritt ist nur notwendig, wenn die Kriterienausprägungen im vorherigen Schritt auf unterschiedlichen Skalen bewertet wurden. Eine Normalisierung der Entscheidungsmatrix ist auch nicht notwendig, sofern die Gewichtung in Schritt zwei bereits implizit mit einem paarweisen Vergleich durchgeführt wurde [PZ07, S. 11f.].

Die normalisierte **Entscheidungsmatrix** wird anschließend **gewichtet**. Dafür wird die normalisierte Entscheidungsmatrix mit den Kriteriengewichten aus Schritt zwei multipliziert [PZ07, S. 12].

In Schritt sechs werden die **virtuellen Alternativen gebildet**. Es werden eine positiv-ideale Lösung bzw. eine Best-Case-Lösung und eine negativ-ideale Lösung bzw. eine Worst-Case-Lösung definiert. Sie werden aus den realen Alternativen abgeleitet. Zur Bestimmung der Best-Case-Lösung werden alle besten Kriterienausprägungen der gewichteten normalisierten Entscheidungsmatrix in einer Lösung vereint. Die Worst-Case-Lösung vereint alle schlechtesten Kriterienausprägungen [PZ07, S. 12].

Nach der Bestimmung der idealisierten Lösungen werden die **Abstandsmaße bestimmt**. Die Abstände der realen Alternativen zu den beiden virtuellen Alternativen werden bestimmt. Es ergeben sich jeweils zwei Abstände in einem Raum, deren Dimension durch die Anzahl der Kriterien bestimmt wird [PZ07, S. 12].

Abschließend ist eine **Reihenfolge der realen Alternativen zu bilden**. Dazu werden Abstandsindizes für alle realen Alternativen ermittelt. Die Abstandsindizes stellen die relative Nähe zur Best-Case-Lösung dar. Sie ergeben sich aus den beiden zuvor ermittelten Abstandsmaßen. Eine Alternative ist umso besser, je näher sie an der Best-Case-Lösung liegt und je weiter sie von der Worst-Case-Lösung entfernt ist. Das Ergebnis der Methode TOPSIS ist somit eine Rangfolge der realen Alternativen [PZ07, S. 12f.].

Bewertung: Die Methode TOPSIS ermöglicht die Bildung einer Reihenfolge einer Vielzahl schwierig vergleichbarer Alternativen. Ein intuitives und zugleich nachvollziehbares Vorgehen unterstützt die Akzeptanz der Methoden.

Das Ergebnis weist jedoch ausschließlich eine Reihenfolge der Alternativen aus. Somit gilt der gleiche Kritikpunkt wie bei dem Analytic Hierarchy Process, dass nicht die absolute Vorteilhaftigkeit einer einzelnen Investition bewertet werden kann.

4.6.3 Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation

Eine weitere Methode zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung ist die Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE). Ziel der Methode ist es eine Rangfolge von zu vergleichenden Alternativen zu bilden. Dazu

werden Kriterien identifiziert, Gewichtungen definiert und Kriterienausprägungen ermittelt. Wie bei der Methode TOPSIS können absolute Bewertungsmaßstäbe zu Grunde liegen [GL14].

PROMETHEE stellt ein Outranking-Verfahren dar, bei dem sogenannte schwache Präferenzen und Unvergleichbarkeiten in der Reihenfolgebildung berücksichtigt werden. Bei schwachen Präferenzen ist dem Entscheider seine Präferenz nicht vollständig bewusst, bzw. er kann sie nicht ausdrücken. Um dieser Situation zu entgegnen, zeigt ein Outranking-Verfahren die Struktur und die Konsequenzen der Entscheidungssituation auf. Die Präferenzen der Entscheider werden mit Hilfe von paarweisen Vergleichen ermittelt [GL14, S. 2ff.]. Eine Unvergleichbarkeit liegt bspw. vor, wenn der Output einer von zwei Alternativen größer ist, jedoch der benötigte Input der gleichen Alternative auch größer ist [GL14, S. 53], [GL14, S. 63]. Zur Ermittlung einer Präferenzrelation von Alternativen mit Hilfe der Methode PROMETHEE sind fünf Schritte vorgesehen. Diese sind in Bild 4-21 zusammengefasst.

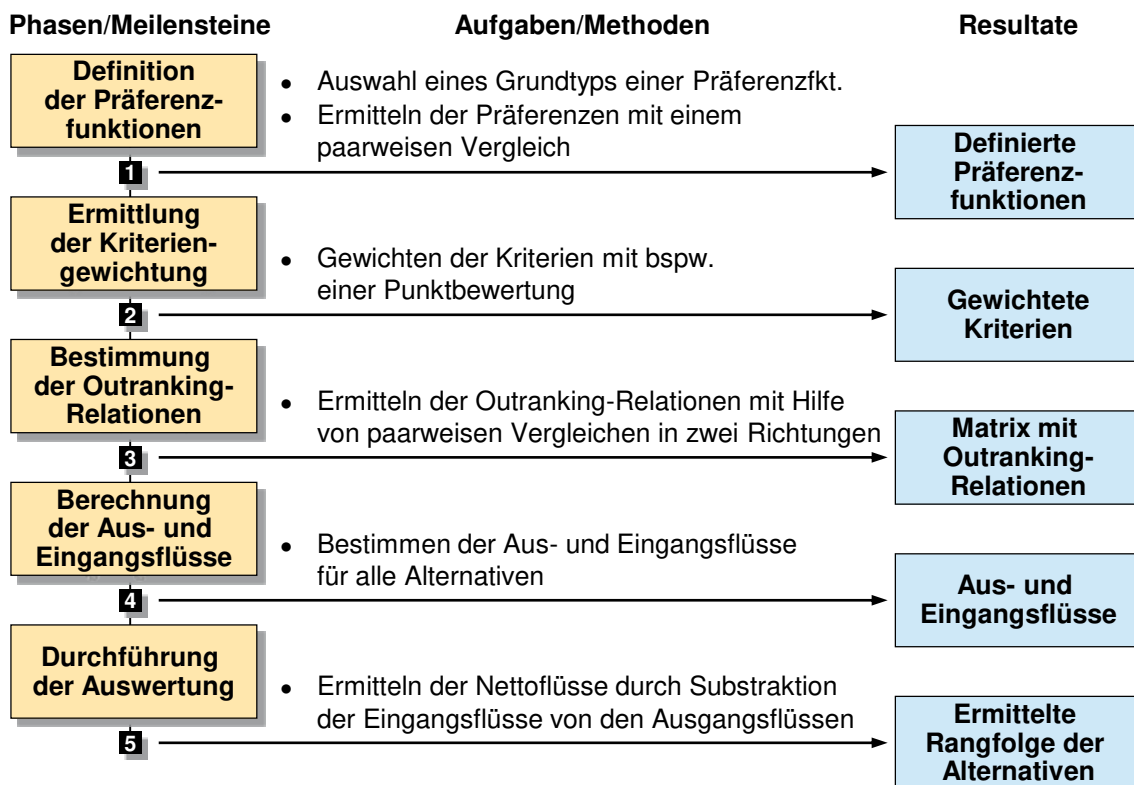


Bild 4-21: Vorgehen der Methode PROMETHEE nach [GL14, S. 54]

Ausgangspunkt der Methode PROMETHEE ist eine vollständige Entscheidungsmatrix. Das bedeutet, dass die Identifikation von Alternativen, die Bestimmung des Zielsystems und das Aufstellen der Kriterienhierarchie mit Kriterienausprägungen bereits vorliegen [GL14, S. 54].

Zu Beginn sind die **Präferenzfunktionen** zu **definieren**, mit denen die Präferenzen des Entscheiders abgebildet werden. Es stehen sechs verschiedene Grundtypen der Präferenzfunktionen zur Verfügung. Die Ermittlung der Präferenzen hinsichtlich der Alternativen geschieht mit Hilfe von Paarvergleichen [GL14, S. 55ff.].

Anschließend sind die **Kriterien** zu **gewichten**. Eine Kriteriengewichtung beschreibt die Bedeutung eines Kriteriums im Vergleich zu den weiteren Kriterien. Dazu wird keine Gewichtungsmethode vorgegeben [GL14, S. 61].

Weiterhin sind die **Outranking-Relationen** zu **ermitteln**. Eine Outranking-Relation ist das Maß für die Gesamt-Präferenz einer Alternative gegenüber einer anderen Alternative. Dabei werden die Paarvergleiche in beide Richtungen von zwei betrachteten Alternativen ermittelt. Das bedeutet, es wird ermittelt inwieweit z.B. Alternative A gegenüber der Alternative B präferiert wird und umgekehrt. Das Ergebnis ist eine nicht symmetrische Matrix mit Outranking-Relationen [GL14, S. 61].

Im vierten Schritt sind **Aus- und Eingangsflüsse** für alle Alternativen zu **berechnen**. Diese zwei Größen beschreiben inwieweit eine Alternative Vor- und Nachteile zu den anderen Alternativen aufzeigt. Die Aus- und Eingangsflüsse stellen somit die Grundlage für die Ermittlung der Rangfolge dar. Ein Ausgangsfluss beschreibt wie stark eine Alternative gegenüber den restlichen Alternativen bevorzugt wird. Ein Eingangsfluss beschreibt inwieweit eine Alternative von den weiteren Alternativen dominiert wird [GL14, S. 62].

Abschließend werden die **Aus- und Eingangsflüsse aggregiert** und **ausgewertet**. Alternativen mit einem größeren Ausgangsfluss und einem kleineren Eingangsfluss dominieren andere Alternativen. Sofern eine der beiden Bedingungen nicht gegeben ist, liegt eine Unvergleichbarkeit der Alternativen vor. Demnach liegt keine Dominanz einer Alternative vor. Dies wird als partielle Präferenzordnung bezeichnet. Um dieser Situation zu begegnen, werden die sog. Nettoflüsse bestimmt, welche die Differenz aus Ausgangsfluss und Eingangsfluss sind. Sie dienen zur Ermittlung der Rangfolge. Dies wird als vollständige Präordnung bezeichnet [GL14, S. 63].

Bewertung: PROMETHEE stellt eine Methode zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung in komplexen Entscheidungssituationen dar. Hervorzuheben sind die detaillierte Abbildung von Präferenzen und Unvergleichbarkeiten von Alternativen.

Analog zu den vorherigen Methoden weist das Ergebnis jedoch ausschließlich eine Reihenfolge der Alternativen aus. Die Methode gibt keinen Aufschluss über die absolute Vorteilhaftigkeit einer einzelnen Investition.

4.7 Handlungsbedarf

Ein Vergleich des Stands der Technik mit den Anforderungen aus Kapitel 3.6 führt zu folgender Bewertung. Die Bewertung ist in Bild 4-22 dargestellt.

Kategorien von Ansätzen des Stands der Technik		Anforderungen									
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Ansätze der Investitionsrechnung (vgl. Kap. 4.1)											
Domänenspezifische Ansätze (vgl. Kap. 4.2)	Ansätze aus der Betriebswissenschaft										
	Ansätze aus der Ingenieurwissenschaft										
	Ansätze aus der Informatik										
Systembewert. (vgl. Kap. 4.3)	Flexibilität										
	Komplexität										
Kennzahlensysteme (vgl. Kap. 4.4)											
Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse (vgl. Kap. 4.5)											
Methoden der Entscheidungsunterstützung (vgl. Kap. 4.6)											
Bewertungsskala: Nicht erfüllt Teilweise erfüllt Voll erfüllt											

Bild 4-22: Bewertung des untersuchten Stands der Technik anhand der Anforderungen

Anforderung 1: Klassifizierung von Investitionsentscheidungen

Im Rahmen der Investitionsbewertung werden unterschiedliche Ansätze zur Strukturierung von Investitionsentscheidungen aufgezeigt. Darauf bauen die Ansätze der Investitionsrechnung auf. Die Strukturierung bzw. Klassifizierung geschieht jeweils ausschließlich aus betriebswirtschaftlicher Sicht. Aus technischer Sicht sind die ganzheitlichen domänenspezifischen Ansätze häufig für ein spezifisches Problem entwickelt und implizieren somit Klassen von Investitionsentscheidungen. Es existiert jedoch keine Klassifizierung welche eine betriebswirtschaftliche und eine technische Sicht im Rahmen von Industrie 4.0 Anwendungen vereint.

Anforderung 2: Industrie 4.0 anwendungsklassenspezifische Vorgehen

Die Tatsache, dass Industrie 4.0 Anwendungen häufig sehr unterschiedlicher Natur sind erfordert unterschiedliche anwendungsklassenspezifische Vorgehen. Im Rahmen der Ansätze der Investitionsrechnung sowie der domänenspezifischen Ansätze werden unterschiedliche Vorgehen aufgezeigt. Die Vorgehen sind i.d.R. jedoch ausschließlich für sehr spezifische Anwendungsfälle entwickelt. Es existiert kein Ansatz, welcher für unterschiedliche Investitionsklassen von Industrie 4.0 Anwendungen Vorgehen bereitstellt.

Anforderung 3: Berücksichtigung der gegebenen Infrastruktur und Restriktionen unter einer systemischen Betrachtungsweise

Insbesondere die Ansätze zur Systembewertung ermöglichen eine Berücksichtigung der gegebenen Infrastruktur und der Restriktionen. Wie auch die domänenspezifischen Ansätze sind die Ansätze zur Systembewertung jedoch ausschließlich auf einzelne Anwendungsfälle ausgelegt. Weiterhin wird die Anforderung von den domänenspezifischen Ansätzen aus der Ingenieurwissenschaft und aus der Informatik sowie den Kennzahlensystemen und den Methoden der Entscheidungsunterstützung teilweise erfüllt.

Anforderung 4: Unterstützung bei der Spezifikation des Investitionsobjekts

Eine fundierte Investitionsbewertung erfordert die Spezifikation der Industrie 4.0 Anwendung bzw. des Investitionsobjekts. Domänenspezifische Ansätze aus der Ingenieurwissenschaft und der Informatik charakterisieren teilweise das Investitionsobjekt. Dies gilt jedoch ausschließlich im Kontext des betrachteten Ansatzes. Gleiches gilt für die Ansätze zur Systemanalyse und -bewertung. Weiterhin können Kennzahlensysteme sowie Methoden der Potentialfindung und Datenanalyse eingesetzt werden, um ein Investitionsobjekt zu charakterisieren. Die Ansätze stellen jeweils jedoch nicht explizit auf den Anwendungszweck ausgerichtete Hilfsmittel dar.

Anforderung 5: Unterstützung bei der Strukturierung von Industrie 4.0 Potentialen

Mehrere Ansätze des Stands der Technik eignen sich im gleichen Maße für die Strukturierung von Potentialen der Digitalisierung wie für die Spezifikation von Investitionsobjekten. Unterstützend können Ansätze aus der Ingenieurwissenschaft und aus der Informatik für spezifische Anwendungsfälle herangezogen werden. Weiterhin können Kennzahlensysteme und Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse als Hilfsmittel eingesetzt werden.

Anforderung 6: Unterstützung bei der Analyse von Annahmen, möglicher Zielsetzungen und Auswirkungen einer Investition

Da die Annahmen und Zielsetzungen einen grundlegenden Einfluss auf Investitionen haben, bedarf es einer Unterstützung bei deren Analyse. Eine Vielzahl der analysierten Ansätze des Stands der Technik erfüllen diese Anforderung teilweise. Die Anforderung wird jedoch von keinem Ansatz voll erfüllt. Insbesondere die domänenspezifischen Ansätze ermöglichen eine tiefergreifendere Analyse von Annahmen, möglichen Zielsetzungen

und Auswirkungen einer Investition. Diese sind jedoch ausschließlich auf einzelne Anwendungsfälle ausgelegt.

Anforderung 7: Unterstützung bei der Datenerhebung entlang des Lebenszyklus der Investition

In der Literatur wird mehrfach erwähnt, dass die Datenerhebung für eine Investitionsbewertung eine große Herausforderung darstellt und gleichzeitig häufig vernachlässigt wird. Insbesondere können Kennzahlensysteme als ein Strukturierungselement für eine Datenaufnahme genutzt werden. Weiterhin können Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse adaptiert werden, um notwendige Daten zu bestimmen.

Anforderung 8: Unterstützung bei der Bewertung von Nutzenpotentialen

Die Nutzenpotentiale zu identifizieren, sie zunächst qualitativ und anschließend quantitativ zu bewerten, stellt eine große Herausforderung dar. Ein strukturierendes Element liefern Kennzahlensysteme. Darüber hinaus können Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse sowie Methoden der Entscheidungsunterstützung eingesetzt werden. Die Ergebnisse sind auf einer ordinalen Skala zu verorten, weshalb keiner der Ansätze die Anforderung vollständig erfüllt.

Anforderung 9: Monetäre Bewertung von Kosten und Nutzen

Die Anforderung einer monetären Bewertung von Kosten und Nutzen wird von mehreren Ansätzen teilweise erfüllt. Zudem erfüllen bspw. die Ansätze der Investitionsrechnung diese voll. Teile der domänenspezifischen Ansätze erfüllen diese Anforderung. Weiterhin gibt es Kennzahlensysteme welche explizit auf finanzwirtschaftliche Aspekte ausgelegt sind.

Anforderung 10: Einfache Anwendbarkeit

Eine einfache Anwendbarkeit ist bei allen Ansätzen zumindest teilweise gegeben. Die Methoden der Entscheidungsunterstützung erfüllen diese Anforderung voll, da sie Entscheidungsprobleme auf eine überschaubare Anzahl an qualitativen Entscheidungsparametern herunterbrechen.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass keiner der untersuchten Ansätze und auch keine triviale Kombination der Ansätze alle Anforderungen in vollem Umfang erfüllt. Viele der Ansätze adressieren Teilaspekte des Gesamtproblems. Die zentrale Schwachstelle liegt in einer mangelhaften Verzahnung einer interdisziplinären Herangehensweise und einer systemischen Betrachtung der Industrie 4.0 Anwendung mit Ansätzen der Investitionsrechnung. Damit geht einher, dass insbesondere die transparente und strukturierte Datenerhebung nicht in einem ausreichenden Maß unterstützt wird. Somit besteht Handlungsbedarf für die Entwicklung einer Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion.

5 Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion

Die Analyse des Stands der Technik in Kapitel 4 zeigt den Mangel eines Ansatzes zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion entsprechend den in Kapitel 3 hergeleiteten Anforderungen. Kapitel 5 greift diesen Handlungsbedarf auf. Es wird die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion vorgestellt. Sie stellt den Kern dieser Arbeit dar. Die Systematik soll einen Beitrag zu einer zielorientierten, wirkungsvollen Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachdisziplinen bei der Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion leisten. Dazu verfolgt die Systematik die folgenden Ziele:

- **Systematische Vorgehensweise:** Die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ist häufig eine undurchsichtige Aufgabe. Diese gilt es zunächst zu strukturieren. Es erfordert eine systematische Vorgehensweise, die den Anwender durch den Bewertungsprozess führt und so eine Reproduzierbarkeit von Bewertungsergebnissen ermöglicht.
- **Systemische Beschreibung:** Im Rahmen der Bewertung ist das Investitionsobjekt als komplexes sozio-technisches System zu verstehen. Das System steht mit vielen anderen (Teil-)Systemen sowohl innerhalb als auch außerhalb eines Unternehmens in Beziehung. Für eine ganzheitliche Bewertung sind die (Teil-)Systeme und deren Beziehungen zu beschreiben und zu analysieren.
- **Transparenz über die Bewertung:** Das Bewertungsproblem ist nicht ausschließlich als rein technische oder rein betriebswirtschaftliche Aufgabenstellung zu betrachten. Es sind viele Stakeholder mit verschiedensten fachlichen Hintergründen beteiligt. Somit ist Transparenz über den gesamten Bewertungsprozess erforderlich. Das bezieht sich sowohl auf das Ergebnis der Bewertung als auch auf die Berechnung und den Input des Prozesses.

Die Systematik umfasst fünf Bestandteile, um die genannten Ziele umzusetzen. Die Bestandteile der Systematik werden in Kapitel 5.1 aufgezeigt. Anschließend wird in Kapitel 5.2 eine Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen vorgenommen. In Kapitel 5.3 wird das Vorgehensmodell der Systematik beschrieben. Das Vorgehensmodell beschreibt die zu tätigen Schritte und ordnet sie in einen zeitlichen Kontext. Ergänzt wird dies um Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts in Kapitel 5.4 sowie um Hilfsmittel für eine transparente Bewertung des Investitionsobjekts in Kapitel 5.5. Abschließend wird in Kapitel 5.6 eine Werkzeugunterstützung vorgestellt. Die durchgängige Anwendung der Systematik wird in Kapitel 6 anhand von zwei Anwendungsbeispielen gezeigt.

5.1 Bestandteile der Systematik

Die Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion umfasst gemäß Bild 5-1 fünf Bestandteile.

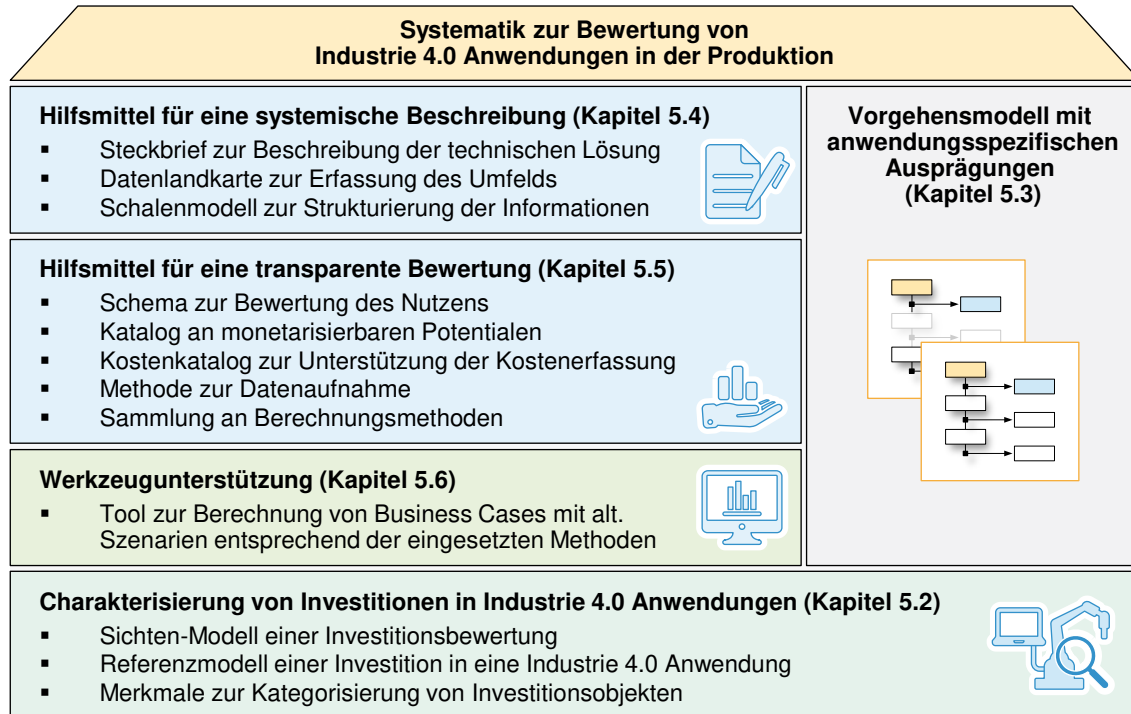


Bild 5-1: Bestandteile der Systematik

Basis der Systematik ist eine **Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen** (vgl. Kapitel 5.2). Dies beinhaltet ein Sichten-Modell einer Investitionsbewertung sowie ein Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion. Daraus leiten sich Merkmale von Investitionsobjekten ab. Mit Hilfe der Merkmale wird ein betrachtetes Investitionsobjekt kategorisiert. Die Elemente stellen somit die theoretische Grundlage für eine Investitionsbewertung dar.

Ein **Vorgehensmodell mit anwendungsspezifischen Ausprägungen** (vgl. Kapitel 5.3) beschreibt die zu tätigen Aufgaben, setzt diese in einen zeitlichen Kontext und definiert die einzusetzenden Methoden. Auf Basis der erwähnten Kategorisierung von Investitionsobjekten sind zwei Vorgehen mit anwendungsspezifischen Ausprägungen vorgesehen.

Ergänzt wird die Systematik um **Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts** (vgl. Kapitel 5.4). Diese reichen von einem Steckbrief zur Beschreibung der technischen Lösung über eine Datenlandkarte zur Erfassung des Umfelds und der Use Cases von Industrie 4.0 Anwendungen bis hin zu einem Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion.

Weiterhin werden **Hilfsmittel für eine transparente Bewertung des Investitionsobjekts** (vgl. Kapitel 5.5) bereitgestellt. Diese umfassen ein Schema zur Bewertung des

Nutzens von Investitionen in der Produktion, einen Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion, ein Kostenkatalog für Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion, eine Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion und eine Sammlung an Berechnungsmethoden.

Zur einfachen Anwendung der Systematik wird eine **Werkzeugunterstützung** (vgl. Kapitel 5.6) bereitgestellt. Dies ist ein Tool zur Berechnung von Business Cases mit alternativen Szenarien entsprechend der eingesetzten Berechnungsmethoden. Die Bestandteile der Systematik werden im Folgenden detailliert vorgestellt.

5.2 Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion

Die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung erfordert zunächst ein einheitliches Verständnis über die Investition. Dazu wird die Investition in die Industrie 4.0 Anwendung charakterisiert. In Kapitel 5.2.1 wird ein Sichten-Modell einer Investitionsbewertung vorgestellt. Dies dient zur Beschreibung und Analyse von Annahmen, Zielsetzungen und Auswirkungen der Investition. Anschließend wird in Kapitel 5.2.2 ein Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion aufgezeigt und in Kapitel 5.2.3 werden Merkmale von Investitionsobjekten abgeleitet.

5.2.1 Sichten-Modell einer Investitionsbewertung

Um das Ziel Transparenz über die Bewertung einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion zu schaffen, sind zuerst die möglichen Zielsetzungen, Auswirkungen und Annahmen einer Investition zu analysieren. Unterstützen kann hier ein Sichten-Modell einer Investitionsbewertung. Konkret zeigt das Modell eine mögliche Strukturierung von alternativen Business Case Szenarien auf. Darüber hinaus verdeutlicht es die notwendige Datengrundlage [JKH+18].

Grundlage des Sichten-Modells sind die in Kapitel 3.4.4 vorgestellten Auswirkungen einer Investitionsbewertung anhand der Gegensätze Input-Minimierung und Output-Maximierung sowie der Erfolgs- und Liquiditätsebene [JKH+18]. Das Bild 5-2 zeigt die beispielhafte Entwicklung einer Investition aus vier unterschiedlichen Sichten im Modell.

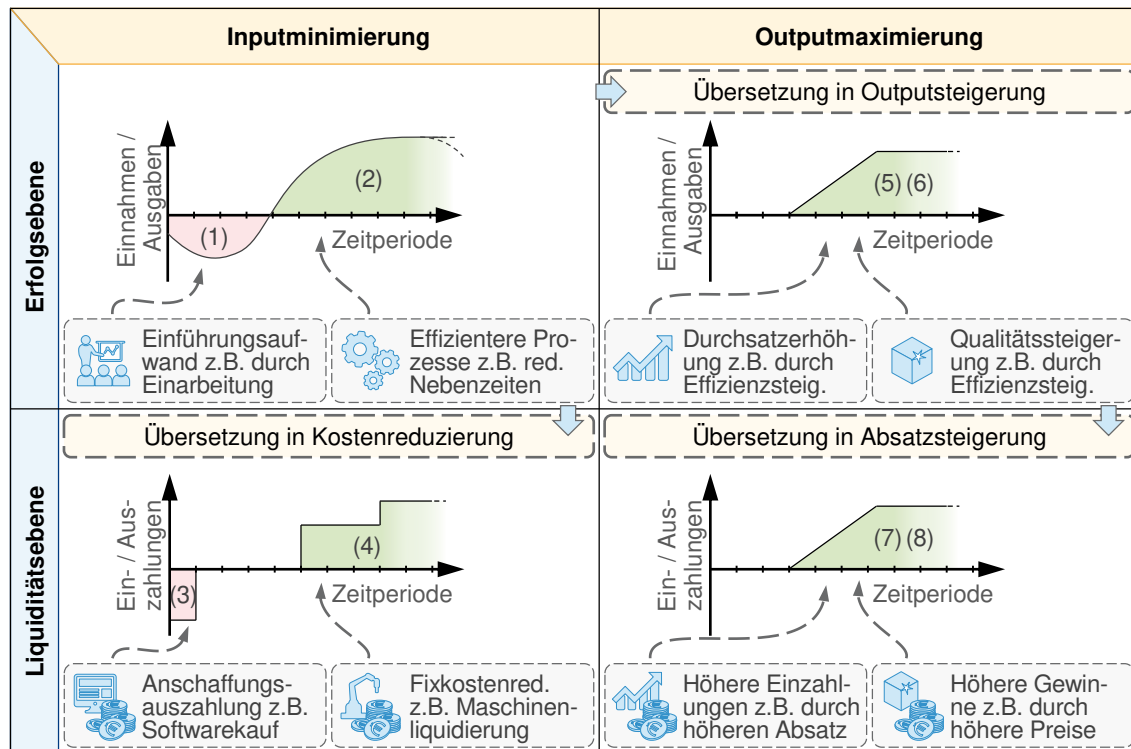


Bild 5-2: Sichten-Modell zur Strukturierung des benötigten Inputs und der Auswirkungen einer Investitionsbewertung in Anlehnung an [JKH+18, S. 469]

Erfolgsebene – Inputminimierung: Wird bspw. ein Assistenzsystem in einer Produktion eingeführt, bedeutet dies zunächst Einführungs- und Schulungsaufwand (1)¹⁸. Dies führt jedoch nicht zwangsläufig zu negativen Cashflows in der Liquiditätsebene, da z.B. Prozesse und Schulungen unternehmensintern geplant und durchgeführt werden können. Nach der Einführung wird dann eine Effizienzsteigerung (2) erwartet. Der Grund können bspw. reduzierte Nebenzeiten sein. Dargestellt ist dies im oberen, linken Quadranten des Bildes [JKH+18, S. 469].

Liquiditätsebene – Inputminimierung: Die positiven und negativen Cashflows im Rahmen der Inputminimierung werden im unteren, linken Quadranten dargestellt. Bspw. können zu Beginn Einkäufe notwendig sein (3), welche direkt zu bezahlen sind. Dies stellt einen negativen Cashflow dar. Die später folgenden Effizienzgewinne schlagen sich jedoch nicht zwangsläufig in positiven Cashflows nieder. Um letztlich Kosten in der Produktion zu sparen, müssen bspw. konkrete Maschinen-, Lager- oder Personalkosten abgebaut werden (4). Dies sind häufig Fixkosten. Der Verlauf aus resultierenden, positiven Cashflows stellt somit i.d.R. einen diskontinuierlichen Verlauf mit Sprüngen dar. Ein Beispiel ist die Maschinenauslastung. Wenn die Auslastung von 80% auf 70% reduziert wird bedeutet das nicht, dass die Maschine verkauft werden kann. Wird jedoch die Auslastung einer großen Anzahl von Maschinen in einem Maschinenpark reduziert, wäre eine

¹⁸ Die Bezeichnungen „(1)“, „(2)“ usw. verweisen auf die in Bild 5-2 dargestellten Nummern.

Liquidation möglich. Dies würde eine sprunghafte Änderung im Cash Flow darstellen [JKH+18, S. 469].

Erfolgsebene – Outputmaximierung: Alternativ zur Inputminimierung (in Form einer Kostenreduktion) können die erzielten Effizienzgewinne der Investition auch zur Outputmaximierung genutzt werden. Wenn die Mitarbeiter in der Lage sind, ihre Arbeit in 7 statt in 8 Stunden zu erledigen, können sie mehr Produkte herstellen oder die Qualität verbessern (5), (6). Dies wird im oberen, rechten Quadranten angezeigt [JKH+18, S. 469].

Liquiditätsebene – Outputmaximierung: Damit eine größere Menge an produzierten Gütern bzw. eine höhere Qualität positive Cashflows generiert, sind die Annahmen über die Übersetzung in die Umsatzsteigerung entscheidend (7), (8). Dies sind Marktannahmen wie bspw. die Preiselastizität [JKH+18, S. 469].

Das Sichten-Modell einer Investitionsbewertung ermöglicht eine Strukturierung der zu berechnenden alternativen Business Case Szenarien und der damit einhergehenden, benötigten Daten. Zum Einsatz kommt es bei der Erfassung der Bewertungsgrundlage in Phase zwei des Vorgehensmodells der Systematik (vgl. Kapitel 5.3).

5.2.2 Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion

Im Zuge der Veröffentlichung [FGH+18] wurden u.a. 280 Anwendungsbeispiele von Industrie 4.0 Anwendungen analysiert, geclustert und in einer multidimensionalen Skalierung abgebildet. Auf dieser Grundlage wurde ein Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion entwickelt.

Nach dem Referenzmodell gliedern sich Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion in einen intangiblen und einen tangiblen Bereich. Der intangible Teil entsprechender Investitionen lässt sich über fünf Layer charakterisieren, während die Hardware sich in drei Bereiche gliedert. Zur Beschreibung einer Industrie 4.0 Anwendung sind nicht zwingend alle Layer notwendig [JEK+19, S. 485]. Dargestellt ist das Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion in Bild 5-3.

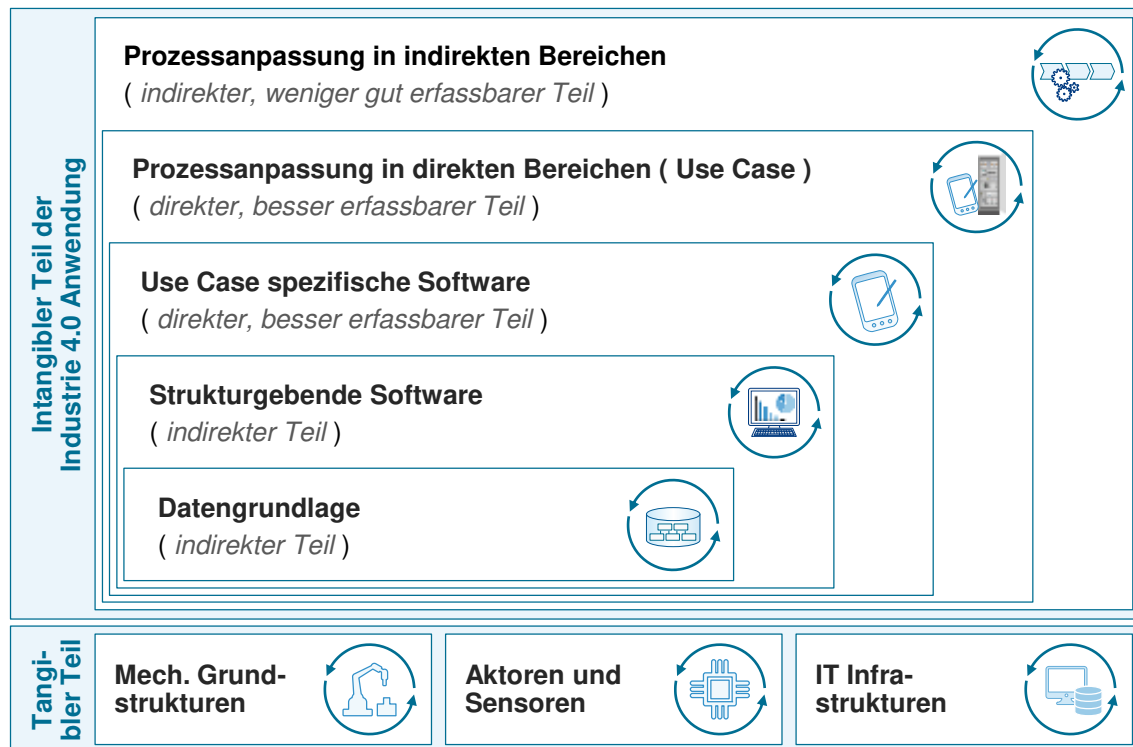


Bild 5-3: Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion nach [JEK+19, S. 485]

Der unterste Layer des intangiblen Bereichs ist die **Datengrundlage**. Sie ist die Grundlage für jegliche Software und deren Anwendung. Es ist von struktureller Natur ob entsprechende Daten in einem Unternehmen in angemessener Form vorhanden sind, bzw. diese bereits gesammelt werden. Dieser Teil ist nur sehr schwierig bzw. indirekt erfassbar und bezifferbar. Er stellt somit einen indirekten Teil dar [JEK+19, S. 485].

Die Software in einem Unternehmen erzeugt, nutzt und verarbeitet diese Datengrundlage. Zentraler Dreh- und Angelpunkt sind **strukturgebende Software** Systeme wie Enterprise Resource Planning Systeme, Manufacturing Execution Systeme oder gewisse Autorenwerkzeuge im Bereich des Engineerings. I.d.R. beeinflussen sie große Teile des Geschäftsbetriebs. Ihr Nutzen und deren Kostenzurechnung sind auf Grund ihrer Durchgängigkeit nur sehr schwierig erfassbar. Sie gelten somit auch als indirekter Teil im Rahmen einer Investitionsbewertung [JEK+19, S. 485].

Darüber hinaus existieren Softwarelösungen, welche für einzelne spezifische Anwendungsfälle konzipiert sind. Diese **Use Case spezifischen Software** Systeme erfordern oder basieren häufig auf der strukturgebenden Software. Im Rahmen einer Investitionsbewertung ist eine Use Case spezifische Software ein direkterer, besser erfassbarer Teil. Die entstehenden Kosten lassen sich bspw. direkt einer oder mehreren Abteilungen zuweisen. Da die Veränderungen i.d.R. wenige Bereiche bzw. Abläufe betreffen, lässt sich der Nutzen erfassen und quantifizieren [JEK+19, S. 485].

Der **Use Case** ist eine **Prozessanpassung in direkten Bereichen**. Dies können bspw. Änderungen in Fertigungs- oder Montageschritten sein. Die Prozessanpassungen und die einhergehenden Effizienzsteigerungen sind i.d.R. relativ gut beschreib- und erfassbar [JEK+19, S. 485].

Neben den technischen Aspekten erfordert die Umsetzung eines Use Cases häufig organisatorische Maßnahmen. Dies sind **Prozessanpassungen in indirekten Bereichen**, im obersten Layer des Modells. Deren Bewertung ist auf Grund eines abteilungsübergreifenden Ausmaßes schwierig. Der Layer ist somit ein indirekter, weniger gut erfassbarer Teil bei einer Investitionsbewertung [JEK+19, S. 485].

Neben dem intangiblen Bereich ist der tangible bzw. physische Bereich einer Investition zu berücksichtigen. Dies stellt die notwendige Hardware dar. Es sind sowohl die mechanische Grundstruktur, die Aktoren und Sensoren als auch die IT-Infrastruktur zu berücksichtigen. Der tangible Bereich einer Investition ist i.d.R. relativ gut beschreib- und erfassbar [JEK+19, S. 485].

Interpretation

Das Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion visualisiert folgende zentrale Erkenntnis: Ausschließlich die Use Cases stiften einen Nutzen. Alle anderen Layer im Modell stellen Rahmenbedingungen zu dessen Umsetzung dar und erzeugen ausschließlich Kosten. Werden mehrere Use Cases betrachtet, können Synergieeffekte bei den Rahmenbedingungen entstehen. So können Use Cases bspw. auf die gleiche Datenbasis, die gleiche Software oder die gleichen indirekten Prozesse zurückgreifen. Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion generieren somit häufig kurzfristig hohe Kosten, während der Nutzen einen langfristigen Charakter aufweist [JEK+19, S. 486].





Im Anhang A3.1 wurden Anwendungsbeispiele der Industrie 4.0 Landkarte exemplarisch mit dem Referenzmodell beschrieben. Weiterhin findet das Referenzmodell im Rahmen der Validierungsbeispiele in Kapitel 6 seine Anwendung.

5.2.3 Merkmale von Investitionsobjekten

Industrie 4.0 Anwendungen können in ihrem Ausmaß und ihrer Komplexität variieren. Somit ist auch der Aufwand für eine Bewertung anzupassen. Dies erfordert unterschiedliche Vorgehensweisen. Es wird zwischen für einen Anwender überschaubare und nicht überschaubare Investitionen unterschieden. Zur Einordnung eines Investitionsobjekts in eine der zwei Klassen werden fünf Merkmale mit jeweils vier möglichen Ausprägungen herangezogen. Je höher die Ausprägung eines Merkmals, desto schwieriger ist es, die Industrie 4.0 Anwendung wirtschaftlich zu bewerten. Die Merkmale leiten sich aus dem Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ab. Die Bewertung eines Investitionsobjekts anhand der Merkmale ist unternehmensindi-

viduell. Sie kann bspw. von der Größe und den vorhandenen Kompetenzen eines Unternehmens abhängen. Die Merkmale zur Kategorisierung eines Investitionsobjekts sind in Tabelle 5-1 aufgezeigt.

Tabelle 5-1: *Merkmale zur Kategorisierung eines Investitionsobjekts*

Merkmal	Ausprägung / Ausprägungswert			
	0	1	2	3
 Technischer Anspruch , d.h. wie schwierig die technische Lösung ist	Wenig anspruchsvoll, domänenspezifisch	Anspruchsvoll, domänenspezifisch	Anspruchsvoll, domänenübergreifend	Hoch anspruchsvoll, domänenübergreifend
 Erweiterbarkeit , d.h. wie aufwändig es ist Funktionalitäten anzupassen	Nicht ohne substanzielle Aufwände erweiterbar	Erweiterbar über zu def. Schnittstellen	Erweiterbar über vorh. Schnittstellen	Erweiterbar „per Knopfdruck“
 Unternehmensdurchdringung , d.h. wie abteilungsübergreifend die Lösung ist	Nur eine Abteilung	Mehrere Abteilungen	Nahezu alle Abteilungen im Unternehmen	Unternehmensübergreifend
 Höhe der einmaligen Kosten	Kleine Investition	Durchschnittliche Investition	Strategische Investition	Substanzielle Investition
 Höhe der laufenden Kosten	Geringe Kosten	Mittlere Kosten	Hohe Kosten	Sehr hohe Kosten

Im Rahmen des **technischen Anspruchs** ist die Anwendung im einfachsten Fall wenig anspruchsvoll und domänenspezifisch. Das bedeutet es werden Experten aus nur einer oder wenigen fachlichen Domänen benötigt. Im schwierigsten Fall ist Anwendung hoch anspruchsvoll und es werden Experten aus verschiedensten fachlichen Domänen benötigt. Je höher der technische Anspruch der Lösung ist, desto schwieriger ist diese auch aus Sicht des Anwenders zu planen.

Die **Erweiterbarkeit** der Anwendung definiert, wie aufwändig es ist Funktionalitäten anzupassen bzw. zu ergänzen. Sind die Funktionalitäten der Anwendung „per Knopfdruck“ erweiterbar, ist es schwieriger zu planen wie die Anwendung letztendlich aussieht. Sind die Funktionalitäten jedoch nicht ohne substanzielle Aufwände erweiterbar, sind die Anwendung und deren Einsatz einfacher zu planen bzw. zu antizipieren.

Die **Unternehmensdurchdringung** beschreibt, wie abteilungsübergreifend eine Anwendung ist. Die Auswirkungen sind recht einfach voranzuplanen, sofern die Anwendung nur eine Abteilung betrifft. Ist die Anwendung hingegen unternehmensübergreifend und betrifft somit auch Partnerunternehmen, sind die Auswirkungen der Industrie 4.0 Anwendung deutlich schwieriger zu antizipieren.

Das Investitionsvolumen wird mit zwei Merkmalen, den einmaligen und den laufenden Kosten, erfasst. Die **einmaligen Kosten** werden auf einer Skala von einer kleinen Investition bis zu einer substanziellen Investition bewertet. Die **laufenden Kosten** werden auf einer Skala von geringen Kosten bis sehr hohe Kosten bewertet. Was die Ausdrücke kleine Investition bzw. substanzielle Investition und geringe Kosten bzw. sehr hohe Kos-

ten bedeuten, ist unternehmensspezifisch zu definieren. Bspw. kann sich ein Unternehmen einen Prozentsatz der eigenen Kosten für die Ausprägungen definieren, oder abgeschlossene und laufende Projekte in die entsprechenden Ausprägungen einteilen.

Analog zu dem Vorgehen bei der Strukturierung von Anwendungsszenarien und -beispielen von Industrie 4.0 (vgl. Kapitel 3.2.4) wurden im Anhang A3.2 Anwendungsbeispiele der Industrie 4.0 Landkarte exemplarisch bewertet. Die Bewertung erfolgte aus Sicht kleiner und mittlerer produzierender Unternehmen. Es handelt sich um mögliche Anwender der Industrie 4.0 Anwendungen. Weiterhin finden die Merkmale im Rahmen der Validierungsbeispiele in Kapitel 6 ihre Anwendung.

5.3 Vorgehensmodell der Systematik

Ein zentraler Bestandteil der Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion ist das Vorgehensmodell. Es beschreibt die zu tätigen Aufgaben und setzt die einzusetzenden Hilfsmittel und Resultate in einen zeitlichen Kontext. Da nicht alle Investitionsentscheidungen gleich zu behandeln sind, werden in Kapitel 5.3.1 zwei Klassen an Investitionsobjekten unterschieden. In Kapitel 5.3.2 wird auf die Vorgehensmodelle der zwei Klassen eingegangen.

5.3.1 Anwendungsspezifische Vorgehensmodelle

Mit Hilfe der in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Merkmale von Investitionsobjekten wird ein Investitionsobjekt bewertet. Das arithmetische Mittel der Ausprägungen entscheidet über die Auswahl eines geeigneten Vorgehensmodells. Ist der Wert des arithmetischen Mittels des Investitionsobjekts unter dem der Ausprägungen (d.h. unter dem Wert 1,5), wird ein Investitionsobjekt als überschaubare Investition bezeichnet. Ist er es nicht, wird die Investition als unüberschaubare Investition bezeichnet.

Überschaubare Investition: Ein Investitionsobjekt ist überschaubar, wenn das Investitionsvolumen gering und die Industrie 4.0 Anwendung aus technischer und organisatorischer Sicht klar abgrenzbar ist. Dies trifft bspw. zu, wenn die technische Lösung wenig anspruchsvoll ist, nicht ohne substanzielle Aufwände erweiterbar ist und nur eine oder wenige Abteilungen im Unternehmen betrifft. In diesem Fall werden ausschließlich Phase 1 und Phase 3 des Vorgehensmodells in Kapitel 5.3.2 durchlaufen. Phase 2 kann durch eine simple Kostenabschätzung ersetzt werden. Der Aufwand für die Bewertung der Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion wird so deutlich verringert.

Ein Beispiel für diesen Fall ist eine datengetriebene Optimierung einer Maschine. Zum einen ist das Investitionsvolumen im Vergleich zu anderen Industrie 4.0 Anwendungen nicht sehr groß. Zum anderen ist die Industrie 4.0 Anwendung aus technischer und organisatorischer Sicht klar abgrenzbar, da die Erweiterbarkeit der Anwendung aufwändig ist und sie i.d.R. nur wenige Abteilungen betrifft.

Unüberschaubare Investition: Sind das Investitionsvolumen einer Industrie 4.0 Anwendung hoch und die Industrie 4.0 Anwendung aus technischer und organisatorischer Sicht nicht klar abgrenzbar, wird die Investition als unüberschaubar bezeichnet. Dies trifft bspw. zu, wenn die Industrie 4.0 Anwendung sehr einfach erweiterbar ist und zahlreiche Abteilungen in einem Unternehmen involviert werden müssen. In diesem Fall ist das vollständige Vorgehensmodell in Kapitel 5.3.2 zu durchlaufen.

Ein Beispiel für diesen Fall ist ein Fertigungsleitstand in der Produktion. Auf Grund des hohen Investitionsvolumens kann dies insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen eine substanzielle Investition darstellen. Somit sind quantitative Abschätzungen über Kosten und Nutzen notwendig. Darüber hinaus kann ein Fertigungsleitstand sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Es kann sich bspw. um eine einfache Maschinendatenerfassung bis hin zu einer umfangreichen, automatisierten Produktionsplanung und -steuerung handeln.

5.3.2 Beschreibung des Vorgehensmodells

Das vollständige Vorgehensmodell der Systematik gliedert sich in die drei Phasen: „Systemische Beschreibung des Investitionsobjekts“, „Transparente Bewertung des Investitionsobjekts“ und „Ableitung von Handlungsempfehlungen“. Es umfasst alle notwendigen Schritte, um eine Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion durchzuführen. Bild 5-4 zeigt das Vorgehen in Form eines Phasen-Meilenstein-Diagramms.

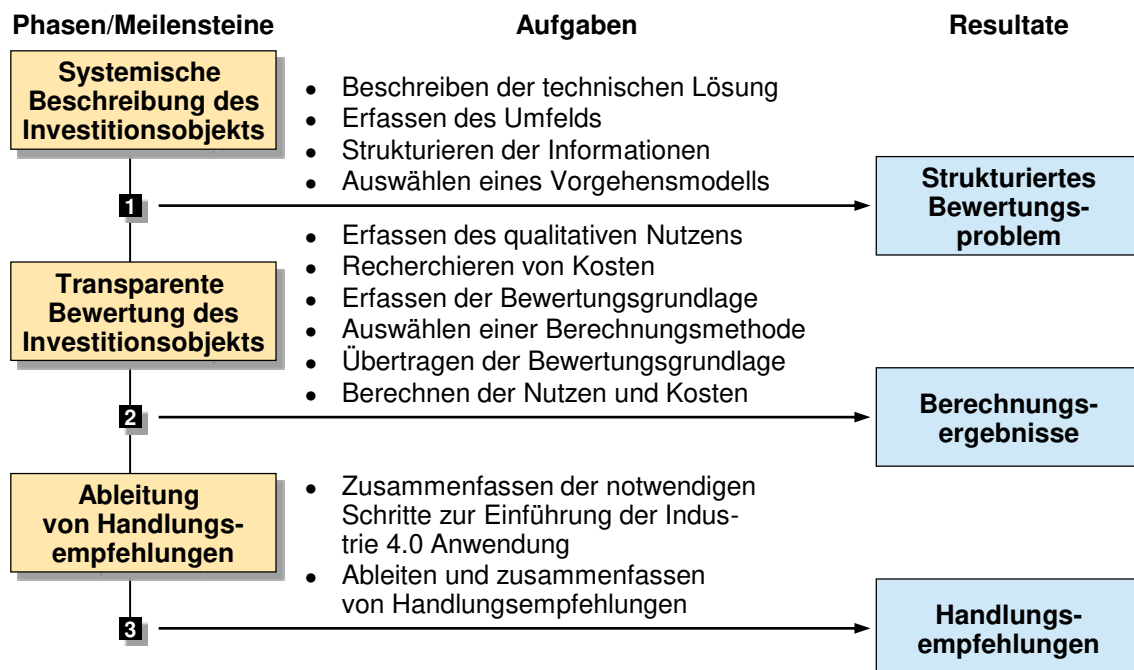


Bild 5-4: Vorgehen zur Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion

Phase 1 ist die **systemische Beschreibung des Investitionsobjekts**. Zunächst erfolgt eine Beschreibung der technischen Lösung mit Hilfe von Steckbriefen (vgl. Kapitel 5.4.1). Da zu Beginn häufig nicht alle Informationen vorliegen, sind die Steckbriefe im Verlaufe des Bewertungsprozesses zu ergänzen. Anschließend werden das Umfeld der zu bewertenden Industrie 4.0 Anwendung sowie relevante Use Cases mit Hilfe einer Datenlandkarte (vgl. Kapitel 5.4.2) identifiziert und erfasst. Die aufgenommenen Informationen werden dann mit Hilfe eines Schalenmodells zur Strukturierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.4.3) strukturiert. Auf dieser Basis wird die Industrie 4.0 Anwendung mit Hilfe von Merkmalen von Investitionsentscheidungen bewertet (vgl. Kapitel 5.2.3) und ein anwendungsspezifisches Vorgehensmodell ausgewählt (vgl. Kapitel 5.3.1). Resultat der ersten Phase ist das strukturierte Bewertungsproblem.

Phase 2 ist die **transparente Bewertung des Investitionsobjekts**. Dabei ist zunächst der qualitative Nutzen zu erfassen. Dies geschieht mit Hilfe eines Schemas zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.1). Unterstützen kann hierbei ein Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.2). Weiterhin sind Kosten zu recherchieren¹⁹. Unterstützend wirkt ein bereitgestellter Kostenkatalog für Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.3). Mit Hilfe einer Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.4) sind die Annahmen bzgl. des Nutzens zu quantifizieren und die recherchierten Kosten zu prüfen bzw. ggf. zu ergänzen. In diesem Zuge sind die unterschiedlichen Business Case Szenarien zu definieren. Das Sichten-Modell einer Investitionsbewertung (vgl. Kapitel 5.2.1) unterstützt diese Strukturierung. Anschließend ist eine geeignete Berechnungsmethode auszuwählen. Eine bereitgestellte Sammlung an Berechnungsmethoden (vgl. Kapitel 5.5.5) dient als Auswahlhilfe. Die aufgenommene Bewertungsgrundlage ist in die Werkzeugunterstützung (vgl. Kapitel 5.6) zu übertragen. Auf dieser Grundlage werden der Nutzen und die Kosten berechnet. Resultat dieser Phase sind die Berechnungsergebnisse.

Phase 3 ist die **Ableitung von Handlungsempfehlungen**. Hierbei sind die notwendigen Schritte zur Einführung der Industrie 4.0 Anwendung in einer Umsetzungsroadmap²⁰ zu dokumentieren. Abschließend sind Handlungsempfehlungen abzuleiten und in einer Management Summary zusammenzufassen. Es liegt die bewertete Industrie 4.0 Anwendung vor. Das zentrale Resultat dieser Phase sind die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen.

¹⁹ Die Reihenfolge der ersten zwei Aufgaben in Phase 2 kann getauscht bzw. parallelisiert werden. Es ist nicht relevant, ob der Nutzen erst qualitativ erfasst oder der Aufwand recherchiert wird. Die Ergebnisse beider Aufgaben sind jedoch für die Erfassung der quantitativen Annahmen notwendig.

²⁰ Die Umsetzungsroadmap und die Management Summary sind gängige Hilfsmittel aus der Literatur wie bspw. [GP14]. Sie finden sich somit nicht unter den Hilfsmitteln in Kapitel 5 wieder. In der Anwendung der Systematik in Kapitel 6 sind sie jedoch enthalten.

5.4 Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts vorgestellt. Sie finden Anwendung im Vorgehensmodell der Systematik (vgl. Kapitel 5.3). Es sind drei Hilfsmittel vorgesehen. Zunächst wird in Kapitel 5.4.1 ein Steckbrief zur Beschreibung der technischen Lösung aufgezeigt. Anschließend wird in Kapitel 5.4.2 eine Datenlandkarte zur Erfassung des Umfelds und der Use Cases der möglichen Investition beschrieben. Abschließend wird in Kapitel 5.4.3 ein Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion vorgestellt.

5.4.1 Steckbrief zur Beschreibung der technischen Lösung

Für die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ist zunächst eine Beschreibung der technischen Lösung vorgesehen. Zum Einsatz kommt ein Steckbrief, welcher mit einem Beispiel in Bild 5-5 dargestellt ist. Das Ziel des Steckbriefs ist ein einheitliches Verständnis über die Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen der technischen Lösung. Die Grundlage des Steckbriefs ist das Referenzmodells einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion (vgl. Kapitel 5.2.2).

Der Steckbrief ist nicht ausschließlich zur Beschreibung einer vollständigen Industrie 4.0 Anwendung, sondern auch für die Beschreibung von Teilsystemen bzw. Ausbaustufen dieser. So ist bspw. nicht grundsätzlich ein vollständiger Fertigungsleitstand zu erfassen, sondern mehrere Ausbaustufen bzw. Teilsysteme auf dem Weg zu diesem.

Der Steckbrief für die Beschreibung der technischen Lösung gliedert sich in neun Bereiche. Titel des Steckbriefs ist die Bezeichnung der Industrie 4.0 Anwendung bzw. des Teilsystems. In den oberen Bereichen werden zunächst organisatorische Aspekte, wie der Bearbeiter und der Stand des Steckbriefs, angegeben. Darunter werden das bzw. die Ziele sowie die Softwarefunktionalitäten beschrieben. Im rechten Bereich ist eine kleine beschreibende Darstellung vorgesehen. Weiterhin werden die Eingangs- und Ausgangsobjekte sowie die Software- und Hardwareinfrastruktur der Anwendung bzw. des Systems beschrieben.


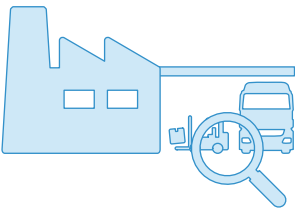





Anwendung: Lieferantenbewertung		
Bearbeiter: R. Joppen		Stand: 16.09.2019
Ziele:  <ul style="list-style-type: none"> Bewertung und Klassifikation von Lieferanten auf Basis gelieferter Materialien, um langfristig eine bessere Materialqualität zu bekommen 		
Software-funktionalitäten:  <ul style="list-style-type: none"> Eine Software wertet die Qualitätsdaten aus den Wareneingängen aus und verknüpft diese mit relevanten Informationen der entsprechenden Lieferanten Ein Dashboard zeigt die klassifizierten Lieferanten mit Bewertungen und Bewertungshistorien an 		
Eingangs-objekte:  <ul style="list-style-type: none"> Informationen zum Wareneingang vom Lieferschein, d.h. Identifikationsnummer, Lieferdatum, Menge, etc. Werte aus den Qualitätsmessungen im Wareneingang 		
Ausgangs-objekte:  <ul style="list-style-type: none"> Bewertung einzelner Lieferanten für unterschiedliche Materialien Klassen an Lieferanten 		
Software-infrastr.:  <ul style="list-style-type: none"> Software zur Erfassung der Wareneingänge mit allen relevanten Informationen vom Lieferschein Software zur Erfassung, Strukturierung und Auswertung der Qualitätsdaten im Wareneingang Software zur Verknüpfung der Qualitätsdaten mit den Wareneingängen 		
Hardware-infrastr.:  <ul style="list-style-type: none"> Desktop-PCs Server zur Datenspeicherung Messinstrumente zur Erfassung der Qualitätsdaten im Wareneingang Anbindung der Messinstrumente an zentrales System 		

Bild 5-5: Steckbrief zur Beschreibung einer technischen Lösung bzw. eines Teilsystems der Industrie 4.0 Anwendung mit einem Beispiel

Nachdem die Teilsysteme in Steckbriefen festgehalten wurden, sind diese in eine Reihenfolge zu bringen. Hier sind zunächst logische Abhängigkeiten zu identifizieren. Der in Bild 5-6 dargestellte Umsetzungsreihenfolgeplan ist dafür vorgesehen.

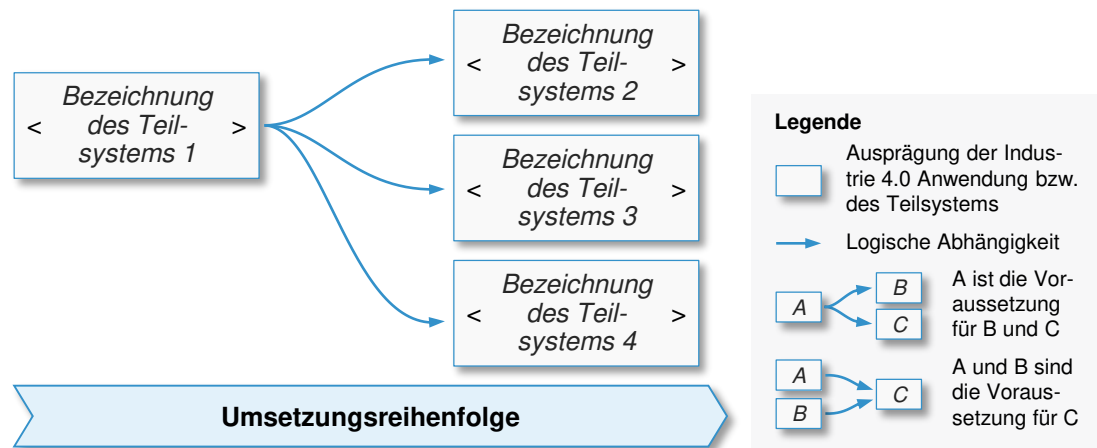


Bild 5-6: Beschreibung einer Umsetzungsreihenfolge von Teilsystemen einer Industrie 4.0 Anwendung

Die Teilsysteme werden entsprechend ihrer Umsetzungsreihenfolge von links nach rechts aufgetragen. Gerichtete Pfeile beschreiben die Abhängigkeit von Teilsystemen. Ein Teilsystem ist die Voraussetzung für mehrere folgende Teilsysteme, sofern es mehrere ausgehende Pfeile hat. Dementgegen erfordert ein Teilsystem mehrere andere Teilsysteme als Voraussetzung, sofern es mehrere eingehende Pfeile hat.

Nachdem alle logischen Abhängigkeiten beschrieben sind und nach wie vor mehrere Vorgehensweisen bei der Umsetzung von Teilsystemen existieren, sind die Teilsysteme entsprechend der Präferenzen des Anwenders zu ordnen.

Die Reihenfolge zur Erstellung der Steckbriefe und die Beschreibung der Umsetzungsreihenfolge können getauscht bzw. auch iterativ durchgeführt werden. Bei Unklarheit über die Teilsysteme können sie erst in eine logische Abhängigkeit gebracht und näher beschrieben werden, um anschließend die Umsetzungsreihenfolge erneut zu konkretisieren. So ermöglichen der Steckbrief und die Beschreibung der Umsetzungsreihenfolge eine erste Spezifikation der Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion in Form einer systemischen Beschreibung.

5.4.2 Datenlandkarte

Zu Beginn der Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung gilt es diese in ihrem Umfeld zu analysieren. Zum Einsatz kommt eine Datenlandkarte. Sie dient zur Erfassung des Umfelds einer Industrie 4.0 Anwendung. Die Datenlandkarte ist eine semiformale Spezifikationstechnik zur Beschreibung und Analyse von Datenflüssen in der Produktion und den angrenzenden Bereichen. Sie eignet sich bspw. für den Einsatz in Workshops und ermöglicht es so verschiedenste Stakeholder und Domänenexperten in den Prozess mit einzubinden. Die Datenlandkarte kann als eine Weiterentwicklung der OMEGA Methode nach [GP14] verstanden werden und wurde in zahlreichen Workshops erprobt. Entgegen

einer klassischen Methode des Prozessmanagements liegt hierbei der Fokus auf den Datenflüssen und IT-Systemen. So wird dem Softwareanteil einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion Rechnung getragen [JEK+18b, S. 463]. Die Grundlage ist das Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion (vgl. Kapitel 5.2.2).

Konstrukte der Datenlandkarte

Die Datenkarte verwendet eine grafische Notation für ein intuitives Verständnis. Grundlage der Datenlandkarte sind 14 Konstrukte. Die Konstrukte reichen von einem Prozesselement, über Input-/Output-Objekte bis hin zu technischen und humanen Ressourcen sowie Modellierungselementen. Die Konstrukte sind in Bild 5-7 dargestellt [JEK+18b, S. 463].

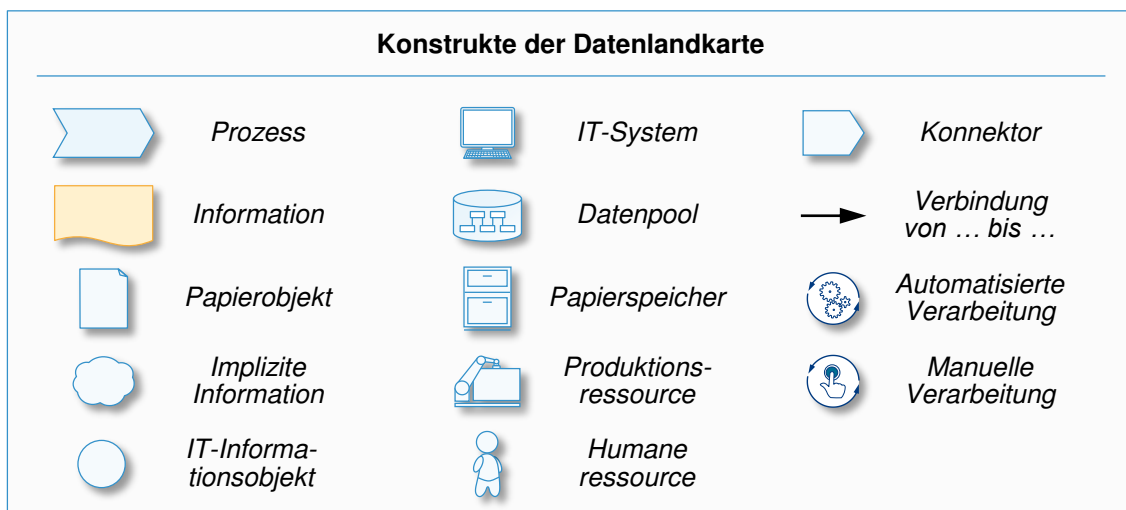


Bild 5-7: Konstrukte der Datenlandkarte nach [JEK+18b, S. 463]

Struktur der Datenlandkarte

Strukturiert ist die Datenlandkarte nach den vier Ebenen „Prozesse“, „Schnittstellen“, „Systeme/ Ressourcen“ und „Informationen“. Die erste bzw. oberste Ebene ist die **Prozessebene**. In dieser wird der Unternehmenskontext erfasst. Es wird eine vereinfachte Sicht auf die betrachteten Geschäftsprozesse dargestellt. Dabei ist nicht jeder einzelne Prozess bzw. jede Tätigkeit abzubilden und zu analysieren. Sie gelten vielmehr als Strukturierung für die weiteren Ebenen.

In der zweiten Ebene **Schnittstellen** werden die zentralen, von Mitarbeitern genutzten Informationsobjekte erfasst. Mit Hilfe der genutzten Dokumente und Daten wird so die Interaktion von Mitarbeitern mit den IT-Systemen dargestellt. Sofern ein Dokument in mehreren Prozessen genutzt wird, ist es unter die entsprechenden Prozesse zu duplizieren. Dokumente können sowohl in Papier als auch in digitaler Form vorliegen. Weiterhin wird der logische Zusammenhang der Informationsobjekte über Flussbeziehungen hergestellt. Die Art der Verarbeitung von Informationsobjekten wird auf den Flussbeziehungen spezifiziert [JEK+18b, S. 464].

Die dritte Ebene **Systeme/ Ressourcen** beschreibt die Quellen und Senken der Dokumente. Hier werden IT-Systeme wie bspw. Enterprise Resource Planning, Manufacturing Execution Systems oder auch einzelne Module von diesen IT-Systemen abgebildet. Gleichmaßen können sowohl Papierspeicher als auch implizite Informationen sowohl Datenquellen als auch -senken darstellen. Implizite Informationen stellen Informationen dar, welche in „den Köpfen der Mitarbeiter“ vorhanden, aber nicht dokumentiert sind. Sie werden häufig mündlich weitergegeben. Eine weitere Art stellen die Fertigungsressourcenobjekte dar. Beispielsweise können Produktionsmaschinen, speicherprogrammierbare Steuerungen, Sensoren und Mensch-Maschine-Schnittstellen entsprechende Datenquellen und -senken darstellen [JEK+18b, S. 464].

Jedes Informationsobjekt hat seinen Ursprung in einem System bzw. einer Ressource. Dieser Ursprung wird über eine logische Verbindung von dem System bzw. der Ressource zum Dokument mit Hilfe eines Pfeils vom Ursprung zum Ziel visualisiert. Auf der logischen Verbindung wird mit Hilfe entsprechender Symbole angezeigt, ob die Informationsgenerierung und -übertragung manuell oder automatisiert erfolgt. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit können logische Verbindungen über Konnektoren vereinfacht dargestellt werden [JEK+18b, S. 464].

Sofern es der Anwendungsfall fordert, kann die Ebene Systeme/ Ressourcen in die drei Ebenen „Systeme“, „Datenbanken“ und „Ressourcen“ untergliedert werden. Dies trifft bspw. zu, wenn die Speicherorte bzw. die Datenbanken keine eindeutige Zuordnung zu den einzelnen Softwaresystemen besitzen und der Zusammenhang der IT-Systeme zu den Fertigungsressourcen näher betrachtet werden soll. So kann auch zwischen Funktionen im Front-End und im Back-End von Systemen unterschieden werden. Sofern die Datenbanken einem IT-System eindeutig zuzuordnen sind, empfiehlt es sich aus Gründen der Übersichtlichkeit keine weitere Unterscheidung einzuführen. Dann stehen die Datenquellen und -senken im Vordergrund, welche in der Ebene Systeme/ Ressourcen beschrieben werden.

Weiterhin werden in der vierten Ebene **Informationen** die zentralen Datenpunkte bzw. die Art der Datenpunkte erfasst. Sie werden über die Informationsobjekte ausgetauscht. Bspw. sind die Auftragsnummer, der Liefertermin oder die Bestellmenge zentrale Informationspunkte auf einer Kundenauftragsbestätigung. Datenpunkte, welche über mehrere Prozesse bzw. Dokumente hinweg identisch sind, werden in einer einheitlichen Reihenfolge dokumentiert und über zusammenhängende, gestrichelte Linien verbunden. I.d.R. ist es nicht das Ziel alle Datenpunkte zu erfassen. Vielmehr ist der Typ der Daten von Interesse [JEK+18b, S. 464].

Idealtypisches Vorgehen zur Erstellung einer Datenlandkarte

Im Folgenden wird ein idealtypisches Vorgehen zur Erstellung einer Datenlandkarte beschrieben. Dabei stellt das beschriebene Vorgehen eine Empfehlung dar, von der abgewichen werden kann. Das Vorgehen verläuft größtenteils entlang der Ebenen der Daten-

landkarte. Die Informationen können entweder im Workshop erfasst oder aus einer detaillierten Prozessdokumentation extrahiert werden. Dargestellt ist das idealtypische Vorgehen zur Erstellung der Datenlandkarte in Bild 5-8.

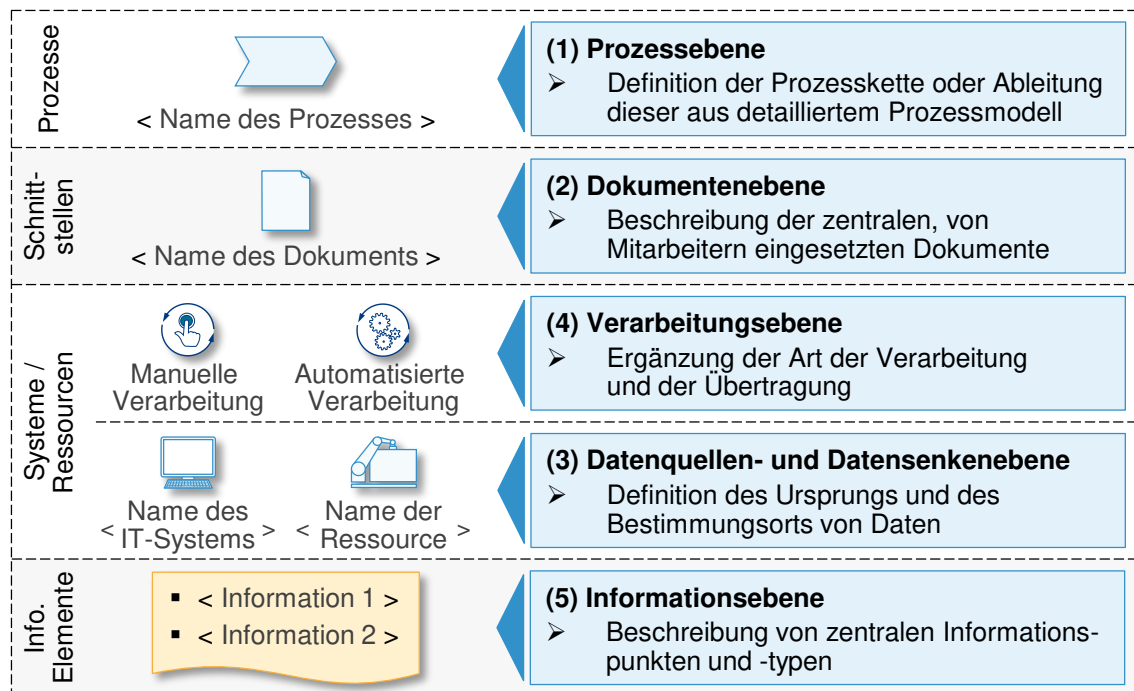


Bild 5-8: Idealtypisches Vorgehen zur Erstellung der Datenlandkarte nach [JEK+18b, S. 464]

Zunächst werden die zentralen Prozesse beschrieben. Dabei ist entsprechend dem Anwendungsfall das Abstraktionslevel zu definieren. I.d.R. ist es konkreter als die Hauptgeschäftsprozesse wie „Arbeitsvorbereitung durchführen“, „Teile fertigen“, etc., jedoch abstrakter als jede einzelne Tätigkeit wie „Werkstücke in Maschine legen“ und „Maschinenparameter einstellen“. Die Prozesse werden nacheinander innerhalb der ersten bzw. obersten Ebene der Datenlandkarte platziert und bilden so eine horizontale Achse.

Anschließend werden die den Prozessschritten entsprechenden Informationsobjekte in der zweiten Ebene darunter beschrieben. Sie stellen die zentralen Informationsobjekte in den Prozessen dar. Im Falle von nichtlinearen Prozessen oder weiteren Bedingungen können in dieser Ebene zusätzliche Sub-Ebenen eingeführt werden.

Im dritten Schritt werden die Datenquellen und -senken über die entsprechenden Ressourcen spezifiziert. Dies können bspw. IT-Systeme oder Papierspeicher sein. Anschließend werden im vierten Schritt die logischen Verbindungen zwischen den Systemen bzw. Ressourcen und den Dokumenten visualisiert. Die Verbindungen werden spezifiziert, z.B. ob die Informationsgenerierung und -übertragung manuell oder automatisiert erfolgt.

Abschließend wird in der untersten Ebene eine Liste der relevanten Informationen aufgelistet, welche auf den Informationsobjekten enthalten sind. Wird bspw. ein nicht vorhandenes Dokument, System, Ressource oder Informationsobjekt benötigt, wird dies in Rot dargestellt [JEK+18b, S. 464].

Die Datenlandkarte ermöglicht die Beschreibung und Analyse von Datenflüssen in der Produktion und den angrenzenden Bereichen. Insbesondere in einem Workshopformat ermöglicht sie es, die Industrie 4.0 Anwendung als System innerhalb eines Systems zu beschreiben und so verschiedenste Stakeholder und Domänenexperten in den Prozess der Bewertung mit einzubinden. Sie ist Grundlage für die Spezifikation und die Abgrenzung der zu bewertenden Industrie 4.0 Anwendung.

5.4.3 Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion

Die vielfältigen Informationen über das Umfeld der Industrie 4.0 Anwendung gilt es zu strukturieren. Das Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion liefert hier eine Unterstützung. Es ermöglicht die Use Cases mit den entsprechenden Rahmenbedingungen und den Zusammenhängen zu anderen Use Cases zu beschreiben. Das Schalenmodell basiert auf dem Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion (vgl. Kapitel 5.2.2) und wurde in diversen Workshops und Projekten erprobt. Es stellt einen Rahmen zur Strukturierung von Use Cases, deren Zusammenhänge und den einhergehenden Rahmenbedingungen dar. Typischer Anwendungsfall des Strukturierungsrahmens ist ein Workshop. Die Methode ermöglicht somit eine Verständigung verschiedener Stakeholder und Domänenexperten über das Investitionsobjekt [JEK+19, S. 486].

Konstrukte des Schalenmodells

Das Schalenmodell verwendet eine grafische Notation für ein intuitives Verständnis. Grundlage des Schalenmodells sind 9 Konstrukte. Die Konstrukte werden innerhalb fünf aufeinander aufbauenden Schalen angeordnet. Es wird zwischen vorhandenen, benötigten und nicht vorhandenen, benötigten Konstrukten unterschieden. Letztere werden in Rot dargestellt [JEK+19, S. 486]. Dargestellt sind die Konstrukte in Bild 5-9.

Struktur des Schalenmodells

Strukturiert ist das Modell nach den fünf Schalen „Datengrundlage“, „Strukturgebende Software“, „Use Case Spezifische Software“, „Prozessanpassung in direkten Bereichen (Use Case)“ und „Prozessanpassung in indirekten Bereichen“. Die Schalen sind abgeleitet aus dem Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion (vgl. Kapitel 5.2.2).

Die benötigte Datenbasis wird in der untersten Schale Datengrundlage beschrieben. Die strukturgebende Software sowie die Use Case spezifische Software werden jeweils auf

den darum liegenden Schalen festgehalten. Weiterhin sind Use Cases und indirekte Prozesse zu beschreiben. Im Rahmen der Hardware, werden die mechanische Grundstruktur, die Aktoren und Sensoren sowie die IT-Infrastruktur visualisiert und mit einer Bezeichnung versehen [JEK+19, S. 486].

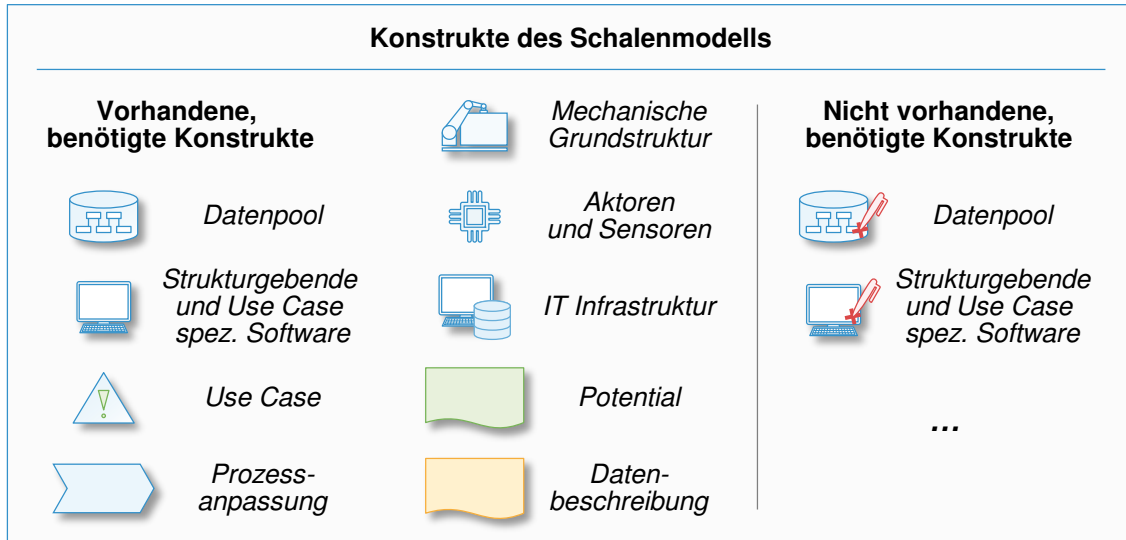


Bild 5-9: Konstrukte des Schalenmodells zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen nach [JEK+19]

Idealtypisches Vorgehen zur Erstellung des Schalenmodells

Im Folgenden wird ein idealtypisches Vorgehen zur Erstellung des Schalenmodells beschrieben. Dabei stellt das beschriebene Vorgehen eine Empfehlung dar, von der abgewichen werden kann. Die Informationen können entweder im Workshop direkt erfasst werden, aus der Datenlandkarte (vgl. Kapitel 5.4.1) oder einer detaillierten Prozessdokumentation extrahiert werden. Dargestellt ist das idealtypische Vorgehen zur Erstellung des Schalenmodells in Bild 5-10.

Zu Beginn sind die identifizierten **Use Cases** zu beschreiben. Ein Use Case beschreibt die Anpassung der Prozesse im betrachteten Bereich [JEK+19, S. 486]. Im zweiten Schritt ist die **Use Case spezifische Software** zu erfassen. Die Use Case spezifische Software beschreibt Lösungen, welche zur direkten Umsetzung des Use Cases notwendig sind. Es sind i.d.R. Lösungen die auf einzelne, spezifische Anwendungsfälle ausgerichtet sind. Sie basieren häufig auf **strukturgebender Software**. Die strukturgebende Software wird in Schritt drei erfasst. Strukturgebende Software beschreibt Software Systeme, welche die Prozesse innerhalb eines Bereichs maßgeblich beeinflussen. Sie stellen häufig den „Dreh- und Angelpunkt“ für verschiedene Use Case spezifische Software dar [JEK+19, S. 486].

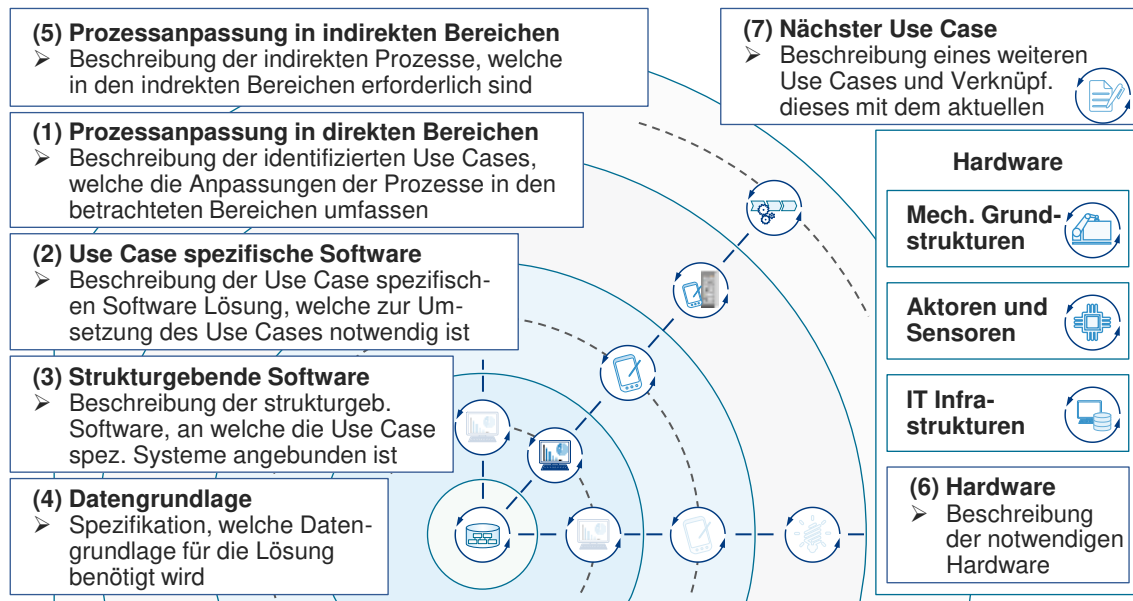


Bild 5-10: Idealtypisches Vorgehen zur Erstellung des Schalenmodells zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendung nach [JEK+19, S. 486]

Jede Software benötigt eine **Datengrundlage**. Diese wird in Schritt vier beschrieben. Dabei wird näher spezifiziert, welche Daten für die Umsetzung des Use Cases notwendig sind. Hier wird auch der Zusammenhang zwischen verschiedenen Datenbanken spezifiziert [JEK+19, S. 486]. Weiterhin werden **Prozessanpassungen in indirekten Bereichen** beschrieben, um die Umsetzbarkeit entsprechender Use Cases nicht nur technisch, sondern auch organisatorisch sicherzustellen. Dies stellt den obersten Layer mit einem abteilungsübergreifenden Charakter dar [JEK+19, S. 486]. In Schritt sechs wird die **Hardware** des Investitionsobjekts erfasst. Dies stellt den tangiblen Bereich der Industrie 4.0 Anwendung dar. Die mechanische Grundstruktur, die Aktoren und Sensoren sowie die IT-Infrastruktur sind zu berücksichtigen [JEK+19, S. 486].

Nachdem ein Use Case spezifiziert ist, wird das Vorgehen erneut durchlaufen und ein weiterer Use Case spezifiziert. Dabei sind die Verknüpfungen mit den bereits beschriebenen Use Cases zu berücksichtigen und zu beschreiben. Die Verknüpfungen können auf allen Schalen des Modells existieren [JHK+19].

Das Schalenmodell ermöglicht die Strukturierung und Konsolidierung der Informationen aus dem Steckbrief zur Beschreibung der technischen Lösung (vgl. Kapitel 5.4.1) und der Datenlandkarte (vgl. Kapitel 5.4.2). Gemeinsam ermöglichen die drei Hilfsmittel so eine systemische Beschreibung der Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion.

5.5 Hilfsmittel für eine transparente Bewertung des Investitionsobjekts










Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hilfsmittel für eine transparente Bewertung des Investitionsobjekts vorgestellt. Sie finden Anwendung im Vorgehensmodell der Systematik (vgl. Kapitel 5.3). Es sind fünf Hilfsmittel vorgesehen. Zunächst wird in Kapitel 5.5.1 ein Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion vorgestellt. Weiterhin werden in Kapitel 5.5.2 ein Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion, in Kapitel 5.5.3 ein Kostenkatalog für Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion und in Kapitel 5.5.4 eine Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion beschrieben. Die in Kapitel 5.5.5 vorgestellte Sammlung an Berechnungsmethoden unterstützt bei der Auswahl einer geeigneten Berechnungsmethode.

5.5.1 Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion

Für die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ist eine Nutzenerfassung notwendig. Dabei stellt die Identifikation von quantifizierbaren Potentialen häufig eine Schwierigkeit dar. Das Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion ist eine Kreativitätstechnik zur Erfassung von Potentialen, welche sich durch ein Investitionsobjekt ergeben können. Das Schema basiert im Kern auf einer Literaturrecherche und einer anschließenden Erprobung in diversen Projekten. Die im Schalenmodell (vgl. Kapitel 5.4.3) spezifizierten Use Cases können mit dem Schema konkretisiert werden [JTK18]. Dargestellt ist das Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion in Bild 5-11.

Gegeben sind neun Kategorien zur Schaffung von Nutzen in der Produktion. Die Grundlage für die Zusammenstellung der Nutzenkategorien ist eine Literaturrecherche. Zentrale Quellen dabei sind das Polylemma der Fertigungssteuerung und die Arbeiten des VDI sowie die Arbeiten nach [Wie14, S. 266] und [VDI3633, S. 9]. Die drei Kategorien „Leistung/ Qualität“, „Durchlaufzeit/ Termintreue“ und „Lager/ Bestand“ sind angelehnt an das Polylemma der Fertigungssteuerung. Ergänzt wird dies um die Kategorie „Personalkosten/ Arbeitszeiten“, in welcher bspw. Nutzen durch Verkürzungen von Vorgabezeiten in der Produktion nach [Bög13, S. 1373] festgehalten werden können. Die Kategorie „Transparenz“ rührt aus dem antizipierten Potential einer Transparenzerhöhung in der Produktion durch Industrie 4.0 [BBC+15, S. 30f.]. Gleicher Herkunft entstammt die Kategorie „Energie-/ Ressourcenverbrauch“ [FF15, S. 88ff.], [RLG+15, S. 5]. Weiterhin fasst die Kategorie „Anlagen-/ Kapitalkosten“ verschiedene Aspekte wie Anlagenkosten, Kapitalbindung u.ä. aus der VDI-RICHTLINE 3633 zusammen. Die Kategorie „Arbeitsqualität/ Ergonomie“ ermöglicht eine Erfassung verbesserter Arbeitsbedingungen. Für weitere Potentiale, welche nicht in die genannten Kategorien passen, ist eine Kategorie

„Sonstiges“ vorgesehen. Auf Grund der stark vernetzten Wirkzusammenhänge in der Produktion sind die Kategorien nicht eindeutig einander ausschließend [JTK18, S. 253].

Potentiale und Nutzelemente					
I4.0 Anwendung: < Bezeichnung >		Use Case: < Bezeichnung >		Stand: < Datum >	
 Leistung / Qualität		 DZL / Termintreue		 Personalk. / Arbeitszeiten	
< Prozessumstellung >	Einsparung von Arbeitszeiten	< Bezeichnung eines Potentials >	Monetäre Bewertung	< Bezeichnung eines Potentials >	Monetäre Bewertung
 Transparenz		 Lager / Bestand		 Anlagen- / Kapitalkosten	
< Schnelleres Auffinden von notwendigen Materialien >	Einsparung von Arbeitszeiten	< Geringerer Lagerbestand >	Geringere Bestandskosten	< Bezeichnung eines Potentials >	Monetäre Bewertung
 Energie- / Ress.-verbrauch		 Arbeitsquali. / Ergonomie		 Sonstiges	
< Bezeichnung eines Potentials >	Monetäre Bewertung	< Bezeichnung eines Potentials >	Monetäre Bewertung	< Bezeichnung eines Potentials >	Monetäre Bewertung

Legende DLZ: Durchlaufzeit Personalk.: Personalkosten Quali.:Qualität Ress.: Ressourcen
 : Qualitatives Potential : Quantifizierbares Potential

Bild 5-11: Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion mit Beispielen in Anlehnung an [JTK18, S. 253]

Die einzelnen Felder der Kategorien sind jeweils in ein Freifeld und ein Feld mit „Monetäre Bewertung“ untergliedert. Jedes der Felder ist von links nach rechts zu befüllen. Dabei ist jede Idee so weit zu konkretisieren bis diese eindeutig monetär bewertbar ist. Bspw. kann das Potential „Schnelleres Auffinden von notwendigen Materialien“ in „Einsparung von Arbeitszeiten“ konkretisiert werden. Mit einer prozentualen Einschätzung der Einsparung lässt sich das Potential unter Zuhilfenahme einer geeigneten Bewertungsgrundlage monetär bewerten [JTK18, S. 253].

Das Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion ist eine Kreativitätstechnik zur Erfassung von Potentialen, welche sich durch die betrachtete Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ergeben können. Durch die gemeinsame Erfassung der Potentiale in Workshops und das Konkretisieren der Potentiale, trägt das Schema u.a. zu einer erhöhten Transparenz über die Bewertung bei.

5.5.2 Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion

Bei vielen Industrie 4.0 Anwendungen finden sich ähnliche Potentiale wieder. Ziel des Katalogs an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion ist es, eine Reihe an Potentialen von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion als wiederverwendbares Lösungswissen bereit zu stellen. Die Potentiale lassen sich mit Hilfe der neun Kategorien

des Schemas zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.1) strukturieren. Wie auch das Schema basiert der Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion im Kern auf einer Literaturrecherche, wie bspw. der Analyse der Anwendungsbeispiele der Industrie 4.0 Landkarte (vgl. Kapitel 3.2.4). Ergänzend wurden sie in diversen Projekten erprobt.

Die einzelnen Potentiale in der Produktion können sich vielfältig auswirken. Um die Auswirkungen zu strukturieren, kann das Sichten-Modell einer Investitionsbewertung (vgl. Kapitel 5.2.1) unterstützen. Eine Monetarisierung der Potentiale erfordert darüber hinaus ihre Konkretisierung und die Zuordnung einer Bewertungsgrundlage. Tabelle 5-2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion.

Tabelle 5-2: Ausschnitt aus dem Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion in Anlehnung an [JTK18, S. 254]

Nr.	Kategorie	Potential	Bedeutung	Monetäre Bewertung	Bewertungsgrundlage
1.1	Leistung/Qualität	Prozessinnovation	Arbeitsteilung bzw. Vorbereitung von Arbeitsinhalten	Wegfall von redundanten Arbeitsabläufen	Mitarbeiterauslastung
1.2	s.o.	Prozessvereinfachung	Vermeidung von Fehlern bei Montagetätigkeiten	Weniger Nacharbeitszeit	s.o.
1.3	s.o.	s.o.	Schnelleres Anlernen von neuen Mitarbeitern	Weniger Arbeitszeit zum Anlernen	s.o.
1.4	s.o.	s.o.	Prozessvereinfachung durch Expertenwissen	Weniger Arbeitszeit	s.o.
2.1	Durchlaufzeit/Termintreue	Parallelisierung von Prozessen	Schnellere Auslieferung von Produkten	Höhere Preise für schnellere Lieferung	Produktwert
2.2	s.o.	s.o.	Opportunitätskosten für nicht eingehaltene Termine	Vermeidung von Vertragsstrafen	s.o.
3.1	Personalkosten/Arbeitszeiten	Mitarbeiterflexibilität	Einsatz geringer qualifizierter Mitarbeiter	Geringere Lohnkosten für best. Tätigkeiten	Mitarbeiterkosten
3.2	s.o.	s.o.	s.o.	Mehr Output durch mehr Arbeitskräfte	s.o.

Bei der Einführung von Tablets in der Produktion ist ein Beispiel aus der Kategorie „Leistung/ Qualität“ das Potential „Prozessinnovation“. Prozessinnovationen können u.a. zu einer „Arbeitsteilung bzw. Vorbereitung von Arbeitsinhalten“ führen. Dies wiederum kann zu einem „Wegfall von redundanten Arbeitsabläufen“ führen. Für ein Unternehmen kann das bspw. konkret bedeuten, dass einem Mitarbeiter Informationen über die folgenden Aufträge bereitgestellt werden. So kann der Mitarbeiter eine Vielzahl an Aufträgen im Rahmen einer einzelnen Arbeitsstation bzw. eines einzelnen Arbeitsschrittes bündeln.

Zum einen kann der Mitarbeiter die Arbeitsschritte effizienter abarbeiten. Zum anderen kann er sich Wegezeiten sparen, wenn die Arbeitsschritte an unterschiedlichen Orten in der Produktion durchzuführen sind. Das Potential führt somit zu der monetären Bewertungsgröße „Wegfall von redundanten Arbeitsabläufen“, da ein Mitarbeiter in Summe weniger Wege von einer Arbeitsstation zur anderen hat [JTK18, S. 252ff.]. Der vollständige Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion ist in Anhang A3.3 dargestellt.

Der Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion kann als Unterstützung bzw. Ergänzung des Schemas zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.1) betrachtet werden. Sie tragen gemeinsam zu einer erhöhten Transparenz über die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion bei.

5.5.3 Kostenkatalog für Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion

Die Kosten einer Industrie 4.0 Anwendung sind sehr vielfältig und häufig nicht direkt ersichtlich. Eine Übersicht über mögliche Kostenelemente liefert ein Kostenkatalog für Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Der Kostenkatalog enthält 76 mögliche Kostenelemente, die im Rahmen einer Investition in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion anfallen können. Grundlage der Arbeit ist die VDI-RICHTLINE 2884 [VDI2884, S. 12ff.]. Die in der Richtlinie „Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)“ beschriebenen Kostenelemente wurden auf Basis einer Literaturrecherche²¹ ergänzt. Die Ergänzungen ergaben sich aus der Analyse der Anwendungsbeispiele der Industrie 4.0 Landkarte (vgl. Kapitel 3.2.4) und dem Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion (vgl. Kapitel 5.2.1). Ergänzend wurden die Kostenelemente strukturiert und eine Beschreibung hinzugefügt.

Strukturiert sind die Kostenelemente entlang der Phasen im Lebenszyklus. Der klassische Lebenszyklus einer Produkteinführung wird in diesem Fall auf die Einführung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion angewendet [JKH+18, S. 467f.]. In Tabelle 5-3 ist ein Ausschnitt aus dem Kostenkatalog dargestellt.

Der Lebenszyklus gliedert sich in die Phasen Produktionssystemplanung, Entwicklung, Einführung, Reifezeit, Sättigung und Abstieg. Bspw. wird die Produktionssystemplanung wiederum in Bestandsaufnahme und Soll-Planung untergliedert. In diesem Rahmen können zunächst Bedarfsermittlungskosten sowie Kosten für eine Prozessplanung anfallen. So werden alle Phasen des Produktlebenszyklus in Kostenarten gegliedert, welchen wiederum konkrete Kostenelemente zugeordnet sind [JKH+18, S. 467f.]. Der vollständige Kostenkatalog ist dem Anhang A3.4 zu entnehmen.

²¹ Die Quellen der Literaturrecherche sind im vollständigen Kostenkatalog im Anhang A3.4 integriert.

Tabelle 5-3: Ausschnitt aus dem Kostenkatalog in Anlehnung an [JKH+18, S. 468] und [VDI 2884]

Lebenszyklus	Kostenart	Kostenelement	Nr.	Beschreibung	Quellen
Produktionssystem-planung	Bestandsaufnahme	Bedarfs-ermittlung	1	Ermitteln, Erfassen und Aufbereiten von Veränderungsbedarfen	[VDI2884]
		Prozessauf-nahme und -analyse	2	Erfassen und Analysieren von Ist-Prozessen	[GP14]
		Bestands-aufnahme der Infrastruktur	3	Aufnehmen der technischen Infrastruktur, IT-Systemlandschaft, vorhandenen Schnittstellen und Daten	[JEK+18], [KJR+18]
		Potential-identifikation	4	Ermitteln, Erfassen und Aufbereiten von Verbesserungsmöglichkeiten	[GP14]
Entwicklung	Software	Software-beschaffung	16	Anschaffen relevanter Software	[MBS+19], [VDI2884]
		Software Customizing	17	Anpassen der einzusetzenden Softwarelösung an die Ansprüche des betrachteten Unternehmens	[MBS+19], [AAA+09]
		Schaffen von Datenbanken	18	Erstellen und Installieren von Datenbanken	[JEK+18], [KJR+18]
		Anbinden an Systeme und Datenbanken	19	Schaffen von Schnittstellen zu gegebenen Datenbanken zum Austauschen und zur Konvertierung von Daten	[JEK+18], [KJR+18]
		Cloud-Bereitstellung und Anbindung	20	Einrichten der Infrastruktur zur Bereitstellung von Software-Applikationen	[NP18], [Urb19-ol]
		Personal-beschaffung	21	Beschaffen von notwendigem zusätzlichem Personal (z.B. auf Internetplattformen)	[VDI2884]
		Interne Mitarbeiter für die Entwicklung	22	Löhne, Gehälter und Sozialversicherungsbeiträge	[VDI2884]
		Externe Mitarbeiter für die	23	Externe unterstützende Unternehmen	[VDI2884]

Zur Schaffung von Transparenz über die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion ist es u.a. wichtig, einen Überblick über die möglichen Kostenelemente zu erlangen. Der vorgestellte Kostenkatalog ermöglicht dies. Welche Kostenelemente im Rahmen einer zu bewertenden Industrie 4.0 Anwendung relevant sind, ist individuell auszuwählen.

5.5.4 Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion

Im Rahmen der Problemanalyse (vgl. Kapitel 3) wurde die Problematik der fehlenden Datengrundlage für eine Investitionsbewertung aufgezeigt und analysiert. Der Grund ist, dass die Daten für eine Investitionsbewertung häufig nicht vorhanden bzw. nur unter großen Aufwänden zu beschaffen sind [Tas13, S. 29]. Die Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion liefert hier eine Unterstützung. Die Methode wurde auf Basis der zuvor vorgestellten Hilfsmittel erarbeitet und in diversen Workshops erprobt. Sie ermöglicht die Erfassung relevanter Rahmenbedingungen und Annahmen für

eine Investitionsbewertung. Die Methode stellt ein Kartenset bereit, welches eine workshopbasierte Erfassung der Daten ermöglicht. So können alle relevanten Stakeholder bei der Investitionsentscheidung von Beginn an einbezogen und Transparenz über die Annahmen geschaffen werden [JKH+18, S. 468f.].

Workshopkarten der Methode

Die Workshopkarten gliedern sich in die drei Grundtypen „Annahmen und Rahmenbedingungen“, „Nutzen- und Kostenelemente“ und „Ressourcenelemente“ [JKH+18, S. 468f.]. Dargestellt ist eine Übersicht über die Workshopkarten der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion in Bild 5-12.

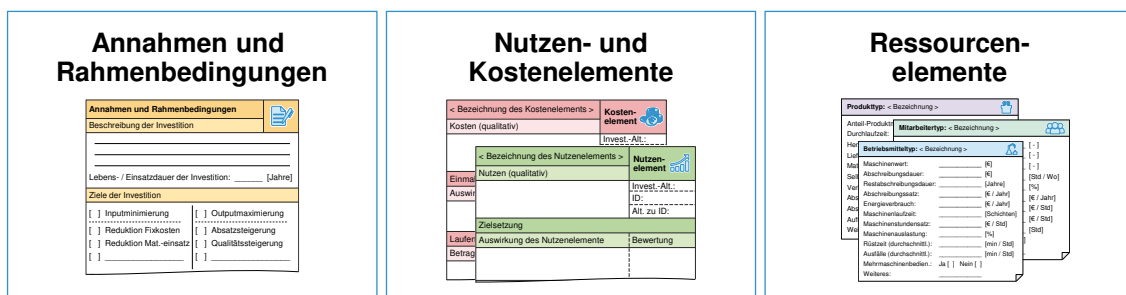


Bild 5-12: Übersicht über die Workshopkarten der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion nach [JKH+18, S. 470]

Die Workshopkarte **Annahme und Rahmenbedingungen** gliedert sich in drei Bereiche. Im oberen Bereich ist zunächst eine Beschreibung der möglichen Investition und einer Abschätzung ihrer Lebens- bzw. ihrer Einsatzdauer vorgesehen. Im darunterliegenden Bereich wird das übergeordnete Ziel der Investition definiert. Es wird erfasst, ob die Investition auf Input-Minimierung oder Output-Maximierung abzielt. Dieses Ziel wird konkretisiert und ggf. um eine kurze Erläuterung ergänzt [JKH+18, S. 469f.].

Im unteren Bereich der Workshopkarte werden diverse Informationen als Berechnungsgrundlage festgehalten. Beispiele sind die Anzahl der Arbeitstage, die Sollarbeitszeit und die Kapitalkosten. Hier werden bewusst keine spezifischen Rahmenbedingungen der Produktion erfasst, da diese Informationen zu vielfältig sind. Die spezifischen Bewertungsgrundlagen werden mit den Workshopkarten Ressourcenelemente festgehalten [JKH+18, S. 470]. Die Workshopkarte für die Annahmen und Rahmenbedingungen ist dem Anhang A3.5 zu entnehmen.

Der zentrale Teil einer Investitionsrechnung sind die Nutzen und Kosten. Der Nutzen wird mit Hilfe der Workshopkarte **Nutzelement** erfasst. Die Workshopkarte für ein Nutzelement ist in Bild 5-13 mit Erklärung dargestellt.


Name des Nutzelements	< Bezeichnung des Nutzelements >		Nutzen- element 	Identifikation des Nutzen- elements
Konkretisierter, qualitativer Nutzen	Nutzen (qualitativ)			
In quantitativen Werten aus- drückbarer Nutzen	Zielsetzung		Invest.-Alt.:	Quantifizierung der Nutzen
			ID:	
			Alt. zu ID:	
Beschreibung des initialen Effekts des antizipierten Nutzens	Auswirkungen des Nutzelements		Bewertung	Beschreibung des Verlaufs des antizipierten Nutzens
Zeitverlauf				
Initial		Verlauf		

Bild 5-13: Workshopkarte für ein Nutzelement nach [JKH+18, S. 470]

Die Überschrift der Workshopkarte Nutzelement repräsentiert die erwarteten qualitativen Vorteile wie z.B. Transparenz in der Produktion. Diese wird darunter durch eine qualitative Erklärung konkretisiert. So kann bspw. eine höhere Transparenz in der Produktion zu einer besseren Überwachung der Betriebsabläufe und so zu einer besseren Kapazitätsplanung führen. Im folgenden Abschnitt Zielsetzung sind die quantitativen Auswirkungen der Nutzelemente einzutragen. Dies kann auf verschiedene Weise geschehen. Liegt ein konkreter Geldwert vor, wird dieser eingetragen. Alternativ wird der erwartete Nutzen indirekt erfasst, so dass dieser später in einen monetären Wert umgewandelt werden kann. Ein Beispiel dafür ist, dass die Gesamtanlageneffektivität einer Maschine durch eine bessere Überwachung der Betriebsbedingungen einer Maschine von 65 % auf 75 % steigt. Um die betreffende Maschine zu identifizieren, ist es notwendig, die Maschine mit der Ressourcenkarte Betriebsmitteltyp zu spezifizieren und anzuhängen. So wird eine eindeutige Berechnungsgrundlage zugewiesen. Im unteren Abschnitt der Workshopkarte ist ein Zeitverlauf aufzuzeigen, in dem der Nutzen erreicht wird [JKH+18, S. 469f.].

Die Kosten werden mit Hilfe der Workshopkarte **Kostenelement** erfasst. Die Workshopkarte für ein Kostenelement ist in Bild 5-14 mit Erklärung dargestellt.


Name des Kostenelements	< Bezeichnung des Kostenelements >		Kosten- element 
Konkretisierte, qualitative Kosten	Kosten (qualitativ)		Invest.-Alt.: ID: Alt. zu ID:
Beschreibung der einmaligen Kosten	Einmalige Kosten		Bewertung der einmaligen Kosten in €
	Auswirkungen des Kostenelements	Bewertung	
Beschreibung der laufenden Kosten	Laufende Kosten		Startzeitpunkt und Periodenlänge der Kosten
	Betrag/ Range	Startzeitpunkt Periodenlänge	
	Entwicklung		Entwicklung der Kostenelemente
	Verlauf [%]	Startzeitpunkt	
	Betrag/ Range	Periodenlänge	
Beschreibung des Auszahlungsmodells	Auszahlungen		Erläuterung des Auszahlungsmodells
	Bezahlmodell	Erläuterung	
	<input type="checkbox"/> Direktbezahl.	Betrag/ Range	
	<input type="checkbox"/> Leasing	Startzeitpunkt	
	<input type="checkbox"/> Pay-per-Use	Periodenlänge	
	Weitere _____	Weiteres	

Bild 5-14: Workshopkarte für ein Kostenelement nach [JKH+18, S. 470]

Die Überschrift der Workshopkarte stellt die erwarteten Kosten wie bspw. Installationskosten dar. Die Kosten sind zunächst qualitativ zu beschreiben. Im Bereich darunter werden sie in einmalige und laufende Kosten unterteilt. Für die einmaligen Kosten sind eine Beschreibung und eine Bewertung einzutragen. Bei den laufenden Kosten wird darüber hinaus die Kostenentwicklung erfasst. Dies beinhaltet einen Startzeitpunkt, eine Periodenlänge und eine Entwicklung [JKH+18, S. 469f.]. Im unteren Bereich des Kostenelements wird festgelegt, ob Einzahlungen/Auszahlungen und Einnahmen/Ausgaben zeitlich voneinander getrennt sind. Dazu sind verschiedene mögliche Bezahlmodelle angegeben und ein Bereich für Erläuterungen vorgesehen [JKH+18, S. 469f.].

In der Regel erfordern Nutzen- und Kostenelemente eine Bewertungsgrundlage. Die Bewertungsgrundlage wird mit Hilfe der Workshopkarte **Ressourcenelement** erfasst. Es wird zwischen Produkttyp, Mitarbeitertyp und Betriebsmitteltyp unterschieden [JKH+18, S. 470]. Dargestellt sind die Ressourcenelemente in Bild 5-15.




Produkttyp: < Bezeichnung > 		
Anteil-Produktmix: Durchlaufzeit: Herstellzeit: Lieferzeit: Materialkosten: Selbstkosten: Verkaufspreis: Absatzmenge: Absatzpotential: Auftragsrückstand: Weiteres:	Mitarbeitertyp: < Bezeichnung > 	
	Abteilung:	Betriebsmitteltyp: < Bezeichnung > 
	Anzahl MA in Abteilung	
	Anzahl MA-Typ:	
	Plan-Arbeitsstunden:	
Arbeitsauslastung:	Maschinenwert: _____ [€] Abschreibungsdauer: _____ [€] Restabschreibungsdauer: _____ [Jahre] Abschreibungssatz: _____ [€ / Jahr] Energieverbrauch: _____ [€ / Jahr] Maschinenlaufzeit: _____ [Schichten] Maschinenstundensatz: _____ [€ / Std] Maschinenauslastung: _____ [%] Rüstzeit (durchschnittl.): _____ [min / Std] Ausfälle (durchschnittl.): _____ [min / Std] Mehrmaschinenbedien.: Ja [] Nein [] Weiteres: _____	
Vollkostensatz Jahr:		
Vollkostensatz Std:		
Kostensatz Überstd.:		
Aktuelle Überstd.:		
Mehrmaschinenbedien.		
Weiteres:		

Bild 5-15: Workshopkarten für Ressourcenelemente nach [JKH+18, S. 470]

Für die verschiedenen Ressourcenelemente sind diverse mögliche Berechnungsgrundlagen vorgesehen. Je nach Verfügbarkeit der Daten können alternative Berechnungsgrundlagen angegeben werden. So können z.B. auf einer Ressourcenkarte ein Maschinenwert und ein Abschreibungszeitraum angegeben werden, mit denen im Folgenden ein Abschreibungssatz berechnet werden kann. Sofern bekannt, kann dieser alternativ auch sofort erfasst werden [JKH+18, S. 470].

Anwendung der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion

Die aufgezeigte Methode sieht eine Erfassung der für eine Investitionsbewertung notwendigen Daten in Workshops vor. Das zentrale, strukturgebende Element dafür ist ein Lebenszyklusmodell. Entlang des Modells werden die Annahmen und Rahmenbedingungen sowie der Nutzen und die Kosten erfasst. An die Workshopkarten Nutzen- und Kostenelement wird jeweils ein Ressourcenelement angehängt. Dies geschieht zunächst für einen initialen Use Case. Anschließend können weitere Use Cases bewertet werden. Diese werden unter dem vorherigen Use Case erfasst, um mögliche Zusammenhänge und Synergien festzuhalten. Bei der Verwendung der Workshopkarten müssen nicht zwangsweise alle Felder ausgefüllt werden [JKH+18, S. 470f.].

Eine zentrale Hürde bei der Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion ist die fehlende Datengrundlage. So werden i.d.R. zahlreiche Annahmen über das Investitionsobjekt getätigt. Um dabei Transparenz zu schaffen unterstützt die Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion. Sie ermöglicht es die Daten gemeinsam in Workshops zu erfassen und ein einheitliches Verständnis über diese zu generieren.

5.5.5 Sammlung an Berechnungsmethoden

Sobald die Potentiale und Rahmenbedingungen einer Industrie 4.0 Anwendung erfasst und in konkrete Kosten- bzw. Nutzelemente überführt worden sind, gilt es die eigentliche Investitionsrechnung durchzuführen. In diesem Kontext ist zunächst eine geeignete Berechnungsmethode auszuwählen. Diese wurden bereits in verschiedenen Arbeiten ausführlich beschreiben. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf [GDE+19], [Göt14] und [Hee16] verwiesen.

Die zentralen Berechnungsmethoden wurden im Rahmen dieser Arbeit strukturiert und in einem einheitlichen Format zusammengefasst. Das einheitliche Format zur Darstellung der Ansätze macht sie vergleichbar und dem Anwender leichter zugänglich. *Grundsätzlich sind die Methoden der Investitionsrechnung für alle Arten von Investitionen anwendbar* [Röh07, S. 3]. Das macht eine eindeutige Empfehlung einer Berechnungsmethode schwierig. Eine Entscheidungsunterstützung liefert die Strukturierung der Berechnungsmethoden nach der Ergebnisgröße und der Art der Methode. Dargestellt ist dies in Bild 5-16.

		Art der Methode	
		Statisch	Dynamisch
Ergebnisgröße	Absolut [€]	<div>(1) Kostenvergleichsrechnung</div> <div>(2) Gewinnvergleichsrechnung</div> <div>(3) Break-Even-Analyse</div>	<div>(6) Kapitalwertmethode</div> <div>(8) Vermögensendwertmethode</div> <div>(7) Annuitätenmethode</div> <div>(9) Methode der vollständigen Finanzpläne</div>
	Relativ [%]	<div>(4) Return on Investment</div>	<div>(10) Interne Zinssatz-Methode</div> <div>(11) Sollzinssatzmethode</div>
	Zeitraum [Jahre]	<div>(5) Statische Amortisationsrechnung</div>	<div>(12) Dynamische Amortisationsrechnung</div>

Bild 5-16: Strukturierung ausgewählter Berechnungsmethoden in Anlehnung an [Göt14] und [Röh07]

Die in der Literatur gängige Unterscheidung nach der Art der Methode differenziert zwischen statischen und dynamischen Methoden. Statische Methoden nehmen an, dass gleiche Beträge, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, den gleichen Wert haben. Sie nutzen somit durchschnittliche Erfolgsgrößen zur Berechnung eines Ergebnisses [BKW16, S. 74]. Dynamische Methoden unterstellen diese Hypothese nicht. Anstatt eines Durchschnittswerts, werden jeder betrachteten Zeitperiode Ein- und Auszahlungen zugeordnet. Somit ist die Beschaffung der Daten deutlich schwieriger und aufwändiger [BKW16, S. 52]. Eine weitere Dimension zur Unterscheidung der Berechnungsmethoden

ist die Ergebnisgröße. Die Methoden lassen sich einteilen je nachdem ob sie einen absoluten Wert, einen relativen Wert oder einen Zeitraum als Ergebnis liefern [Göt14].

Nach der ersten Einschränkung der in Frage kommenden Berechnungsmethoden, dient eine Übersicht über die Berechnungsmethoden mit zentralen Fragestellungen als weitere Auswahlhilfe. Je Methode wurde eine zentrale Fragestellung erarbeitet, welche den Fokus der Methode darstellt. Die Übersicht über die Berechnungsmethoden ist in Tabelle 5-4 dargestellt. Sie basiert auf Vorarbeiten von SCHENTLER ET AL. sowie auf verschiedenen Quellen aus der Investitionsrechnung [Göt14], [GDE+19], [Hee16], [Kru11], [Pog15], [SS16].

Tabelle 5-4: Übersicht über die Berechnungsmethoden mit zentralen Fragestellungen nach [Göt14], [GDE+19], [Hee16], [Kru11], [Pog15] und [SS16]

Nr.	Methodenbezeichnung	Fokus bzw. Leitfrage der Methode	Quelle
1	Kostenvergleichsrechnung	Welche Investition kostet am wenigsten?	[Pog15]
2	Gewinnvergleichsrechnung	Welche Investition erwirtschaftet den höchsten Gewinn?	[Pog15]
3	Break-Even-Analyse	Ab welcher Absatzmenge werden die Kosten durch Umsatzerlöse gedeckt?	[GDE+19]
4	Return on Investment bzw. Rentabilitätsvergleichsrechnung	Wie hoch ist der durch eine Investition verursachte Gewinn im Verhältnis zum investierten Kapital?	[GDE+19]
5	Statische Amortisationsrechnung	Wie lange dauert es das eingesetzte Kapital aus den durchschnittlichen Einzahlungen einer Investition zurückzugewinnen?	[Göt14]
6	Kapitalwertmethode	Was ist die Investition heute Wert bzw. wie hoch ist der auf den Zeitpunkt „Null“ abgezinste Wert der Investition?	[Hee16]
7	Annuitätenmethode	Welche Folge an gleich hohen Zahlungen je Periode erwirtschaftet eine Investition?	[Göt14]
8	Vermögensendwert bzw. Horizontwertmethode	Wie hoch ist der Vermögenszuwachs einer Investition zum Ende des Planungszeitraums?	[Pog15]
9	Methode der vollständigen Finanzpläne	Wie sieht der Verlauf der einer Investition zurechenbaren Zahlungen aus?	[Göt14]
10	Interne Zinssatz-Methode	Welche Verzinsung erwirtschaftet die Investition?	[SS16]
11	Sollzinssatzmethode	Wie hoch ist der kritische Zinssatz, bei dessen Verwendung der Vermögensendwert Null ergibt?	[Göt14]
12	Dynamische Amortisationsrechnung	Wie lange dauert es das eingesetzte Kapital aus den Einzahlungen einer Investition zurückzugewinnen?	[Göt14]

Der Kapitalwert (engl. Net Present Value; Abkürzung NPV) wird beispielsweise eingesetzt, um folgende Frage zu beantworten: „Was ist die Investition heute wert bzw. wie

hoch ist der auf den Zeitpunkt „Null“ abgezinste Wert der Investition?“ [Hee16]. Dementgegen versucht die interne Zinssatz-Methode die Frage nach der Verzinsung der Investition zu beantworten [Göt14].

Die aufgelisteten Methoden werden in einem Steckbrief zusammengefasst. Ein Beispiel ist in Bild 5-17 gezeigt. Der Steckbrief beginnt mit einer prägnanten Beschreibung der Methode sowie den zentralen Annahmen. Weiterhin wird die Berechnungsformel bzw. werden die Berechnungsformeln angegeben und Vor- und Nachteile aufgelistet. Im unteren Teil des Steckbriefs wird ein Beispiel inklusive Interpretation der Ergebnisse aufgezeigt. Die weiteren Steckbriefe sind dem Anhang A3.6 zu entnehmen.

Die Auswahl einer geeigneten Berechnungsmethode stellt eine Herausforderung dar. Dies liegt nicht zuletzt an der großen Anzahl an möglichen Berechnungsmethoden. Gleichzeitig kann die Auswahl der Berechnungsmethode Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Strukturierung und die einheitliche Aufbereitung der Methoden im Rahmen dieser Arbeit unterstützt den Anwender bei der Auswahl einer geeigneten Berechnungsmethode. Sie trägt somit zu einer gesteigerten Transparenz bei der Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion bei.

Berechnungsmethode: Kapitalwertmethode**Beschreibung**

- Ansatz der dynamischen Investitionsrechnung, bei dem alle Ein- und Auszahlungen auf einen Zeitpunkt ab- bzw. aufgezinst werden
- Das Ergebnis, der Nettobarwert, stellt den heutigen Wert der Investition dar
- Eine einzelne Investition ist absolut vorteilhaft, sofern der Kapitalwert größer als Null ist
- Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern der Kapitalwert größer als der der Alternativen ist

Zentrale Annahmen

- Annahmen der dynamischen Investitionsrechnung (d.h. der Wert der Zahlung hängt vom Zahlungszeitpunkt ab)
- Vollständiger Kapitalmarkt

Berechnung

$$KW = -A_0 + \sum_{t=0}^T \frac{(e_t - a_t)}{(1+i)^t} + \frac{L}{(1+i)^T}$$

Legende

KW : Kapitalwert

A_0 : Anschaffungsauszahlung

e_t : Einzahlungen im Zeitpunkt t

a_t : Auszahlungen im Zeitpunkt t

i : Kalkulationszinssatz

t : Zeitindex

T : letzter Zeitpunkt, in dem Zahlungen anfallen

L : Liquidationserlös

Vorteile

- ➔ Berücksichtigung der Zeitpunkte von Ein- und Auszahlungen
- ➔ Ermöglichung der Bestimmung des opt. Einsatzzeitpunktes einer Investition
- ➔ Einfache Anwendbarkeit der Methode

Nachteile

- ➔ Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten
- ➔ Hoher Datenbeschaffungsaufwand

Berechnungsbeispiel**Bestimmung des Kapitalwerts**

Kalkulationszinssatz = 8 %

Daten	Anschaffungsauszahlung	Rückflüsse				
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$
Objekt A	100.000 €	28.000 €	30.000 €	35.000 €	32.000 €	30.000 €

Kapitalwert

$$= -100.000 \text{ €} + 28.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-1} + 30.000 \cdot 1,08^{-2} + 35.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-3} \\ + 32.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-4} + 30.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-5} + 5.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-5} = 26.771,59 \text{ €}$$

Die Investition weist einen positiven Kapitalwert von 26.771,59€ auf und ist somit absolut vorteilhaft.

Quelle: Götze, 2014; HEESSEN, 2016; KRUSCHWITZ, 2011

Bild 5-17: Beispiel eines Steckbriefs einer Berechnungsmethode

5.6 Werkzeugunterstützung

Wie die vorherigen Kapitel gezeigt haben, sind Experten- und Erfahrungswissen bei der Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung unabdinglich. Die aufgezeigten Methoden stellen eine Unterstützung dar, das Wissen und die notwendigen Daten für eine Investitionsbewertung strukturiert zu erfassen. Um den Anwender der Systematik bei der Bewertung zu unterstützen, wurde darüber hinaus eine Werkzeugunterstützung erarbeitet. Diese wird im Folgenden beschrieben. In Kapitel 5.6.1 werden die Struktur der Werkzeugunterstützung und in Kapitel 5.6.2 eine Umsetzung gezeigt.

5.6.1 Struktur der Werkzeugunterstützung

Die Struktur der Werkzeugunterstützung gliedert sich in sieben Tabellen: Annahmen, Ressourcenübersicht, Nutzenerfassung, Kostenerfassung, Nutzenzusammenfassung, Kostenzusammenfassung und Ergebnisübersicht [JLT+19]. Bild 5-18 zeigt die Struktur der Werkzeugunterstützung.

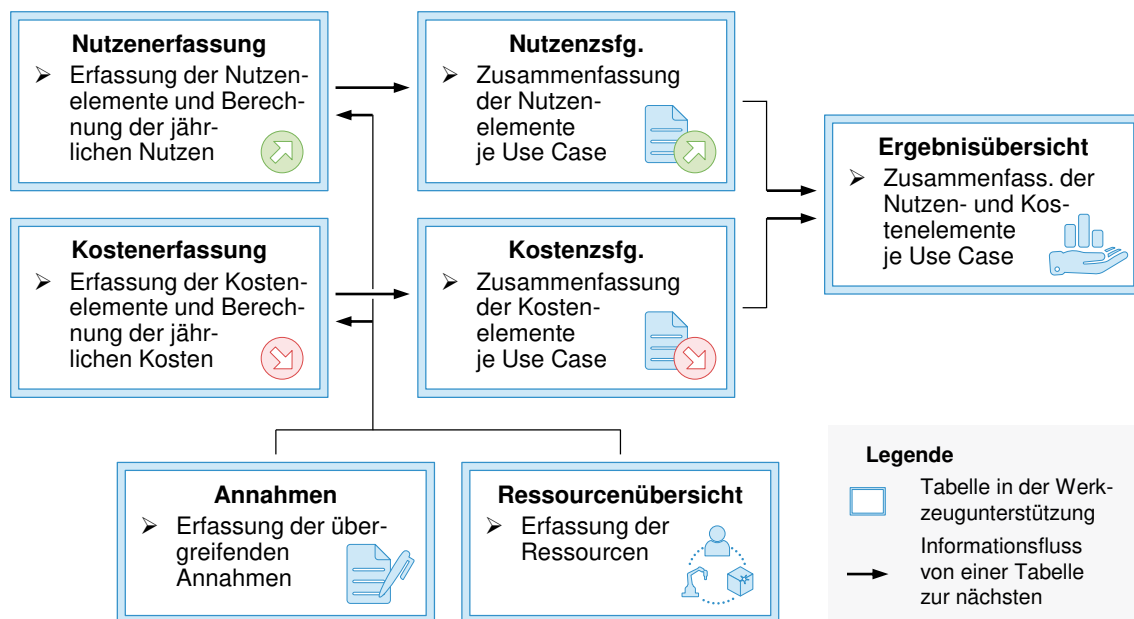


Bild 5-18: Struktur der Werkzeugunterstützung in Anlehnung an [JLT+19, S. 414]

Die Erfassung der Berechnungsgrundlage folgt der Logik der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.4). Dabei wurden die verschiedenen zu berechnenden Business Cases bzw. Investitionsszenarien definiert.

In der Tabelle „Nutzenerfassung“ werden die Nutzelemente entsprechend den Workshopkarten übertragen und weiter verrechnet. Gleiches gilt für die Tabelle „Kostenerfassung“. Die Tabelle „Ressourcenübersicht“ fasst die Berechnungsgrundlage zusammen. Hinzu kommen übergreifende Annahmen in der Tabelle „Annahmen“ [JLT+19]. Die Ergebnisse werden in den Tabellen „Nutzenzusammenfassung“ und „Kostenzusammenfassung“ dargestellt.

fassung“ dargestellt. Zusammengefasst werden die Ergebnisse anschließend in der Tabelle „Ergebnisübersicht“. Diese beinhaltet die Ergebnisverläufe und zentralen Kennzahlen der Berechnung [JLT+19].

5.6.2 Umsetzung

Umgesetzt wurde die Werkzeugunterstützung mit Microsoft Excel 2016. Die Nutzenerfassung enthält vordefinierte Zellen, welche analog zu den Workshopkarten der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.4) aufgebaut sind. Die vordefinierten Zellen, in Bild 5-19 als „Nutzelement 1“, „Nutzelement 2“ etc. bezeichnet, werden untereinander aufgetragen. Darin wird bspw. eingetragen, dass ein Prozess X% weniger Arbeitszeit benötigt. Um diese Prozentangabe monetär bewerten zu können, ist rechts neben den Nutzelementen eine Ressource zuzuordnen und die Bewertungsgrundlage einzutragen. Die Bewertungsgrundlage ergibt sich aus der Ressourcenzuordnung. Bei der Ressourcenzuordnung wird angegeben welcher Typ von Mitarbeiter oder welche weiteren Ressourcen betroffen sind. Im Bereich Bewertungsgrundlage werden anschließend der Anteil betroffener Mitarbeiter sowie der Anteil der betroffenen Arbeitszeit für die Einsparung erfasst [JLT+19].

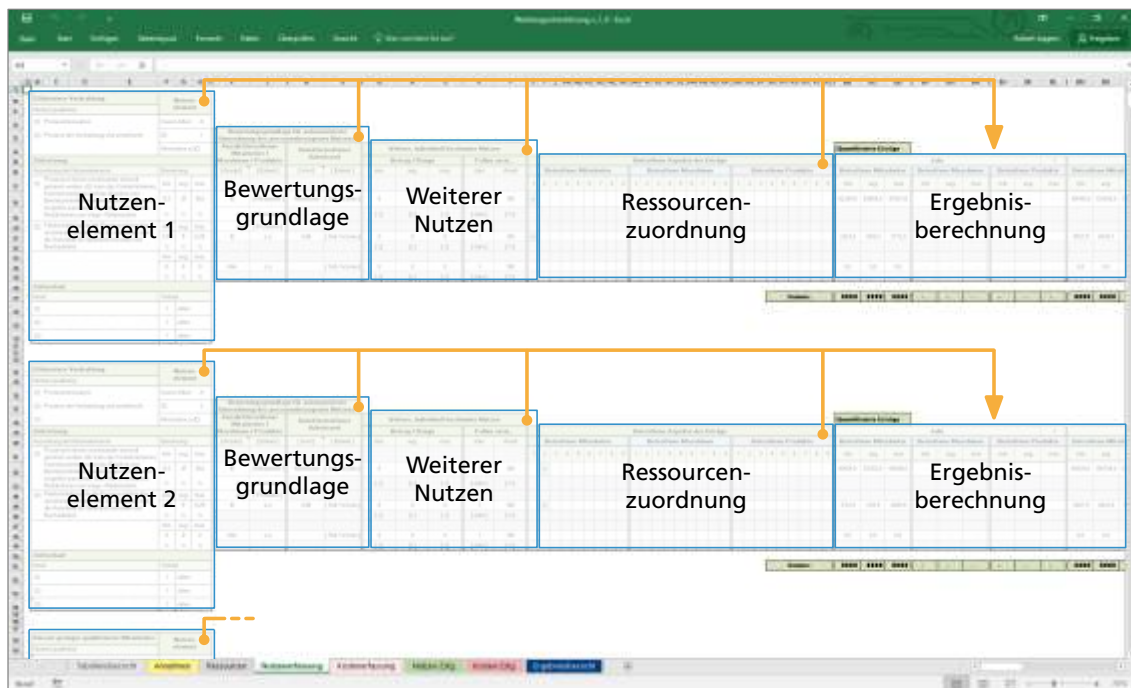


Bild 5-19: Umsetzung der Werkzeugunterstützung am Beispiel der Nutzenerfassung nach [JLT+19, S. 416]

Darüber hinaus ist ein Bereich „Weiterer Nutzen“ vorgesehen. In diesem können Nutzen manuell erfasst werden, welche nicht in das aufgezeigte Erfassungsschema passen. Aus den Eingaben wird eine Ergebnisberechnung für die Investitionsrechnung durchgeführt [JLT+19].

In dem Tabellenblatt „Nutzenerfassung“ wird die Ergebnisberechnung für jedes Nutzelement separat untereinander durchgeführt. Die Ergebnisse werden in der Tabelle „Nutzenzusammenfassung“ zusammengefasst und stellen anschließend einen Teil der „Ergebnisdarstellung“ dar. Die Kostenerfassung ist analog zu der Nutzenerfassung aufgebaut [JLT+19].

Ergebnisdarstellung und -auswertung

Im Rahmen der Ergebnisdarstellung und -auswertung werden die Auswirkungen von Use Cases separat und als Gesamtergebnis betrachtet [JLT+19]. Bild 5-20 zeigt das Prinzip der Ergebnisdarstellung.

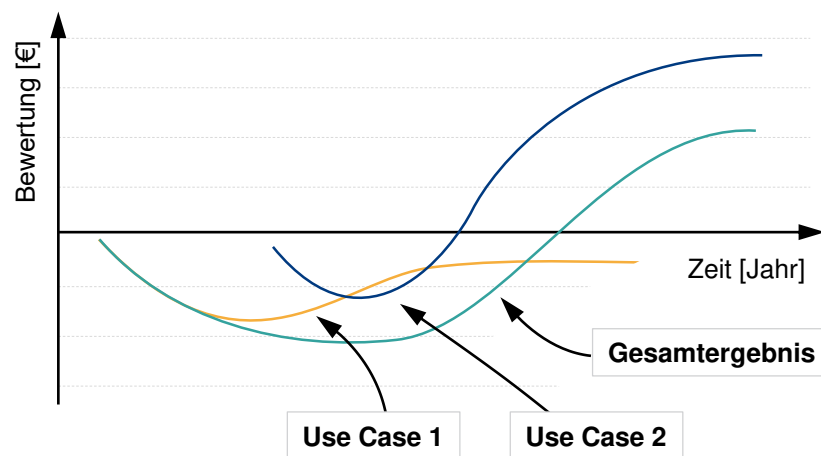


Bild 5-20: Prinzip der Ergebnisdarstellung

Unterschiedliche Umsetzungsreihenfolgen von Use Cases können die Kostenstrukturen und somit auch die Gesamtergebnisse der einzelnen Use Cases beeinflussen. Der Grund ist, dass ein großer Teil der Kosten ausschließlich bei der Umsetzung des ersten Use Cases anfällt. Kommen unterschiedliche Umsetzungsreihenfolgen in Frage, werden diese entsprechend separat berechnet [JLT+19].

6 Anwendung der Systematik

In diesem Kapitel wird die Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion anhand von zwei Validierungsprojekten aus der Praxis aufgezeigt. In Kapitel 6.1 wird das Beispiel einer Bewertung von Tablets in der Produktion eines Schaltanlagenbauers beschrieben. In Kapitel 6.2 wird die Einführung eines Fertigungsleitstands in der Produktion eines Herstellers von Kunststoffgranulaten bewertet. Aus Geheimhaltungsgründen werden die Ergebnisse zum Teil stark vereinfacht dargestellt. Abschließend erfolgt in Kapitel 6.3 eine Bewertung der Arbeit an den Anforderungen.

6.1 Anwendungsbeispiel 1: Bewertung von Tablets in der Produktion

Das erste Anwendungsbeispiel betrachtet einen Schaltanlagenbauer. Dieser sieht sich selber an der Schwelle der Transformation von einem Handwerksbetrieb zu einem Industrieunternehmen. Es gilt die Einführung von Tablets in der Produktion als Verdrahtungsassistentz wirtschaftlich zu bewerten. Die Tablets sollen den Mitarbeitern in der Produktion konkrete Arbeitsanweisungen für das Verdrahten einer Schaltanlage mit einer dreidimensionalen Zeichnung anzeigen. Ohne die Tablets nutzen die Mitarbeiter einen gedruckten Schaltplan, um eine Schaltanlage zu verdrahten.

Das Beispiel der Tablets als Verdrahtungsassistentz ist repräsentativ für eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion. Die vermeintlich kleine Investition, bzw. das vermeintlich kleine Projekt zur Einführung der Tablets, ist bei weitem mehr als nur der Kauf der physischen Objekte der Tablets. Die Einführung adressiert jede der drei Dimensionen von Industrie 4.0: die vertikale Integration, die horizontale Integration und das umfassende Systems Engineering (vgl. Kapitel 3.2.3). Verdeutlichen lässt sich dies an dem Auftragsabwicklungsprozess im Schaltanlagenbau [JEK+19, S. 484], [JK+17, S. 40]. Bild 6-1 zeigt einen abstrahierten Auftragsabwicklungsprozess im Schaltanlagenbau.

Ausgangspunkt ist die Projektierung und Programmierung, gefolgt von der Auftragsabwicklung und Arbeitsvorbereitung, über die Produktion bis hin zur Inbetriebnahme, dem Betrieb und der Wartung [JK+17, S. 40]. Um die Daten im Rahmen des Verdrahtens in der Produktion zu nutzen und sie anschließend auszuwerten, sind die unterschiedlichen Unternehmensbereiche von der Feldebene bis zur Unternehmensleitebene zu vernetzen. Dies stellt die Dimension der vertikalen Integration dar. Hinzu kommt, dass der Prozessschritt Projektierung und Programmierung häufig bei dem Kunden des Schaltanlagenbauers stattfindet. Somit liegen auch die Daten und ggf. das Know-How bei diesem. Es ist eine Vernetzung mit dem Kunden im Sinne der horizontalen Integration notwendig, da die Daten für die Tablets in der Produktion benötigt werden [JK+17, S. 40].

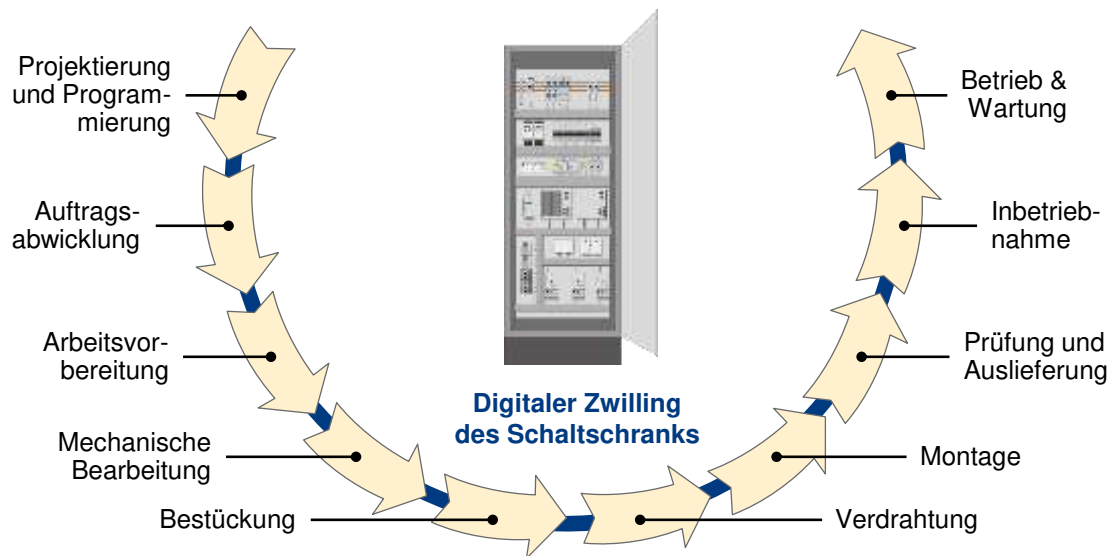


Bild 6-1: Abstrahierter Auftragsabwicklungsprozess im Schaltanlagenbau nach [JEK+19, S. 484] und [JK+17, S. 40]

Schließlich ist das System im Sinne des durchgängigen Engineerings über seinen Lebenszyklus erweiterbar. Sind die Infrastruktur und Datenbasis einmal aufgesetzt, lassen sich weitere Use Cases in den angrenzenden Prozessschritten identifizieren und umsetzen. Grundlage für alle Prozessschritte sind die digitalen Modelle bzw. der digitale Zwilling der Schaltanlage. Diese Investition gilt es nun zu bewerten [JK+17, S. 40].

6.1.1 Phase 1: Systemische Beschreibung des Investitionsobjekts

Zu Beginn des Bewertungsprozesses ist das Bewertungsproblem der Tablets in der Produktion als Verdrahtungsassistenz zu strukturieren. Dazu wird zunächst die technische Lösung in Form von Steckbriefen beschrieben.

Beschreiben der technischen Lösung

Gegenstand der Betrachtung ist eine Verdrahtungsassistenz. Dazu bedarf es einer entsprechenden Software. Diese wird in einem Steckbrief beschrieben. Dargestellt ist der Steckbrief zur Beschreibung der technischen Lösung in Bild 6-2.

Das Ziel der technischen Lösung ist eine Assistenz bei der Verdrahtung von Schaltanlagen. Die geforderten Softwarefunktionalitäten sind eine 3D Darstellung des Aufbaus der Schaltanlage, eine digitale Todo-Liste der anstehenden Verdrahtungsschritte sowie eine Filterfunktion für die zu tätigenden Arbeitsschritte. Gleichmaßen sind die Eingangs- und Ausgangsobjekte sowie die Software- und Hardwareinfrastruktur erfasst.

Dargestellt ist der finale Steckbrief. Insbesondere der untere Teil des Steckbriefs, d.h. die Eingangs- und Ausgangsobjekte sowie die Software- und Hardwareinfrastruktur, wurden auf Basis folgender Arbeiten ergänzt. Sie ergaben sich aus dem Erfassen des Umfelds mit der Datenlandkarte und der Strukturierung der Informationen im Schalenmodell.


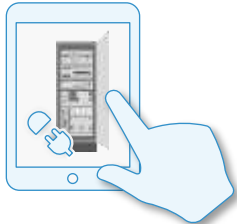





Anwendung: Software für eine Verdrahtungsassistenz		
Bearbeiter: R. Joppen		Stand: 23.03.2017
Ziele: 	<ul style="list-style-type: none">Assistenz bei der Verdrahtung von Schaltanlagen, um den Prozess effizienter zu gestalten	
Software-funktionalitäten: 	<ul style="list-style-type: none">Eine 3D Darstellung zeigt den Aufbau der Schaltanlage und ermöglicht so eine einfache Orientierung beim VerdrahtenEine digitale Todo-Liste zeigt die anstehenden Schritte beim VerdrahtenEine Filterfunktion ermöglicht ähnliche Arbeitsschritte zusammenhängend zu bearbeiten	
Eingangs-objekte: 	<ul style="list-style-type: none">ECAD Daten (Stückliste, Verdrahtungslisten)3D Modell der Schaltanlage	
Ausgangs-objekte: 	<ul style="list-style-type: none">Verdrahtungsassistenz in Form einer digitalen Todo-Liste mit 3D Ansicht	
Software-infrastr.: 	<ul style="list-style-type: none">Software für Verdrahtungsassistenz (EPLAN Smart Wiring)Anbindung an strukturgebende Engineering Software (EPLAN P8)Software für 3D CAD einer Schaltanlage (EPLAN Pro Panel)	
Hardware-infrastr.: 	<ul style="list-style-type: none">Endgeräte in der Produktion (z.B. Tablets)Desktop-PCsServer zur DatenspeicherungWLAN in der Produktionshalle	

Bild 6-2: Beispiel eines Steckbriefs zur Beschreibung der technischen Lösung

Die Umsetzungsreihenfolge der Industrie 4.0 Anwendung beschränkt sich darauf, dass die Teilsysteme ECAD und 3D CAD die Voraussetzung für die digitale Verdrahtungsassistenz sind. Diese ist wiederum Voraussetzung für deren Verknüpfung mit weiteren Systemen, wie bspw. einer Software zur Auswertung der Betriebsdaten.

Erfassen des Umfelds mit der Datenlandkarte

Im zweiten Schritt sind das Umfeld und die Use Cases der möglichen Investition zu identifizieren und zu analysieren. Zum Einsatz kommt eine Datenlandkarte (vgl. Kapitel 5.4.1). Die Datenlandkarte dient zur Abbildung und Analyse von IT-Systemen und Daten entlang der Unternehmensprozesse. Im Anwendungsbeispiel ist der Auftragsabwicklungsprozess zu analysieren. Bild 6-3 zeigt einen Ausschnitt aus der Datenlandkarte

des Anwendungsbeispiels zur Bewertung von Tablets in der Produktion. Es stellt den aktuellen Stand des Unternehmens vor der Einführung der Tablets in der Produktion dar.

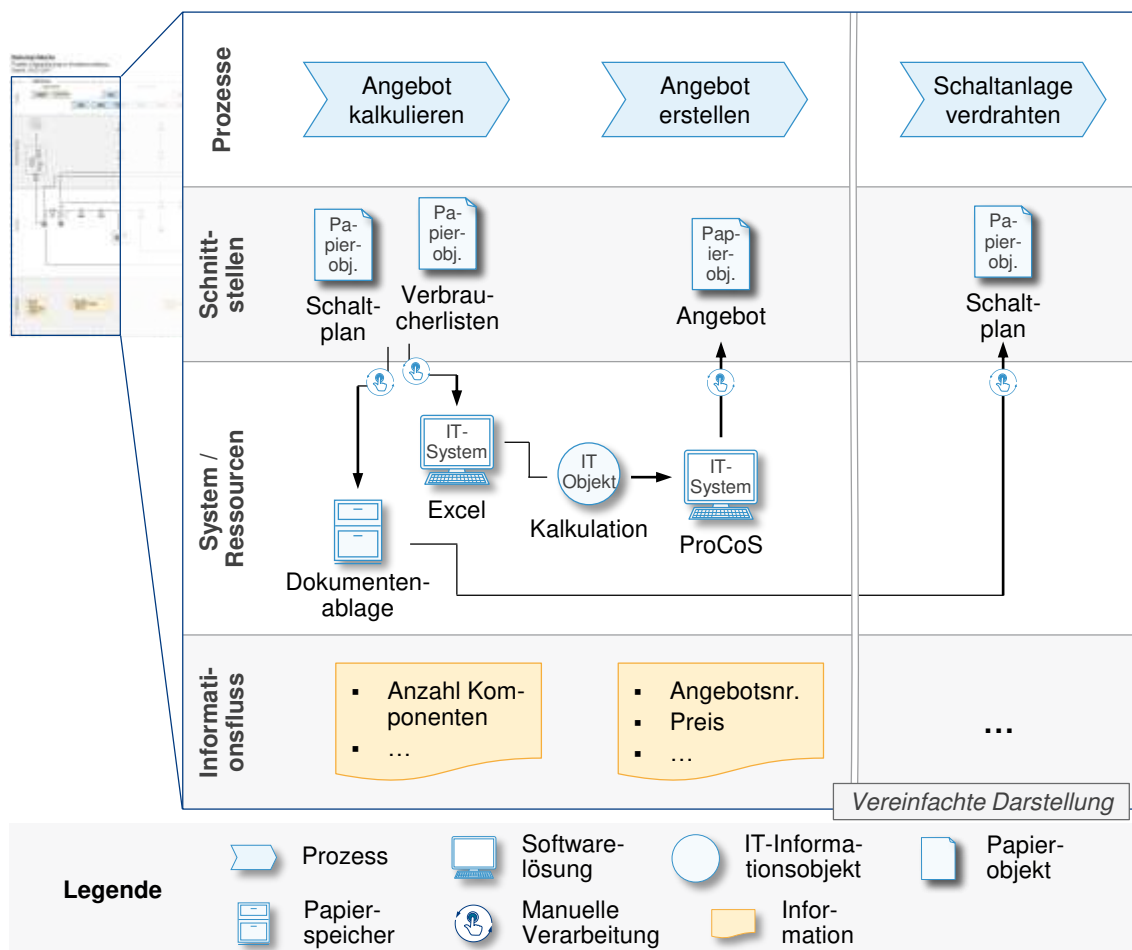


Bild 6-3: Ausschnitt aus der Datenlandkarte des Anwendungsbeispiels zur Bewertung von Tablets in der Produktion

In der obersten Ebene werden die Prozessschritte festgehalten. Dies ist i.d.R. aggregierter als bei einer detaillierten Prozessbeschreibung. Einer der ersten aufgenommenen Prozesse im Anwendungsbeispiel ist die Kalkulation des Angebots. Grundlage dafür sind u.a. die Verbraucherlisten und der Schaltplan. Die Kalkulation wird in der Software Excel manuell durchgeführt und die Unterlagen in einer Dokumentenablage abgelegt. Das anschließende Angebot wird in der Software ProCoS erstellt. Die Daten aus der Kalkulation werden manuell übertragen. Das Resultat ist ein unterschriebenes Papierdokument.

Kommt es nach dem Angebot zu einer Bestellung, wird die Schaltanlage im weiteren Prozess verdrahtet. Sofern der Kunde keine Aktualisierung schickt, wird der Schaltplan aus der Dokumentenablage für das Verdrahten genutzt.

Die Abbildung des Auftragsabwicklungsprozesses mit der Datenlandkarte stellt eine umfassende Bestandsaufnahme dar. Sie beschreibt das Umfeld der Tablets in der Produktion

mit dem Fokus auf die IT und die benötigten Daten entlang des Auftragsabwicklungsprozesses.

Strukturieren der Informationen im Schalenmodell

Im Zuge der Bestandsaufnahme sind zahlreiche mögliche Use Cases identifiziert worden. Diese werden mit ihren Voraussetzungen im Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion erfasst und strukturiert (vgl. Kapitel 5.4.3). Die Summe aller Use Cases mit den jeweiligen Rahmenbedingungen beschreibt die Industrie 4.0 Anwendung. Bild 6-4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Schalenmodell zur Strukturierung der Tablets in der Produktion eines Schaltanlagenbauers.

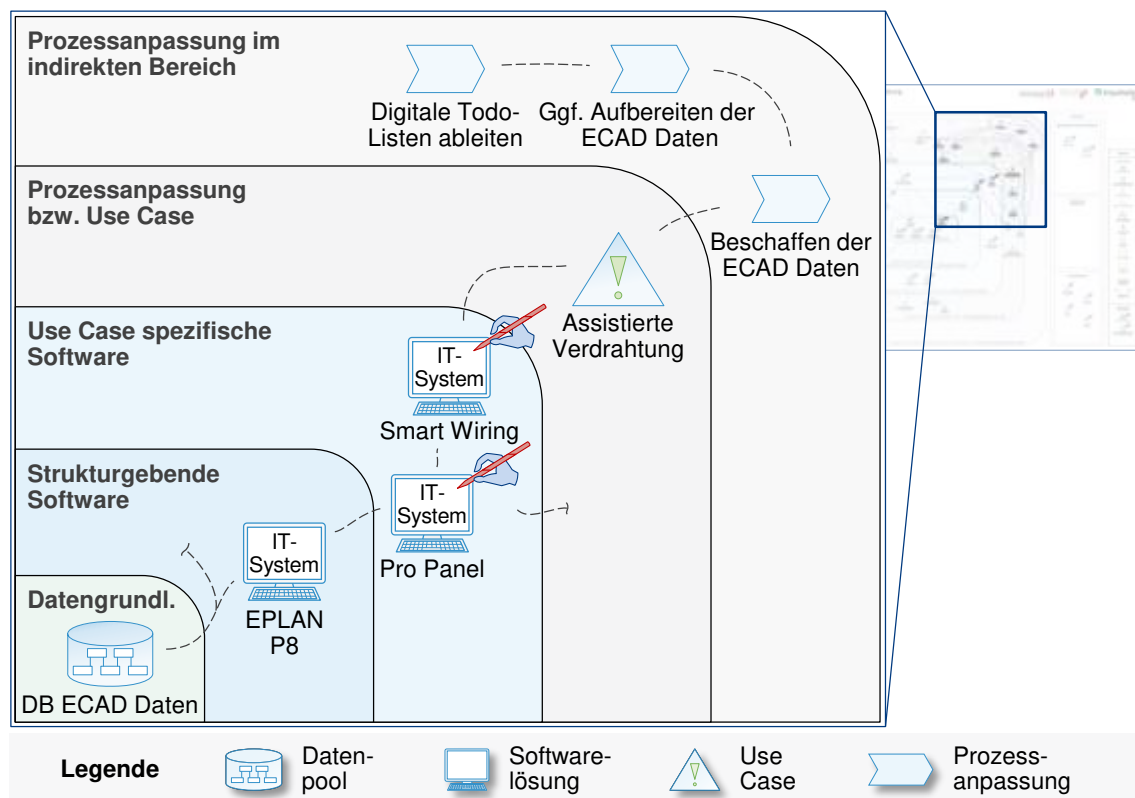


Bild 6-4: Ausschnitt aus dem Schalenmodell zur Strukturierung der Tablets in der Produktion eines Schaltanlagenbauers [JEK+19, S. 487]

Der originäre Use Case der assistierten Verdrahtung durch die Tablets in der Produktion stellt den Ausgangspunkt im Schalenmodell dar. Dies ist die Prozessanpassung im direkten Bereich der Produktion. Um diese umzusetzen werden zwei Use Case spezifische Softwarelösungen benötigt. Das ist zum einen die Software Smart Wiring, welche die Software der Verdrahtungsassistenz darstellt. Zum anderen ist es die Software Pro Panel²², mit welcher eine 3D Ansicht einer Schaltanlage erstellt werden kann. Diese ist

²² Die Use Case spezifische Software kann im Laufe der Zeit zur strukturgebenden Software übergehen, wenn sie anderweitig eingesetzt wird.






für das Routing der Verdrahtungen notwendig. Hinzu kommt die strukturgebende Software. Die Engineering-Software EPLAN P8 dient zur Erstellung der Schaltpläne. Die strukturgebende Software prägt die Prozesse des Engineerings grundlegend [JEK+19, S. 486f.].

Die unterste Ebene ist die Datengrundlage mit den ECAD Daten. Konkret werden der Schaltplan und ein 3D-Aufbau der Schaltanlage benötigt, um mit der Use Case spezifischen Software zu arbeiten und den Use Case umzusetzen. Im Fall des Schaltanlagenbauers ist die Datengrundlage häufig jedoch nicht vorhanden. Der Kunde des Schaltanlagenbauers, d.h. bspw. ein Maschinenbauer, erstellt die ECAD Daten. Diese werden in nicht maschinenlesbaren Dateiformaten weitergegeben. Somit kommen verschiedene Prozessanpassungen im indirekten Bereich hinzu. Die Daten müssen häufig vom Schaltanlagenbauer aktiv beschafft werden. Dafür sind i.d.R. Anreize für den Kunden notwendig. Anschließend müssen diese ggf. aufbereitet und die digitalen Todo-Listen für die Use Case spezifische Software Smart Wiring abgeleitet werden [JEK+19, S. 486f.].

Auswählen eines Vorgehensmodells

Die Beschreibung der Industrie 4.0 Anwendung in ihrem Umfeld mit der anschließenden Strukturierung der Informationen ermöglicht eine Kategorisierung dieser und das Auswählen eines geeigneten Vorgehensmodells. Zum Einsatz kommen die Merkmale von Investitionsobjekten (vgl. Kapitel 5.2.3). Tabelle 6-1 zeigt die Bewertung der Industrie 4.0 Anwendung.

Tabelle 6-1: Bewertung der Industrie 4.0 Anwendung zur Kategorisierung der Investitionsentscheidungen

Merkmal	Ausprägung / Ausprägungswert			
	0	1	2	3
 Technischer Anspruch , d.h. wie schwierig die technische Lösung ist	Wenig anspruchsvoll, domänen-spezifisch	Anspruchsvoll, domänen-spezifisch	Anspruchsvoll, domänen-übergreifend	Hoch anspruchsvoll, domänen-übergreifend
 Erweiterbarkeit , d.h. wie aufwändig es ist Funktionalitäten anzupassen	Nicht ohne substanzielle Aufwände erweiterbar	Erweiterbar über zu def. Schnittstellen	Erweiterbar über vorh. Schnittstellen	Erweiterbar „per Knopfdruck“
 Unternehmensdurchdringung , d.h. wie abteilungsübergreifend die Lösung ist	Nur eine Abteilung	Mehrere Abteilungen	Nahezu alle Abteilungen im Unternehmen	Unternehmensübergreifend
 Höhe der einmaligen Kosten	Kleine Investition	Durchschnittliche Investition	Strategische Investition	Substanzielle Investition
 Höhe der laufenden Kosten	Geringe Kosten	Mittlere Kosten	Hohe Kosten	Sehr hohe Kosten

Die technische Lösung an sich ist anspruchsvoll und domänenübergreifend. Da sie als Standardsoftware gekauft werden kann, ist sie für einen Schaltanlagenbauer nicht ohne substanzielle Aufwände erweiterbar. Für einen durchgängigen Einsatz der Anwendung

sind die Kunden mit einzubeziehen, was mit einer hohen Unternehmensdurchdringung einhergeht. Im Sinne der einmaligen Kosten gilt die Investition in Tablets in der Produktion mit u.a. den einhergehenden Software Systemen als durchschnittliche Investition. Da Prozesse u.a. in der Projektierung angepasst werden müssen, fallen für den Schaltanlagenbauer jedoch sehr hohe laufende Kosten an.

Das arithmetische Mittel der Merkmalsausprägungen ergibt 1,8. Für den Schaltanlagenbauer ist es somit eine unüberschaubare Investition. Zentral dabei sind die sehr hohe Unternehmensdurchdringung sowie die sehr hohen laufenden Kosten. Zur Bewertung der Tablets in der Produktion gilt es das vollständige Vorgehensmodell der Systematik zu durchlaufen (vgl. Kapitel 5.3). Das strukturierte Bewertungsproblem stellt das zentrale Resultat dieser Phase dar.

6.1.2 Phase 2: Transparente Bewertung des Investitionsobjekts

Nachdem das Bewertungsproblem strukturiert ist, folgt die Aufnahme der Bewertungsgrundlage. Es gilt sowohl den Nutzen als auch die Kosten quantitativ zu erfassen.

Erfassen des qualitativen Nutzens

Zunächst wird der Nutzen der Tablets in der Produktion qualitativ erfasst. Zum Einsatz kommt ein Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.1). Umgesetzt wird dies für jeden zu bewertenden Use Case der Industrie 4.0 Anwendung. Werden bspw. die drei Use Cases assistierte Verdrahtung, 2-Schicht-Betrieb und Auftragsverfolgung evaluiert, wird das Schema für jeden dieser Use Cases ausgefüllt. Bild 6-5 zeigt das ausgefüllte Schema für den Use Case der assistierten Verdrahtung durch die Tablets in der Produktion eines Schaltanlagenbauers.

In der Kategorie Leistung/ Qualität wurde das Potential der Prozessinnovation erfasst. Die Prozessinnovation kann sich unterschiedlich äußern. Bspw. kann die Konfektionierung losgelöst von dem Verdrahtungsprozess durchgeführt werden. Gleiches gilt für die Kommissionierung und das Drucken von Betriebsmittelkennzeichnungen.

Die Ursache für die Prozessinnovation ist, dass die Mitarbeiter ohne die Tablets den Schaltplan für jeden Arbeitsschritt lesen, für ausgewählte Kabel die Kabelwege festlegen, die notwendigen Kabel konfektionieren, verdrahten und anschließend markieren müssen. Auf Grund einer fehlenden Übersicht über das gesamte Schaltbuch machen die Mitarbeiter dies immer für wenige Kabel. Die Arbeitsschritte finden i.d.R. an unterschiedlichen Orten in der Produktion statt, was zu erheblichen Laufwegen führt. Mit Hilfe der Verdrahtungsassistenz auf den Tablets können die Mitarbeiter die einzelnen Schritte, wie das Konfektionieren für eine deutlich größere Anzahl an Kabeln durchführen, da sie sich ähnliche Kabel über einen Filter in der Software anzeigen lassen können. So sparen sich die Mitarbeiter erhebliche Laufwege zwischen den Arbeitsgängen. Nach dieser Logik wurden verschiedene Potentiale in sieben der Kategorien gefunden und konkretisiert.










Potentiale und Nutzelemente					
I4.0 Anwendung: Tablets in der Produktion		Use Case: Assistierte Verdrahtung		Stand: 17.05.2017	
 Leistung / Qualität		 DLZ / Termintreue		 Personalk. / Arbeitszeiten	
<div>Losgelöste Vor-konfektionierung</div> <div>... Vorkommis-sionierung</div> <div>Wegfall von redundanten Arbeits-abläufen</div> <div>Prozess-inno-vation</div> <div>... BMK drucken</div>		<div>Ermögl. von Zu-sammenarbeit</div> <div>Reduktion von Vertrags-straßen</div> <div>Parallelisie-rung und Be-schleunigung von Prozessen</div> <div>Höhere Preise für schnellere Lieferung (?)</div>		<div>Einsatz geringer quali. Mitarbeiter</div> <div>Gering. Lohn-kostenanteil</div> <div>Prozess-Trans-parenz</div> <div>Weniger Hin- und Herlaufen</div> <div>Monetäre Einspa-rung von Arbeitszeit</div>	
 Transparenz		 Lager / Bestand		 Anlagen- / Kapitalkosten	
<div>Prozess-Trans-parenz</div> <div>Fehler-reduktion</div> <div>Weniger Nacharbeit</div>		<div>Geringere Durchlauf-zeit</div> <div>Geringer Lager-bestand</div> <div>Geringere Bestands-kosten</div>		<div>Ermöglichung von Zusammenarbeit</div> <div>Höhere Maschinen-auslastung</div> <div>Parallelisierung und Beschleunigung von Prozessen</div>	
 Energie- / Ress.-verbrauch		 Arbeitsquali. / Ergonomie		 Sonstiges	
<div>-</div> <div>Monetäre Bewertung</div>		<div>Weniger Suchen nach zu tätigen Arbeitsschritten</div> <div>Wegfall von redundanten Arbeits-abläufen</div>		<div>-</div> <div>Monetäre Bewertung</div>	
Legende BMK: Betriebsmittelkennzeichnung DLZ: Durchlaufzeit Personalk.: Personalkosten Quali.:Qualität Ress.: Ressourcen <div></div> : Qualitatives Potential <div></div> : Quantifizierbares Potential					

Bild 6-5: Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion in Anlehnung an [JTK18]

Recherchieren von Kosten mit einem Kostenkatalog

Anschließend werden Kosten recherchiert. Dieser Schritt ist unterstützend für den folgenden Schritt. Es wird der Kostenkatalog für Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.3) durchgegangen und geprüft, welche Kostenelemente zutreffen. So entstehen bei dem Anwendungsbeispiel zur Einführung von Tablets in der Produktion zunächst Kosten für die Prozessaufnahme und -analyse, gefolgt von einer Bestandsaufnahme der Infrastruktur und einer Potentialidentifikation. Dargestellt ist ein Ausschnitt aus dem eingesetzten Kostenkatalog in Tabelle 6-2.

Tabelle 6-2: Ausschnitt aus dem eingesetzten Kostenkatalog zur Identifikation möglicher Kosten der Investition

Lebenszyklus	Kostenart	Kostenelement	Nr.	Beschreibung	Quellen
Produktionssystemplanung	Bestandsaufnahme	Bedarfs-ermittlung	1	Ermitteln, Erfassen und Aufbereiten von Veränderungsbedarfen	[VDI2884]
		Prozessauf-nahme und -analyse	2	Erfassen und Analysieren von Ist-Prozessen	[GP14]
		Bestands-aufnahme der Infrastruktur	3	Aufnehmen der technischen Infrastruktur, IT-Systemlandschaft, vorhandenen Schnittstellen und Daten	[JEK+18], [KJR+18]
		Potential-identifikation	4	Ermitteln, Erfassen und Aufbereiten von Verbesserungsmöglichkeiten	[GP14]
Entwicklung	Software	Software-beschaffung	16	Anschaffen relevanter Software	[MBS+19], [VDI2884]
		Software Customizing	17	Anpassen der einzusetzenden Softwarelösung an die Ansprüche des betrachteten Unternehmens	[MBS+19], [AAA+09]
		Schaffen von Datenbanken	18	Erstellen und Installieren von Datenbanken	[JEK+18], [KJR+18]
		Anbinden an Systeme und Datenbanken	19	Schaffen von Schnittstellen zu gegebenen Datenbanken zum Austauschen und zur Konvertierung von Daten	[JEK+18], [KJR+18]
		Cloud-Bereitstellung und Anbindung	20	Einrichten der Infrastruktur zur Bereitstellung von Software-Applikationen	[NP18], [Urb19-ol]
		Personal-beschaffung	21	Beschaffen von notwendigem zusätzlichem Personal (z.B. auf Internetplattformen)	[VDI2884]
		Interne Mitarbeiter für die Entwicklung	22	Löhne, Gehälter und Sozialversicherungsbeiträge	[VDI2884]
		Externe Mitarbeiter für die	23	Externe unterstützende Unternehmen	[VDI2884]

Legende : ist für den Anwendungsfall relevant

Erfassen der Bewertungsgrundlage

Nachdem der qualitative Nutzen identifiziert und die Kosten recherchiert wurden, wird die quantitative Datengrundlage für die Investitionsbewertung erfasst. Dies geschieht mit der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.4). Zur Strukturierung der zu berechnenden Business Case Szenarien und der damit einhergehenden, benötigten Daten unterstützt das Sichten-Modell einer Investitionsbewertung (vgl. Kapitel 5.2.1). Im Anwendungsbeispiel wird von Outputmaximierung mit einem vollständigen Absatz der zusätzlichen, produzierten Menge ausgegangen. Das bedeutet, dass Erfolgs- und Liquiditätsebene im Modell identisch sind. Die Anwendung der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion ist in Bild 6-6 dargestellt.

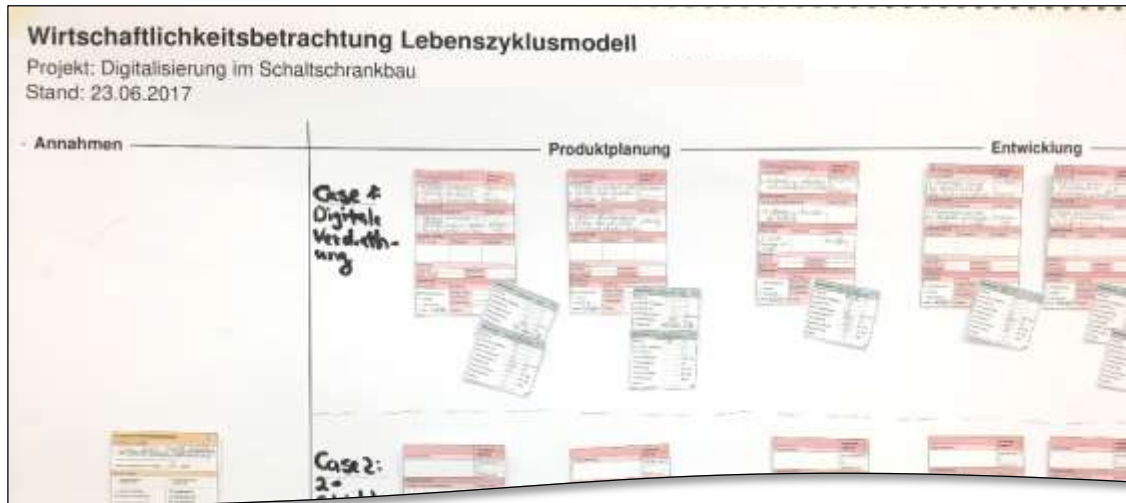


Bild 6-6: Ausschnitt aus der angewendeten Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion


Grundlage der Workshop-Methode ist ein Lebenszyklusmodell von der Produkt- bzw. Produktionssystemplanung bis hin zum Abstieg. Die Phasen werden von links nach rechts aufgetragen. Ergänzt wird ein Bereich für Annahmen. Entlang der Lebenszyklusphasen werden die Nutzen- und Kostenelemente festgehalten. Die verschiedenen Use Cases werden untereinander erfasst. Für die Tablets in der Produktion sind die zwei Use Cases assistierte Verdrahtung und 2-Schicht-Betrieb aufgezeigt.


Beispiel eines Nutzelements im Rahmen der Datenaufnahme

Im Rahmen des Use Cases assistierte Verdrahtung wurden u.a. die Potentiale „Prozessinnovation“, „Ermöglichung von Zusammenarbeit“, „Einsatz geringer qualifizierter Mitarbeiter“, „Prozesstransparenz“ und „Geringere Durchlaufzeit“ beschrieben. Diese leiten sich aus dem zuvor aufgezeigten Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion ab. Das Nutzelement Prozessinnovation ist, gemeinsam mit den zwei Ressourcenelementen auf die es sich bezieht, in Bild 6-7 dargestellt.

Wie zuvor beschrieben lässt sich das Nutzelement Prozessinnovation in „losgelöste Vorkonfektionierung“, „losgelöste Vorkommissionierung“ und „losgelöstes Betriebsmittelkennzeichnungen drucken“ untergliedern und konkretisieren. Die losgelöste Vorkonfektionierung führt zu einer Einsparung von redundanten Arbeitsabläufen.

Bewertet werden die Auswirkungen der losgelösten Vorkonfektionierung, des losgelösten Vorkommissionierens und des losgelösten Druckens der Betriebsmittelkennzeichnungen in Summe mit ca. 25%. Die Annahme stammt aus einer Evaluation mit einer Zeitaufnahme. Dabei waren die drei Effekte nicht sinnvoll trennbar. Die Einarbeitung und Umstellung der Prozesse, um diese Produktivitätssteigerung zu erreichen, dauert ca. ein Jahr. Begonnen wird ca. ein halbes Jahr nach Start des Projektes zur Bewertung der Tablets in der Produktion.

Prozessinnovation		Nutzen- element 
Nutzen (qualitativ)		
(1) Losgelöste Vorkonfektionierung, losgelöste Vorkommissionierung und losgelöstes Betriebsmittelkennzeichnungen drucken		Invest.-Alt.: A ID: 11 Alt. zu ID: –
Zielsetzung		
Auswirkungen des Nutzelements		Bewertung
(1) Prozesse können voneinander sinnvoll getrennt werden, z.B. kann das Konfektionieren, Kommissionieren und das Drucken von Betriebsmittelkennzeichnungen im Vorhinein losgelöst passieren. Das führt zu deutlichen Reduktionen von Wege- / Nebenzeiten		(1) ca. 25%
Zeitverlauf		
Initial	Verlauf	
(1) Einarbeiten bis die vollständige Effizienzsteigerung erreicht wird	Dauer: 1 J Start: 0,5	

Mitarbertyp: Leiharbeiter Fertigung 

Abteilung: _____

Anzahl MA in Abteilung: 35 [-]

Anzahl MA-Typ: 5 [-]

Plan-Arbeitsstunden: _____ [Std / Wo]

Arbeitsauslastung: 100 [%]


Vollkostensatz Std: 30 [€ / Std]

Vollkostensatz Überstd.: _____ [€ / Std]

Aktuelle Überstd.: _____ [Std]

Mehrmaschinenbedien. Ja [] Nein ☒

Weiteres: _____

Mitarbertyp: Mitarbeiter Fertigung 

Abteilung: _____

Anzahl MA in Abteilung: _____

Anzahl MA-Typ: _____

Fertigung 35 [-]

5 [-]

38 [Std / Wo]

100 [%]

37 [€ / Std]

47 [€ / Std]

- [€ / Std]

- [Std]


n. Ja [] Nein ☒


Bild 6-7: Beispiel eines Nutzelements mit betroffenen Ressourcenelementen

Um die Produktivitätssteigerung bewertbar zu machen, wird eine Bewertungsgrundlage ergänzt. Die Ressourcenkarten „Mitarbeiter Fertigung“ und „Leiharbeiter Fertigung“ verweisen darauf, dass die festangestellten Mitarbeiter und die Leiharbeiter in der Fertigung betroffen sind. Neben der Anzahl an betroffenen Mitarbeitern wird der Stundensatz ergänzt. So kann der wirtschaftliche Nutzen bestimmt werden.

Beispiel eines Kostenelements im Rahmen der Datenaufnahme

Weiterhin wurden vierzehn Kostenelemente für die Umsetzung des Use Cases assistierte Verdrahtung erfasst. Diese reichten von einer „Prozessplanung“ über eine „Datenanalyse“, „Datenaufbereitung“ und „Schulung – Mitarbeiter Projektierung“ bis hin zu „Hardware erneuern“ am Ende des Lebenszyklus der Investition. Das Kostenelement „Schulung – Mitarbeiter Projektierung“ ist in Bild 6-8 dargestellt.

Schulung – Mitarbeiter Projektierung		Kosten- element 
Kosten (qualitativ)		
(1) Kosten des Softwareanbieters (2) Kosten durch Bindung eigener Mitarbeiter aus der Projektierung		Invest.-Alt.: A ID: _____ Alt. zu ID: –
Einmalige Kosten		
Auswirkungen des Kostenelements		Bewertung
(1) Kosten für die Inhouse Schulung (2) Mitarbeiter können in der Zeit nicht im Projektgeschäft arbeiten		800€ p.P. 3 Tage
Laufende Kosten		
Betrag/ Range	Startzeitpunkt	Periodenlänge
(1) & (2) 80 bis 90% Arbeitsleistung im ersten Jahr		
Entwicklung		
Verlauf [%]		Startzeitpunkt
Betrag/ Range		Periodenlänge
Auszahlungen		
Bezahlmodell	Erläuterung	
<input checked="" type="checkbox"/> Direktbezahl.	Betrag/ Range	
<input type="checkbox"/> Leasing	Startzeitpunkt	
<input type="checkbox"/> Pay-per-Use	Periodenlänge	
Weitere _____	Weiteres	

Mitarbeitertyp: Projektierung 

Abteilung: _____

Anzahl MA in Abteilung: 8 Projektierung [-]

Anzahl MA-Typ: 6 [-]

Plan-Arbeitsstunden: 38 [Std / Wo]

Arbeitsauslastung: 100 [%]

Vollkostensatz Jahr: 50 [€ / Jahr]

Vollkostensatz Std: 65 [€ / Std]

Kostensatz Überstd.: - [€ / Std]

Aktuelle Überstd.: - [Std]

Mehrmaschinenbedien. Ja ☐ Nein ☒

Weiteres: _____

Bild 6-8: Beispiel eines Kostenelements mit betroffenen Ressourcenelementen

Die Kosten für die Schulung der Mitarbeiter aus der Projektierung lassen sich in die Kosten des Softwareanbieters und die entstehenden Kosten durch die Bindung der eigenen

Mitarbeiter untergliedern. Die Kosten durch den Softwareanbieter sind direkt quantifizierbar und werden mit 800€ pro Personentag angegeben. Die Kosten durch die Bindung der Mitarbeiter sind über die Anzahl der Tage und der Mitarbeiterstundensätze zu bestimmen. Somit ist eine Ressourcenkarte für die Mitarbeiter der Projektierung anzuhängen. Diese beinhaltet u.a. die Anzahl der Mitarbeiter und die Stundensätze.

Weiterhin werden Effizienzeinbußen bei den Mitarbeitern der Projektierung auf Grund der Neuheit der Software erwartet. Es wird geschätzt, dass die Mitarbeiter im ersten Jahr ca. 80% bis 90% ihrer Arbeitsleistung erreichen. Nach dieser Vorgehensweise werden alle Kosten und Nutzen der Investition im Workshop gemeinsam antizipiert und erfasst.

Mit Hilfe der quantitativen Bewertungsgrundlage kann anschließend die Bewertung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden. Dafür sind eine Berechnungsmethode auszuwählen, die Bewertungsgrundlage in die Werkzeugunterstützung zu übertragen und anschließend der Nutzen und die Kosten zu berechnen.

Auswählen einer Berechnungsmethode

Die Auswahl einer geeigneten Berechnungsmethode geschieht mit Hilfe der Übersicht über die Berechnungsmethoden (vgl. Kapitel 5.5.5). Je Berechnungsmethode ist eine Fragestellung gelistet, welche den Fokus der Methode widerspiegelt. Im Rahmen einer Investitionsbewertung können mehrere Methoden gleichzeitig angewendet werden. So wurde im Rahmen der Bewertung der Tablets in der Produktion die Frage nach dem heutigen Wert der Investition und der Verzinsung der Investition gestellt. Daraus folgend wurden der Kapitalwert und der interne Zinsfuß bestimmt.

Übertragen der Bewertungsgrundlage in die Werkzeugunterstützung und Berechnen des Nutzens und der Kosten

Im nächsten Schritt werden die erfasste Berechnungsgrundlage in die Werkzeugunterstützung übertragen und die einzusetzende Berechnungsmethode ausgewählt. Bild 6-9 zeigt einen Ausschnitt aus der Nutzenberechnung in der Werkzeugunterstützung. Zur Berechnung des Nutzens werden die Nutzenelemente in die Werkzeugunterstützung einzeln eingegeben. Der Aufbau der Nutzenelemente in der Werkzeugunterstützung ist analog zu dem Aufbau der Workshopkarten der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.4).

Prozessinnovation		Nutzen- element	Invest.-Alt.: ID:		Bewertung		Anzahl betroffener Mitarbeiter / Betriebsmittel / Produkte		Anteil betroffener Arbeitszeit		Betroffene Ressourcen						Quantifizierte Erträge		
Nutzen (qualitativ)			Alt. zu ID:				[Anzahl]	[Einheit]	[Wert]	[Einheit]	Betroffene Mitarbeiter						Jahr 1	avg.	max.
(1) Effizientere Verdrahtung											1	2	3	4	5	6	min.		
Zielsetzung							5	[Mitarbeiter]	19	[Std/Woche]	x						21.767€	28.022€	36.278€
Auswirkungen des Nutzelements							bzw.	[Betriebs- mittel]											
(1) Prozesse können voneinander sinnvoll getrennt werden, z.B. kann das Konfek- tionieren, Kommissionieren und das Drucken von Betriebsmittelkennzeich- nungen im Vorhinein losgelöst passieren. Das führt zu einer deutlichen Reduktionen von Wege- / Nebenzelten					(1) ca. 25%		bzw.	[Produkte]									- €	- €	- €
							Alle	[s.o.]		[Std/Woche]							- €	- €	- €
Zeitverlauf							Alle	[s.o.]		[Std/Woche]							- €	- €	- €
Initial																			
(1) Einarbeiten bis die vollständige Effizienzsteige- rung erreicht wird																	21.767€	28.022€	36.278€
Verlauf																			
1 Jahr																			

Bild 6-9: Ausschnitt aus der Nutzenberechnung in der Werkzeugunterstützung

Das beispielhafte Nutzelement Prozessinnovation ist mit dem qualitativen Nutzen effizientere Verdrahtung näher beschrieben. Die Auswirkungen der effizienteren Verdrahtung sind mit einer 25%-igen Arbeitszeiterparnis bei dem Prozessschritt des Verdrahtens eingetragen. Der Prozessschritt Verdrahten beansprucht ca. 50% der Arbeitszeit. Bei einer 38 Stunden-Woche entspricht das 19 Stunden pro Woche. Weiterhin ist festgehalten, dass in Summe ausschließlich zehn Mitarbeiter betroffen sind. Fünf festangestellte und fünf Leiharbeiter der Fertigung sollen zunächst mit der Verdrahtungsassistenz arbeiten. Die festangestellten Mitarbeiter in der Produktion sind in der Werkzeugunterstützung als Mitarbeiterklasse 1 angelegt und die Leiharbeiter sind als Mitarbeiterklasse 2 angelegt. Für jede betroffene Mitarbeiterklasse, auf die ein Nutzen- oder Kostenelement zutrifft, wird in der Werkzeugunterstützung ein separates Nutzen- bzw. Kostenelement angelegt.

Mit Hilfe der Nutzelemente und der Berechnungsgrundlage ergeben sich Nutzen über die Jahre. Die Berechnung erstreckt sich über zehn Jahre, da die Use Cases zeitversetzt umgesetzt werden.

Ergebnisdarstellung und -auswertung

In der Ergebnisdarstellung und -auswertung werden die Auswirkungen von Use Cases separat und als Gesamtergebnis betrachtet. Je Use Case werden der Average Case (d.h. das durchschnittlich zu erwartende Ergebnis) sowie der Worst und der Best Case dargestellt. Für das Anwendungsbeispiel werden in Bild 6-10 die Ergebnisse der drei oben genannten Use Cases dargestellt. Die Berechnungsergebnisse sind das zentrale Resultat der zweiten Phase.

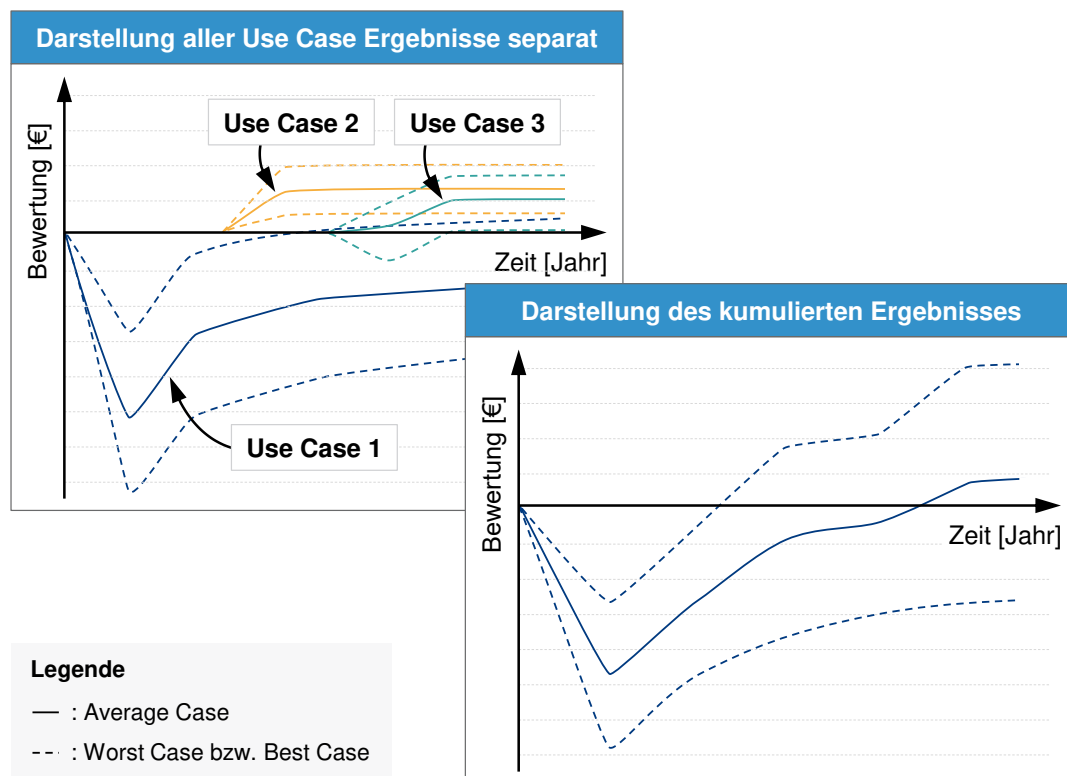


Bild 6-10: Ausschnitt aus der Ergebnisdarstellung in der Werkzeugunterstützung

6.1.3 Phase 3: Ableitung von Handlungsempfehlungen

In der letzten Phase werden die Handlungsempfehlungen abgeleitet und die Ergebnisse in einer zweiseitigen Management Summary zusammengefasst. Die Management Summary stellt die relevanten Informationen für die Investitionsentscheidung in Tablets in der Produktion zusammen. Seite eins der Management Summary des beschriebenen Anwendungsbeispiels ist in Bild 6-11 dargestellt. Die zweite Seite der Management Summary beinhaltet eine Umsetzungsroadmap. Sie ist in Bild 6-12 dargestellt.

Als Handlungsempfehlung gilt es die Investition weiter zu forcieren, da sie u.a. ein sehr großes Effizienzsteigerungspotential in der Produktion verspricht. Auf Grund der Abhängigkeit von der Bereitstellung der digitalen Modelle von den Kunden, ist sie zum heutigen Zeitpunkt nur für einen geringen Anteil der Aufträge wirtschaftlich umsetzbar. Die digitalen Modelle werden benötigt, damit die Industrie 4.0 Anwendung technisch funktioniert. Diese werden heute jedoch i.d.R. nicht oder nur in unzureichender Qualität von den Kunden zur Verfügung gestellt. Es wird angenommen, dass die Bereitstellung der Modelle in Zukunft besser und somit auch die Investition deutlich vorteilhafter wird.

Die Tablets dienen zunächst als digitale Verdrahtungsassistenz. Die Use Cases werden sukzessive erweitert. Zentrale Zielsetzung ist die Schaffung von Transparenz in der Auftragsbearbeitung, woraus u.a. die Möglichkeit zur Zusammenarbeit von mehreren Mitarbeitern an Aufträgen entsteht. Zentrale Annahmen dabei sind, dass die Kunden die digitalen Modelle (d.h. die ECAD Daten) gegen einen (ggf. auch monetären) Anreiz bereitstellen und dass zusätzlich produzierte Produkte vollständig abgesetzt werden können. Weiterhin wird angenommen, dass der Anteil der von den Komponentenherstellern bereitgestellten digitalen Modelle kontinuierlich steigt. Daraus ergeben sich zwei zentrale Kosten zur Umsetzung. Zum einen ist dies die einmalige Strukturierung von Produkten und Aufträgen zur gezielten Beschaffung der digitalen Modelle. Zum anderen ist dies die kontinuierliche Beschaffung der digitalen Modelle zur Nutzung der Verdrahtungsassistenz.

Die zentralen Chancen der Investition sind ein standardisiertes und wesentlich beschleunigtes Verdrahten, ein flexiblerer Mitarbeiterinsatz und eine erhöhte Transparenz im Auftragsabwicklungsprozess. Als zentrale Risiken gelten die Abhängigkeit von der Bereitstellung der digitalen Modelle durch den Kunden und die ggf. aufwändigen, nicht vergüteten Vorarbeiten zur Aufbereitung der digitalen Modelle. Für die Aufbereitung der Modelle werden Mitarbeiter in der Projektierung benötigt. Somit verschieben sich die Aufwände von der Produktion in die vorgelagerten Prozesse. Drei Einflussfaktoren gelten als zentral für ein Umsetzungscontrolling. Das sind der prozentuale Anteil von digital assistiert verdrahteten Aufträgen, der prozentuale Anteil an Aufträgen welche eigenständig projiziert werden und der Aufwand zur Aufbereitung von digitalen Modellen.

Investitionsübersicht: Tablets in der Produktion (1/2)

Ansprechpartner: Robert Joppen

Stand: 12.11.2017

Handlungsempfehlung: Die Investition verspricht u.a. ein sehr großes Effizienzsteigerungspotential in der Produktion und ist somit weiter zu forcieren. Auf Grund der Abhängigkeit von der Bereitstellung der digitalen Modelle von den Kunden ist sie zum heutigen Zeitpunkt nur für einen geringen Anteil der Aufträge wirtschaftlich umsetzbar. Es wird angenommen, dass die Bereitstellung der Modelle in Zukunft besser und somit auch die Investition deutlich vorteilhafter wird.

Beschreibung

- Einsatz von Tablets in der Fertigung für eine digitale Verdrahtungsassistenz
- Sukzessive Erweiterung der Use Cases und Funktionalitäten des Tablets

Zielsetzung und Nutzen

- Beschleunigen des Verdrahtens
- Schafft Transparenz in der Auftragsbearbeitung und ermöglicht ein Controlling
- Ermögl. eine gemeinsame Auftragsbearbeitung und flexibleren Mitarbeitereinsatz

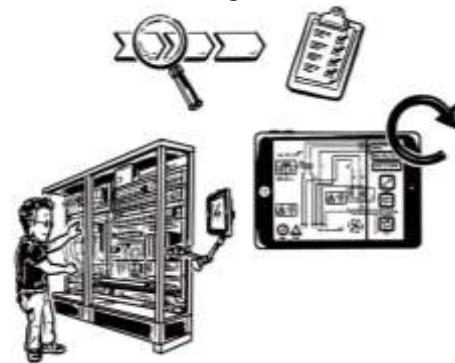
Zentrale Annahmen

- Kunden stellen heute keine nutzbaren digitalen Modelle bereit, tun dies jedoch gegen einen (ggf. monetären) Anreiz
- Zusätzlich produzierte Produkte können vollständig abgesetzt werden

Kosten zur Umsetzung

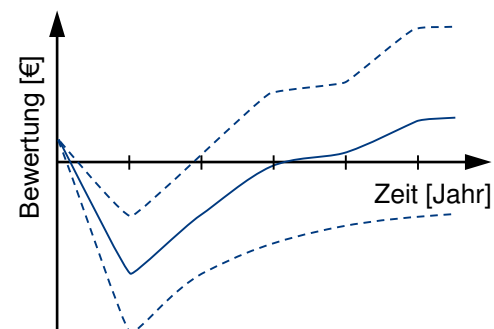
- Einmalige Strukturierung der Prozesse
- Kontinuierliche Beschaffung und Aufbereitung der digitalen Modelle

Grafische Darstellung



Bildquelle: DIGITAL IN NRW, 2017

Antizipiertes Ergebnis



Zentrale Chancen

- Verdrahten kann standardisiert und deutlich beschleunigt werden
- Mitarbeiter können flexibler eingesetzt werden
- Erhöhung von Transparenz im Auftragsabwicklungsprozess

Zentrale Risiken

- Abhängigkeit von der Bereitstell. der digitalen Modelle durch den Kunden
- Zur häufig unvergüteten Aufbereitung der Modelle werden Mitarbeiter in der Projektierung benötigt, Einsparungen entstehen in der Fertigung

Zentrale Einflussfaktoren für ein Umsetzungscontrolling

- Prozentualer Anteil an digital assistiert verdrahteten Aufträgen
- Prozentualer Anteil an eigenständig projektierten Aufträgen
- Aufwand zur Aufbereitung von digitalen Modellen

Bild 6-11: Management Summary der Bewertung (1/2)

Die Umsetzungsroadmap setzt die notwendigen Elemente für die Umsetzung der Use Cases in einen zeitlichen Kontext. Ein Ausschnitt aus der Umsetzungsroadmap des Anwendungsbeispiels ist in Bild 6-12 gezeigt.

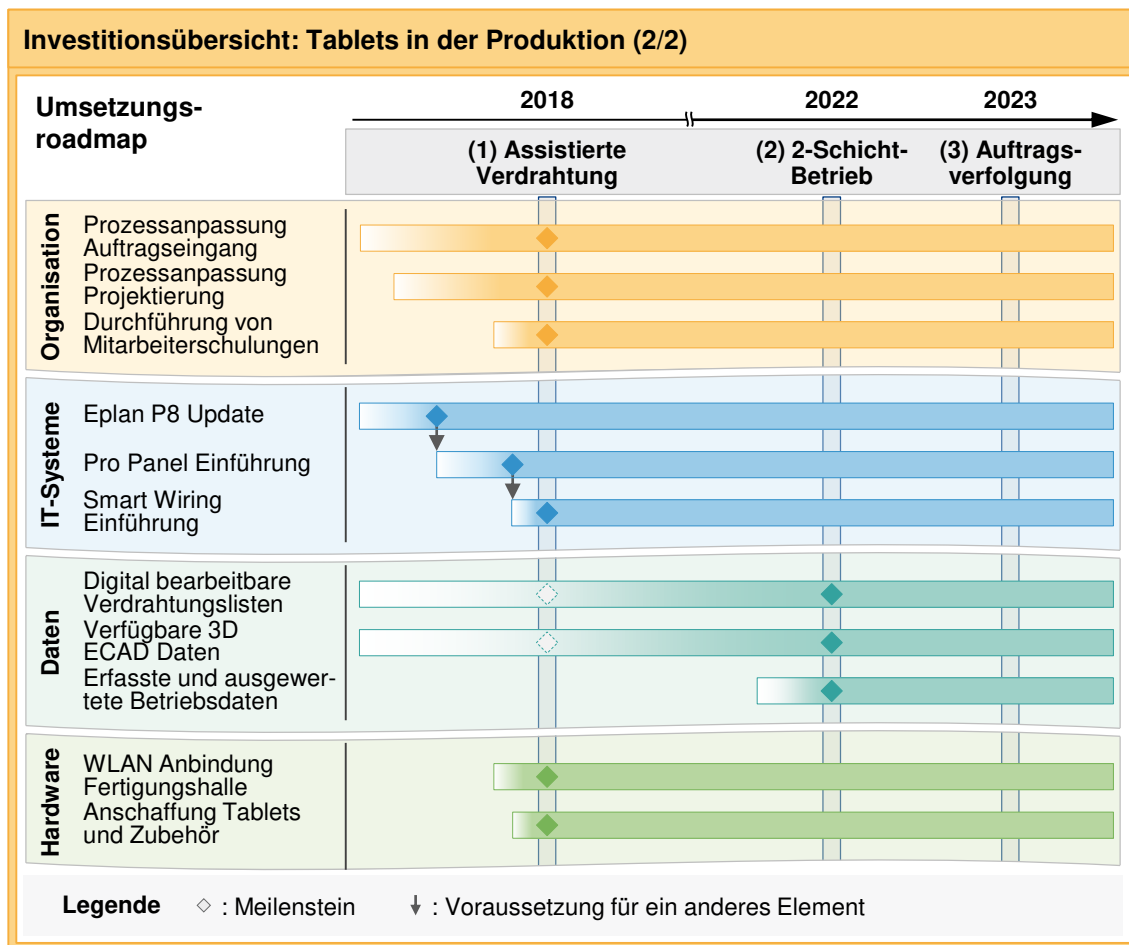


Bild 6-12: Management Summary der Bewertung (2/2)

Die gezeigte Umsetzungsroadmap stellt die ersten drei umzusetzenden Use Cases im Rahmen der Einführung von Tablets in der Produktion vor. Der erste umzusetzende Use Case ist die assistierte Verdrahtung. Dieser Use Case ist die Grundlage für die folgenden Use Cases. Um die assistierte Verdrahtung umzusetzen, sind einige Maßnahmen notwendig. Die Maßnahmen lassen sich in die vier Kategorien Organisation, IT-Systeme, Daten und Hardware gliedern.

Im Rahmen von organisatorischen Maßnahmen sind zunächst u.a. Prozessanpassungen im Auftragseingang und in der Projektierung zu planen und umzusetzen. Anschließend sind Mitarbeiterschulungen durchzuführen. Für die IT-Systeme ist ein EPLAN P8 Update mit allen begleitenden Maßnahmen notwendig. Dieses wird jedoch unabhängig von der betrachteten Investitionsentscheidung eingeführt, da sie in Zukunft implizit von den Kunden gefordert wird. Die Software ist eine Voraussetzung für die Einführung von EPLAN Pro Panel, welches im Anschluss einzuführen ist. Als Letztes ist EPLAN Smart Wiring einzuführen. Dies erfordert beide vorab genannten IT-Systeme. Im Bereich der Daten

werden digital bearbeitbare Verdrahtungslisten und 3D ECAD Daten benötigt. Mit den digitalen Verdrahtungslisten ist eine Grundfunktionalität der Tablets einsetzbar. Da jedoch davon ausgegangen wird, dass die Tablets zu Beginn nicht für alle Aufträge eingesetzt werden können, wird der Meilenstein für die bereitgestellten Daten erst bei dem zweiten Use Case gesetzt. Für die Einführung des zweiten Use Cases, den 2-Schicht-Betrieb, werden die Daten dann benötigt. Im Rahmen der Hardware sind für die Umsetzung des ersten Use Cases eine WLAN Anbindung in der Fertigungshalle und die Anschaffung von Tablets und entsprechendem Zubehör notwendig.

Die Handlungsempfehlungen sind somit das zentrale Ergebnis der dritten Phase. Für den Anwender sind sie die Grundlage für die Entscheidung über die mögliche Investition in die Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion.

6.2 Anwendungsbeispiel 2: Bewertung eines Fertigungsleitstands

Das zweite Anwendungsbeispiel betrachtet einen Hersteller von Kunststoffgranulaten. Es ist die Einführung eines Fertigungsleitstands in der Produktion zu bewerten. Der Fertigungsleitstand wird als der zukünftige, zentrale Informationsknoten innerhalb der Produktion und zu angrenzenden Bereichen gesehen. Das Validierungsbeispiel wird nur ausschnittsweise vorgestellt, um die Anwendbarkeit der Systematik auf verschiedene Beispiele aufzuzeigen.

Im Rahmen der ersten Phase Systemische Beschreibung des Investitionsobjekts wurde die technische Lösung in Form von Steckbriefen (vgl. Kapitel 5.4.1) initial beschrieben. Der Fertigungsleitstand wurde in mehrere Teilsysteme gegliedert. Da zu Beginn des Projekts nicht alle Informationen verfügbar waren, ergaben sich viele der relevanten Teilsysteme des Fertigungsleitstands und der relevanten Informationen aus der Erfassung des Umfelds mit der Datenlandkarte und der Strukturierung der Informationen im Schalenmodell. Die Steckbriefe wurden somit im Verlauf der ersten Phase sukzessive ergänzt. Bild 6-13 zeigt einen Steckbrief mit der Beschreibung der Anwendung „integrierte Termin- und Kapazitätsplanung“.

Der Steckbrief zeigt eines der zentralen Teilsysteme der Industrie 4.0 Anwendung. Das Ziel des Teilsystems ist eine transparente Planung von Produktionsaufträgen unter Berücksichtigung von Terminen und Kapazitäten. Daraus ergeben sich zwei zentrale Softwarefunktionalitäten. Das ist zum einen ein Dashboard, welches eine manuelle Erstellung eines Produktionsprogramms ermöglicht. Das Produktionsprogramm stellt eine zeitliche Einordnung von Aufträgen auf die Ressourcen in einem Gantt-Diagramm dar. Zum anderen ist dies eine einhergehende Ressourcenplanung für das Personal und die Maschinen, um Auslastungen zu antizipieren.

Eingangsobjekte der Anwendung sind die Auftrags-, Personal- und Maschinendaten. Die Auftragsdaten erfordern jeweils eine ID, einen Arbeitsplan mit Fertigungsschritten, mög-

liche einzusetzende Maschinen, Prioritäten, Fertigstellungstermine, Mengen und benötigte Fertigungskapazitäten. Die Personaldaten erfordern wiederum Verfügbarkeiten, Abwesenheitszeiten und Qualifikationen. Im Rahmen der Maschinendaten werden Kapazitäten und Verfügbarkeiten benötigt. Output bzw. Ausgangsobjekt der Anwendung ist eine Auftragsreihenfolge, d.h. eine Planung wann, auf welcher Maschine was gefertigt wird. Weiteres Ergebnis sind die geplanten Kapazitätsauslastungen für Maschinen und Personal sowie die geplanten Fertigstellungstermine von Aufträgen.

Anwendung: ...		
Anwendung: Assistiertes Störfallmanagement		
Anwendung: Integrierte Termin- und Kapazitätsplanung		
Bearbeiter: R. Joppen	Stand: 17.09.2019	
Ziele: <ul style="list-style-type: none"> Transparente Planung von Produktionsaufträgen unter Berücksichtigung von Terminen und Kapazitäten 		
Software-funktionalitäten: <ul style="list-style-type: none"> Ein Dashboard ermöglicht eine manuelle Erstellung eines Produktionsprogramms, was eine zeitliche Einordnung von Aufträgen auf Ressourcen in einem Gantt-Diagramm aufzeigt Personal- und Maschinen-Ressourcen können vorgeplant und Auslastungsspitzen antizipiert werden 		
Eingangs-objekte: <ul style="list-style-type: none"> Auftragsdaten: Produktionsauftrag mit ID, Arbeitsplan mit Fertigungsschritten, mögliche einzusetzende Maschinen, Prioritäten, Fertigstellungstermine, Mengen und benötigte Fertigungskapazitäten Personaldaten: Verfügbarkeiten, Abwesenheitszeiten, Qualifikationen Maschinendaten: Kapazitäten, Verfügbarkeiten 		
Ausgangs-objekt: <ul style="list-style-type: none"> Auftragsreihenfolge Planung wann auf welcher Maschine was gefertigt wird Geplante Kapazitätsauslastungen für Maschinen und Personal Geplante Fertigstellungstermine von Aufträgen 		
Software-infrastr.: <ul style="list-style-type: none"> Software mit Planungsdashboard der Aufträge Anbindung des Dashboards mit Personalplanung im ERP-System Anbindung des Dashboards mit Stammdaten über Maschineninformationen 		
Hardware-infrastr.: <ul style="list-style-type: none"> Desktop-PCs Server zur Datenspeicherung 		

Bild 6-13: Beispiel eines Steckbriefs zur Beschreibung der Teilsysteme des Fertigungsleitstands

Zentraler Bestandteil der Softwareinfrastruktur ist das Planungsdashboard der Aufträge. Weiterhin ist eine Anbindung des Dashboards an die Personalplanung im ERP-System und eine Anbindung an die Stammdaten über die Maschineninformationen notwendig. Hardwareanforderungen sind ausschließlich vorhandene Desktop-PCs und ein Server zur Datenspeicherung.

Nach der Beschreibung der Teilsysteme in Steckbriefen sind mögliche Abhängigkeiten untereinander festzuhalten. Hierzu wird eine Umsetzungsreihenfolge der Teilsysteme definiert. Bild 6-14 zeigt einen Ausschnitt aus der Beschreibung der Umsetzungsreihenfolge des Fertigungsleitstands.

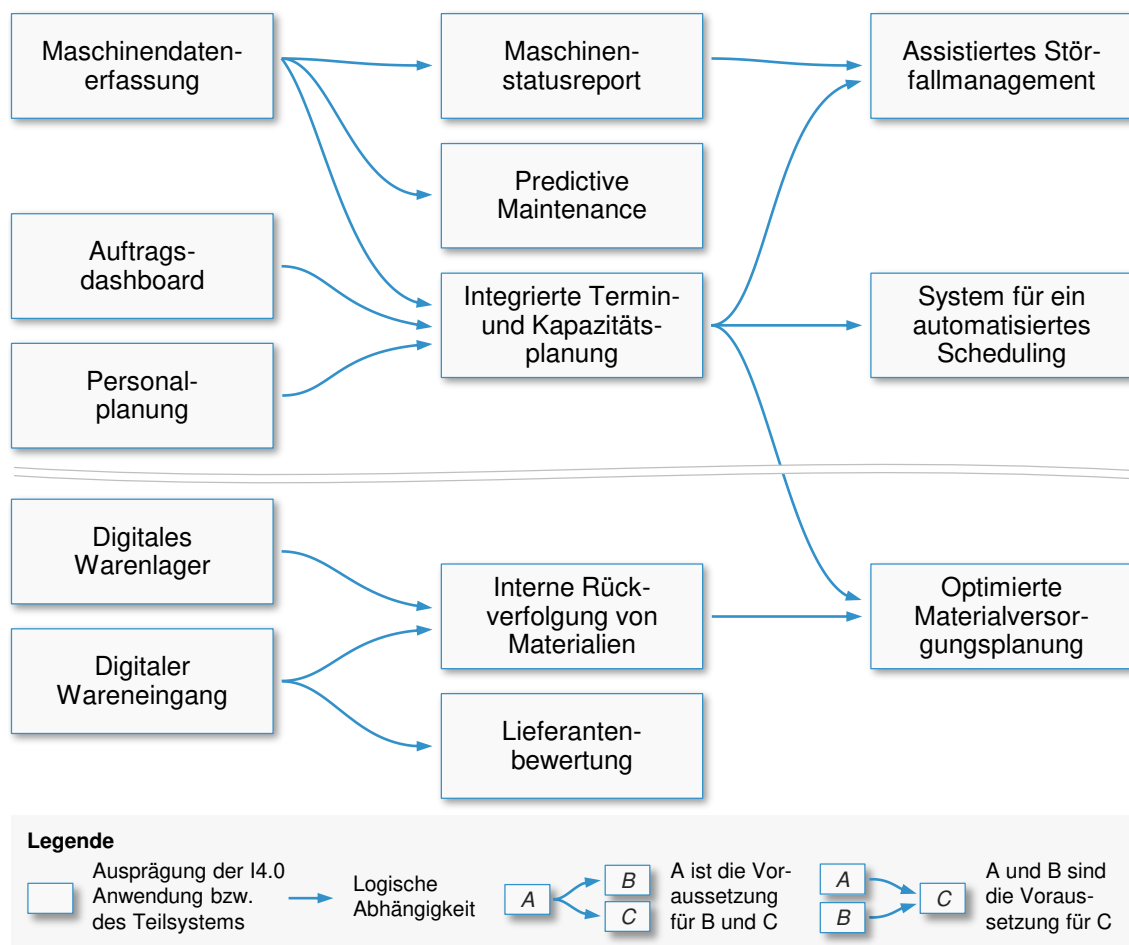


Bild 6-14: Ausschnitt aus der Beschreibung der Umsetzungsreihenfolge des Fertigungsleitstands

Die links stehenden Teilsysteme stellen die Voraussetzungen für die rechtsstehenden Teilsysteme dar. Beispielsweise ist eine Maschinendatenerfassung für Maschinenstatusreports, Predictive Maintenance Anwendungen und eine integrierte Termin- und Kapazitätsplanung notwendig. Für letztere sind weiterhin ein Auftragsdashboard als auch eine Personalplanung notwendig. Die integrierte Termin- und Kapazitätsplanung kann anschließend in Kombination mit den Maschinenstatusreports in einem Störfallmanage-

ment aufgehen. So sind alle Teilsysteme des Fertigungsleitstands in Steckbriefen spezifiziert und deren Abhängigkeiten zueinander in einer Umsetzungsreihenfolge definiert. Wie auch für die Erfassung der Steckbriefe gilt für die Umsetzungsreihenfolge, dass zu Beginn ein initialer Entwurf erarbeitet wird. Durch die Analyse und Strukturierung des Investitionsobjekts und dessen Umfelds werden große Teile der Umsetzungsreihenfolge sukzessive ergänzt.

Das Umfeld des Investitionsobjekts mit seinen Teilsystemen wird mit Hilfe einer Datenlandkarte (vgl. Kapitel 5.4.2) erfasst. Bild 6-15 zeigt einen Ausschnitt aus der Datenlandkarte des Anwendungsbeispiels zur Bewertung eines Fertigungsleitstands.

Die Datenlandkarte zeigt die Einbettung des Fertigungsleitstands in die Prozess- und IT-Systemlandschaft. Im Prozess Compoundauftrag anlegen wird ein solcher manuell im ERP-System Step Basic angelegt. Dieser soll automatisiert an den Fertigungsleitstand übergeben werden. Der Fertigungsleitstand wird dann bspw. für die Termin- und Kapazitätsplanung und das Hochladen von Maschinenprogrammen auf die entsprechenden Fertigungsmaschinen eingesetzt. Aus der Darstellung ergeben sich sowohl Anforderungen an die Funktionalitäten des Fertigungsleitstands als auch Anforderungen an Schnittstellen mit anderen IT-Systemen und Ressourcen.

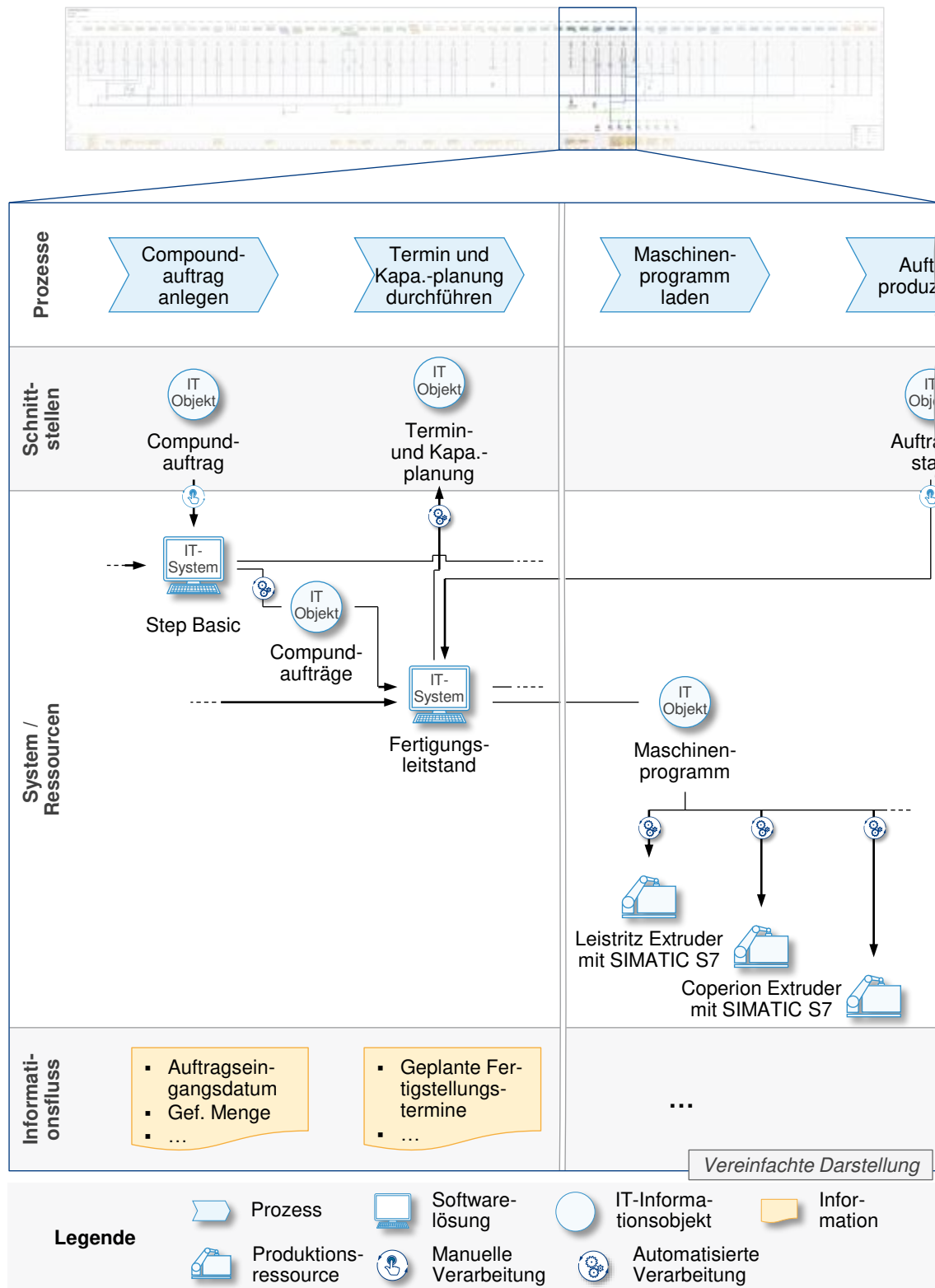







Bild 6-15: Ausschnitt aus der Datenlandkarte des Anwendungsbeispiels zur Bewertung eines Fertigungsleitstands

Auf Basis der Beschreibung der technischen Lösung und der Datenlandkarte kommt das Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.4.3) zum Einsatz. Die erfassten und strukturierten Informationen ermöglichen eine Kategorisierung der Industrie 4.0 Anwendung mit Hilfe der Merkmale von Investitionsobjekten (vgl. Kapitel 5.2.3). Die Kategorisierung ist in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Bewertung der Industrie 4.0 Anwendung zur Kategorisierung der Investitionsentscheidungen

Merkmal	Ausprägung / Ausprägungswert			
	0	1	2	3
 Technischer Anspruch , d.h. wie schwierig die technische Lösung ist	Wenig anspruchsvoll, domänen-spezifisch	Anspruchsvoll, domänen-spezifisch	Anspruchsvoll, domänen-übergreifend	Hoch anspruchsvoll, domänen-übergreifend
 Erweiterbarkeit , d.h. wie aufwändig es ist Funktionalitäten anzupassen	Nicht ohne substanzielle Aufwände erweiterbar	Erweiterbar über zu def. Schnittstellen	Erweiterbar über vorh. Schnittstellen	Erweiterbar „per Knopfdruck“
 Unternehmensdurchdringung , d.h. wie abteilungsübergreifend die Lösung ist	Nur eine Abteilung	Mehrere Abteilungen	Nahezu alle Abteilungen im Unternehmen	Unternehmens-übergreifend
 Höhe der einmaligen Kosten	Kleine Investition	Durchschnittliche Investition	Strategische Investition	Substanzielle Investition
 Höhe der laufenden Kosten	Geringe Kosten	Mittlere Kosten	Hohe Kosten	Sehr hohe Kosten

Als Ergebnis der Kategorisierung wird der Fertigungsleitstand für den Hersteller von Kunststoffgranulaten als unüberschaubare Investition eingestuft. Die technische Lösung ist hoch anspruchsvoll und domänenübergreifend. Eine Erweiterung ist über vorhandene Schnittstellen möglich und von Beginn an geplant. Es sind nahezu alle Abteilungen im Unternehmen einzubinden, wodurch die Komplexität des Projekts sehr hoch ist. Für das Unternehmen stellt der Fertigungsleitstand voraussichtlich eine substanzielle Investition mit hohen laufenden Kosten dar. Die Bewertung der Industrie 4.0 Anwendung ist somit sehr fundiert durchzuführen. Es ist das vollständige Vorgehensmodell der Systematik (vgl. Kapitel 5.3.2) zu durchlaufen. Die weiteren Schritte zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendung wurden entsprechend dem vorherigen Anwendungsbeispiel durchgeführt.

6.3 Bewertung der Arbeit an den Anforderungen

Abschließend wird die erarbeitete Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion anhand der in Kapitel 3.6 dargestellten Anforderungen bewertet. Dafür wird im Folgenden für jede Anforderung kurz erläutert, wie diese durch die Systematik erfüllt wird. Die Erfüllung der Anforderungen durch die einzelnen Bestandteile der Systematik wird in Bild 6-16 gezeigt.

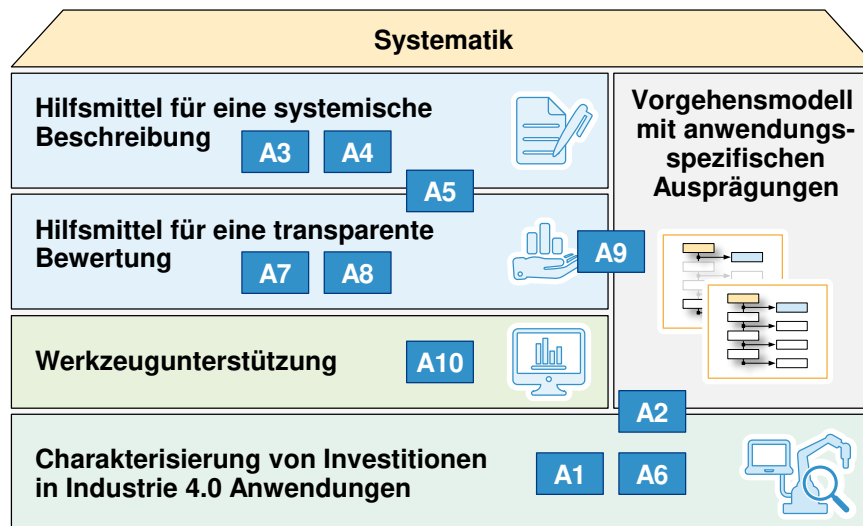


Bild 6-16: Erfüllung der Anforderungen durch die Systematik

Anforderung 1: Klassifizierung von Investitionsentscheidungen

Die Vielzahl und Vielfalt an Industrie 4.0 Anwendungen stellt die Frage nach unterschiedlichen Klassen von Investitionsentscheidungen. Im Rahmen der Systematik wurden Merkmale von Investitionsobjekten (vgl. Kapitel 5.2.3) erarbeitet, welche eine Kategorisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion ermöglichen.

Anforderung 2: Industrie 4.0 anwendungsklassenspezifische Vorgehen

Unterschiedliche Kategorien an Investitionsobjekten erfordern unterschiedliche Vorgehensweisen um diese zu bewerten. Für die zwei erarbeiteten Kategorien wird je ein Vorgehensmodell vorgeschlagen (vgl. Kapitel 5.3.2). Dies ermöglicht es den Aufwand für die Bewertung einer Industrie 4.0 Anwendung anwendungsspezifisch anzupassen.

Anforderung 3: Berücksichtigung der gegebenen Infrastruktur und Restriktionen unter einer systemischen Betrachtungsweise

Da im Rahmen dieser Arbeit Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in einer bestehenden Produktion betrachtet werden, ist die Berücksichtigung der gegebenen Infrastruktur und der Restriktionen von zentraler Bedeutung. Dies wiederum erfordert eine systemische Betrachtungsweise. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts (vgl. Kapitel 5.4) adressieren diese Anforderung. Bspw. werden das Umfeld der zu bewertenden Industrie 4.0 Anwendung sowie die relevanten Use Cases mit Hilfe einer Datenlandkarte (vgl. Kapitel 5.4.2) erfasst und identifiziert. Strukturiert werden die Informationen anschließend mit Hilfe eines Schalenmodells zur Beschreibung einer Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion (vgl. Kapitel 5.4.3).

Anforderung 4: Unterstützung bei der Spezifikation des Investitionsobjekts

Die Spezifikation des Investitionsobjekts ist Grundlage für deren Bewertung. Ausgangspunkt ist ein Steckbrief zur Beschreibung der technischen Lösung (vgl. Kapitel 5.4.1). Dieser beschreibt die Zielsetzungen sowie die Funktionalitäten der Industrie 4.0 Anwendung näher. Eine Datenlandkarte (vgl. Kapitel 5.4.2) wird eingesetzt, um das Umfeld der zu bewertenden Industrie 4.0 Anwendung sowie relevante Use Cases zu identifizieren und zu erfassen. Die Ergebnisse werden anschließend mit einem Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.4.3) strukturiert.

Anforderung 5: Unterstützung bei der Strukturierung von Industrie 4.0 Potentialen

Um einen möglichen positiven Nutzen einer Industrie 4.0 Anwendung nachzuweisen, ist es erforderlich die Potentiale der Digitalisierung zu strukturieren. Ausgangspunkt ist die Strukturierung der Industrie 4.0 Anwendung mit ihren Use Cases im Schalenmodell zur Strukturierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.4.3). Auf dieser Basis können die Potentiale im Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.1) bewertet werden.

Anforderung 6: Unterstützung bei der Analyse von Annahmen, möglicher Zielsetzungen und Auswirkungen einer Investition

Die Annahmen und Zielsetzungen einer Investitionsentscheidung haben grundlegenden Einfluss auf diese. Um diese Anforderung zu erfüllen, wurde eine Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.2) erarbeitet. Dies beinhaltet ein Sichten-Modell einer Investitionsbewertung (vgl. Kapitel 5.2.1), ein Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion (vgl. Kapitel 5.2.2) sowie daraus abgeleitete Merkmale von Investitionsobjekten (vgl. Kapitel 5.2.3).

Anforderung 7: Unterstützung bei der Datenerhebung entlang des Lebenszyklus der Investition

In der Literatur gibt es bereits viele Ansätze, welche die Bewertung einer Investition über den gesamten Lebenszyklus propagieren. Nach wie vor ist die fehlende Datengrundlage bei Investitionsbewertungen ein grundlegendes Problem. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.4) entwickelt. Die Methode unterstützt die systematische Datenerhebung entlang des Lebenszyklus einer Investition.

Anforderung 8: Unterstützung bei der Bewertung von Nutzenpotentialen

Die Bewertung der Nutzenpotentiale stellt eine zentrale Herausforderung bei Investitionsentscheidungen dar. Grundlage für diesen Prozess ist eine Datenlandkarte (vgl. Kapitel 5.4.2) zur Identifikation der Rahmenbedingungen und ein Schalenmodell zur Strukturi-

rierung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.4.3). Die zentralen, hier bereitgestellten Hilfsmittel sind ein Schema zur Bewertung des Nutzens von Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.1) und ein Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.2).

Anforderung 9: Monetäre Bewertung von Kosten und Nutzen

Da der Vergleich eines Nutzwertes (wie bspw. das Ergebnis einer Nutzwertanalyse) einer Investition mit den Kosten der Investition keine eindeutige Interpretation ermöglicht, ist eine monetäre Bewertung der Kosten und des Nutzens gefordert. Dies spiegelt sich im gesamten Vorgehen (vgl. Kapitel 5.3.2) wider. Deutlich wird dies insb. bei der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.4). In diesem Rahmen wird die monetäre Berechnungsgrundlage erfasst, um sie anschließend zu berechnen. Die Sammlung an Berechnungsmethoden unterstützt bei der Auswahl einer geeigneten Berechnungsmethode (vgl. Kapitel 5.5.5).

Anforderung 10: Einfache Anwendbarkeit

Eine einfache Anwendbarkeit ist essentiell für die Akzeptanz der Systematik. Zum einen sind die entwickelten Methoden mit graphischen Elementen versehen, um sie einfach verständlich zu machen. Zum anderen wurde eine Werkzeugunterstützung (vgl. Kapitel 5.6) entwickelt. Die Werkzeugunterstützung basiert auf der Methode zur Datenaufnahme für Investitionen in der Produktion (vgl. Kapitel 5.5.4). Dies erlaubt einen einfachen Übertrag der im Workshop erfassten Daten in die Werkzeugunterstützung mit einer direkten Weiterverarbeitung.

Fazit

Die vorgestellte Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion erfüllt alle an sie gestellten Anforderungen in vollem Umfang. Sie ist geeignet um eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion zu bewerten. Ermöglicht wird dies durch die fünf Bestandteile der Systematik: Eine Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion, ein Vorgehensmodell mit anwendungsspezifischen Ausprägungen, Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts, Hilfsmittel für eine transparente Bewertung des Investitionsobjekts sowie eine Werkzeugunterstützung. Die Systematik wurde erfolgreich an den Anwendungsbeispielen Tablets in der Produktion bei einem Schaltanlagenbauer und an der Bewertung eines Fertigungsleitstands bei einem Hersteller von Kunststoffgranulaten validiert.

7 Zusammenfassung, Reflexion und Ausblick

Industrie 4.0 verspricht viele Potentiale in der Produktion. Diese reichen von einer datengetriebenen Optimierung einzelner Maschinen über fahrerlose Transportsysteme bis hin zur Optimierung der Produktionsplanung und -steuerung. Nichtsdestotrotz sind viele Unternehmen zögerlich in Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion zu investieren. Einer der zentralen Gründe dafür ist ein unklarer wirtschaftlicher Nutzen.

Als **Ursache** für dieses Problem wurden die folgenden drei wesentlichen Herausforderungen identifiziert. Erstens mangelt es an einer Strukturierung von Investitionsentscheidungen im Rahmen von Industrie 4.0. Die Arbeit nach FAY ET AL. (vgl. Kapitel 3.2.4) ermöglicht eine Abgrenzung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion. Es stellt sich jedoch die Frage nach unterschiedlichen Klassen an Investitionsentscheidungen mit spezifischen Vorgehen. Die zweite zentrale Herausforderung ist die Analyse der Industrie 4.0 Anwendung aus systemtheoretischer Sicht. Erforderlich wird dies insb. auf Grund der hiesigen Prämisse, eine Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in einer bestehenden Produktion zu bewerten. Dies bedingt zahlreiche zu berücksichtigende Strukturen, Rahmenbedingungen, Wechselwirkungen und Stakeholder. Hinzu kommt nicht nur eine gesteigerte Komplexität der einzelnen Systeme an sich, sondern insbesondere auch deren Ad-hoc Vernetzung zu anderen Systemen. Eine Industrie 4.0 Anwendung kann bspw. für einen Anwendungsfall umgesetzt und anschließend über den Softwareanteil der Lösung relativ einfach erweitert werden. Die Investition kann somit als eine Art Infrastruktur bzw. Plattform für eine Vielzahl weiterer Anwendungen fungieren. Die dritte zentrale Herausforderung ist die Unterstützung der Datenerhebung für eine Bewertung der Industrie 4.0 Anwendung. Jede Investitionsbewertung unterliegt zahlreichen Annahmen. Dabei sind einzelne Annahmen i.d.R. nicht kritisch. Eine Vielzahl an Annahmen können ein Ergebnis jedoch intransparent oder unglaubwürdig machen. Hier gilt es Transparenz über die Datenerhebung und somit über die Annahmen, die Bewertung und die Ergebnisse zu schaffen.

Aus den aufgezeigten Herausforderungen wurden zehn konkrete Anforderungen an eine Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion abgeleitet. Diese Herausforderungen im Rahmen einer Investitionsbewertung zu adressieren erfordert eine systemische Betrachtung und eine interdisziplinäre Herangehensweise. Konkret werden ein systematisches Vorgehen sowie Hilfsmittel benötigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden existierende Ansätze des Stands der Technik aus verschiedenen Disziplinen untersucht. Die relevanten Ansätze lassen sich in sechs Kategorien zusammenfassen. Dazu gehören Ansätze der Investitionsrechnung, domänenspezifische Bewertungsansätze sowie Ansätze zur Systemanalyse und -bewertung. Gleichmaßen gehören dazu Kennzahlensysteme, Methoden zur Potentialfindung und Datenanalyse bzw. -exploration sowie Methoden der Entscheidungsunterstützung.

Keiner der untersuchten Ansätze und auch keine triviale Kombination an Ansätzen erfüllt die Anforderungen an eine Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion in vollem Umfang. Die betrachteten Ansätze können bei der Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion maximal unterstützend eingesetzt werden. Eine ganzheitliche Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion existiert nicht. Somit besteht **Handlungsbedarf** für die Entwicklung einer entsprechenden Systematik.

Die entwickelte Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion greift diesen Handlungsbedarf auf. Das **Ergebnis** ist eine Systematik, die im Kern fünf übergeordnete Bestandteile umfasst:

- eine Charakterisierung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen, welche die theoretische Grundlage für eine Bewertung darstellt,
- ein Vorgehensmodell mit anwendungsspezifischen Ausprägungen auf Basis der Charakterisierung, welches die durchzuführenden Tätigkeiten sowie die einzusetzenden Hilfsmittel und Resultate in einen zeitlichen Zusammenhang setzt,
- Hilfsmittel für eine systemische Beschreibung des Investitionsobjekts, welche den Anwender dabei unterstützen, die zu bewertende Industrie 4.0 Anwendung als System innerhalb eines Systems zu beschreiben, zu strukturieren und abzugrenzen,
- Hilfsmittel für eine transparente Bewertung des Investitionsobjekts, welche den Anwender dabei unterstützen, die Bewertung der Industrie 4.0 Anwendung transparent durchzuführen,
- eine Werkzeugunterstützung für eine einfache Anwendung der Systematik.

Die **Validierung** der Systematik erfolgte anhand mehrerer Projekte. Hier beschrieben wurden die Evaluation von Tablets in der Produktion eines Schaltanlagenbauers und die Bewertung eines Fertigungsleitstands eines produzierenden Unternehmens. Alle Schritte des Vorgehensmodells der Systematik wurden dabei aufgezeigt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hilfsmittel und die Werkzeugunterstützung kommen dabei zum Einsatz. So wird gezeigt, dass die Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion alle an sie gestellten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt.

Die vorliegende Arbeit wurde im Kern nach der Design Research Methodology nach BLESSING ET AL. entwickelt (vgl. Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.3). Dies dient insbesondere zur Sicherstellung der Objektivität und der Nachvollziehbarkeit. Der vierphasige Prozess der Design Research Methodology wurde dabei in Gänze für die Entwicklung der Systematik durchlaufen. Darüber hinaus wurde der Prozess für die eingesetzten Hilfsmittel zusätzlich durchlaufen. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Vorarbeiten veröffentlicht. Die Hilfsmittel wurden teilweise in verschiedenen Projekten entwickelt. Zwei Beispiele zur Evaluation des Zusammenspiels aller Hilfsmittel wurden in dieser Arbeit aufgezeigt.

Die drei Design Research Zyklen nach HEVNER ET AL. lassen sich in dieser Arbeit eindeutig identifizieren (vgl. Kapitel 2.1.3). Die Verknüpfung der Design Aufgabe zum Umfeld über den Relevanz-Zyklus wurde in der Problemanalyse (Kapitel 3) detailliert beschrieben. Auf dieser Basis wurden Anforderungen an die zu entwickelnde Systematik abgeleitet. Die Verknüpfung zur Wissensbasis über den Strenge-Zyklus spiegelt sich insbesondere im Stand der Technik (Kapitel 4) wider. Hier werden die relevanten Grundlagen für die Arbeit beschrieben. Das Kapitel Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion (Kapitel 5) beschreibt die Erstellung der Design Artefakte und Prozesse des Design-Zyklus. Das Kapitel Anwendung der Systematik (Kapitel 6) beschreibt die Evaluation des Design-Zyklus.

Im Rahmen der Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen besteht **weiterer Forschungsbedarf**. Zum einen ist die Übertragbarkeit der Systematik über den Bereich der Produktion hinaus zu prüfen. Zum anderen ist im Rahmen einer ganzheitlichen Investitionsrechnung die Finanzierung in das Konzept mit einzubringen. Da der entwickelte Ansatz u.a. die fehlende Datengrundlage für eine Bewertung adressiert, ist ein adaptiertes Vorgehen für große Unternehmen mit einer fundierten Datengrundlage bzw. mit etablierten Kennzahlensystemen zu prüfen. Weiterhin kann der Ansatz um verschiedene Simulationen, wie die der marktseitigen Annahmen, ergänzt werden.

8 Abkürzungsverzeichnis

A	Anforderung
acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
AHP	Analytic Hierarchy Process
ARIS	Architektur Integrierter Informationssysteme
BPMN	Business Process Model and Notation
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
COCOMO	Constructive Cost Model
CONSENS	Conceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems
COSYSMO	Constructive Systems Engineering Cost Model
CPM	Critical Path Method
CPS	Cyber-Physical Systems
d.h.	das heißt
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
ECAD	Electrical Computer Aided Design
ed.	Editor (englisch)
eEPK	ereignisgesteuerte Prozessketten
engl.	englisch
et al.	et alii (lateinisch) = und andere
ggf.	gegebenenfalls
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
insb.	insbesondere

ISO	International Organization for Standardization (englisch) = Internationale Organisation für Normung
KLB	Kunden-Lieferanten-Beziehungen
LCC	Life Cycle Costing
MEM	Methods-Energy-Measurement
MID	Molded Interconnect Devices
MOFLEPS	Model Flexible Product Structures
NPV	Net Present Value
OEE	Overall Equipment Effectiveness (englisch) = Gesamtanlageneffektivität
OMEGA	Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation
ROI	Return On Investment
SADT	Structured Analysis and Design Technique
sog.	sogenannt
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TRIZ	Theory of Inventive Problem Solving
typ.	typischer/ typischen
u.a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
ZP	Zeitperiode
ZVEI	Zentralverband der Elektrotechnischen Industrie
ZWF	Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb

9 Literaturverzeichnis

- [AAA+09] ABELE, E.; ALBRECHT, V.; ARMBRUSTER, H.; BOGE, C.; BÜNTING, F.; DERSISOPOULOS, M.; KALOGERAKIS, C.; KÖLLNER, T.; KUHRKE, B.; LAY, G.; NOSKE, H.; SCHRÖTER, M.; STRIEFLER, M.; WETZEL, P.; WIESER, R.: Lebenszykluskostenmodelle. In: Schweiger, S. (Hrsg.): Lebenszykluskosten optimieren – Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern. Gabler | GWV Fachverlag, Wiesbaden, 2009
- [ABD+16] ANDERL, R.; BAUER, K.; DIEGNER, B.; DIEMER, J.; FAY, A.; FRITZ, J.; GOERICKE, D.; GROTEPASS, J.; HILGER, C.; JASPERNEITE, J.; KALHOFF, J.; KUBACH, U.; LÖWEN, U.; MENGES, G.; MICHELS, S.; MÜNCH, W.; PREIß, H.; REUS, O.; SCHMIDT, F.; SCHMOLZE-KRAHN, R.; STEFFENS, E.; STIEDL, T.; TEN HOMPEL, M.; ZEIDLER, C.: Aspekte der Forschungsroadmap in den Anwendungsszenarien. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, 2016
- [AF09] ADLBRECHT, G.; FEDERHEN, J.: Earned-Value-Managementsysteme für Großprojekte – Methoden zur Bestimmung des Earned-Value. In: Bullinger, H-J.; Spath, D.; Warnecke, H-J.; Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [AG98] ASIEDU, Y.; GU, P.: Product life cycle cost analysis: state of the art review. International Journal of Product Research, 36:4, 1998, pp. 883-908
- [Aic97] AICHELE C.: Kennzahlenbasierte Geschäftsprozessanalyse. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1997
- [And91] ANDRÁSFAL, B.: Graph Theory: Flow, Matrices. Taylor & Francis Verlag, New York, 1991
- [APW+15] ANDERL, R.; PICARD, A.; WANG, Y.; FLEISCHER, J.; DOSCH, S.; KLEE, B.; BAUER, J.: Leitfaden Industrie 4.0 – Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. VDMA Forum Industrie, Frankfurt am Main, 2015
- [AS16] ACKERN, J.; SCHRÖDER, T.: Trends für Industrie 4.0. Fraunhofer-Gesellschaft, München, 2016
- [Bar11] BARDMANN, M.: Grundlagen der Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre. 1. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011
- [Bau14] BAUERNHANS, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik – Anwendungen, Technologien, Migration. Springer Vieweg Fachmedien Verlag, Wiesbaden, 2014
- [Bau16] BAUERNHANS, T. (HRSG.); MÜLLER, F. G.; BRESSNER, M.; GÖRZIG, D.; RÖBER, T.: Industrie 4.0 – Entwicklungsfelder für den Mittelstand – Aktuelle Hemmnisse und konkrete Bedarfe. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, 2016
- [BBC+15] BAUER, H.; BAUR, C.; CAMPLONE, G.; GEORGE, K.; GHISLANZONI, G.; HUHN, W.; KAYSER, D.; LÖFFLER, M.; TSCHIESNER, A.; E. ZIELKE, A.; CATTELL, J.; GIET, L.; KELLY, R.; MUSCHTER, S.; SOUBIEN, F.; WEE, D.; BREUNIG, M.; DUFOUR, M.; LIM, J.; BROMBERGER, J.; RATH, K. P.; SAB, B.; JÜNGLING, K.: Industry 4.0 – How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey & Company, 2015
- [BBF16] BORNSCHLEGL, M.; BREGULLA, M.; FRANKE, J.: Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies. In: Journal of Cleaner Production, Volume 135, 2016, Pages 644-656
- [BBJ+12] BRÖKEL, K.; BÖHME, C.; JONUSCHIES, I.; KLIEWE, C.; KLOß, E.; KNOPP, A.; KREJA, S. U.; RAHN, R.; STERNBERG, G.; WEGMANN, R.: Maschinenelemente. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2012

- [BC09] BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer Verlag, London, 2009
- [BDD+13] BAUER, K.; DIEGNER, B.; DIEMER, J.; DORST, W.; FERER, S.; GLATZ, R.; HELLINGER, A.; HERFS, W.; HORSTMANN, M.; KAUFMANN, T.; KURZ, C.; LÖWEN, U.; STUMPF, V.: Kurzfassung. In: Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Deutschland als Produktionsstandort sichern. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, 2013
- [Bec19-ol] BECKMANN, H.: Stammdatenmanagement. Unter: <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/daten-wissen/Informationsmanagement/Informationsmanagement--Aufgaben-des/Stammdatenmanagement/index.html/?searchterm=stammdaten>, 29. Juni 2019
- [Ben19-ol] BENDEL, O.: Digitalisierung – Definition. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitalisierung-54195>, 2. Mai 2019
- [Ber19a-ol] BERWANGER, J.: Garantie – Definition. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/garantie-33325>, 29. Juni 2019
- [Ber49] BERTALANFFY, L.: Zu einer allgemeinen Systemlehre. *Biologia Generalis* 19(1), 1949, S. 114-129
- [Ber69] BERTALANFFY, L.: General System Theory – Foundations, Development, Applications. George Braziller, New York, 1969
- [BH00] BOHEM, B.; HARROWITZ, E.: Software Cost Estimation with Cocomo II. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2000
- [BJS+11] BRECHER, C.; JESCHKE, S.; SCHUH, G.; AGHASSI, S.; ARNOSCHT, J.; BAUHOFF, F.; FUCHS, S.; JOOß, C.; KARMANN, O.; KOZIELSKI, S.; ORILSKI, S.; RICHERT, A.; RODERBURG, A.; SCHIFFER, M.; SCHUBERT, J.; STILLER, S.; TÖNISSEN, S.; WELTER, F.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: Brecher, C. (Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Springer Verlag, Berlin, 2011
- [BK13] BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: Thesen und Handlungsfelder – Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2013
- [BKK11] BRECHER, C.; KARMANN, O.; KOZIELSKI, S.: Einleitung – Der Exzellenzcluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“. In: Brecher, C. (Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Springer Verlag, Berlin, 2011
- [BKV16] BLEY, S. KILGER, C.; VOGEL, J.: Industrie 4.0 – das unbekannte Wesen?, Ernst & Young GmbH, Stuttgart, 2016
- [BLS12] BLOHM, H.; LÜDER, K.; SCHAEFER, C.: Investition – Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und der Investitionsrechnung. 10. Auflage, Franz Vahlen Verlag, München, 2012
- [BMW13] BECKER, T.; MEYER, M.; WINDT, K.: A manufacturing systems network model for the evaluation of complex manufacturing systems. In: International Journal of Productivity and Performance Management, Vol. 63 Issue: 3, 2013, pp.324-340
- [BMWi18-ol] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: Landkarte Industrie 4.0. Unter: <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/In-der-Praxis/Karte/karte.html>, 11. August 2018
- [BKW16] BIEG, H.; KUßMAUL, H.; WASCHBUSCH, G.: Investition. 3. Auflage, Franz Vahlen Verlag, München, 2016
- [BÖ15] BRECHER, C.; ÖZDEMİR, D.: Introduction – The Cluster of Excellence “Integrative Production Technology for High-Wage Countries”. In: Brecher, C. (Eds.): Advances in Production Technology. Springer Verlag, New York, 2015

- [Bög13] BÖGE, A.: Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendung der Maschinenbau-Technik. 21. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2013
- [BP19] BROZA-ABUT, N.; PARLINGS, M.: Leitfaden Investitionskonzepte: Digitalisierung in der Praxis: Ihr Weg zum erfolgreichen Business Case – So wird Ihr Digitalisierungsvorhaben ein Erfolg! Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Dortmund, Dortmund, 2019
- [BR04] BHUSHAN, H.; RAI, K.: Strategic decision making – Applying the analytic hierarchy process. Springer Verlag, London, 2004
- [Bra14] BRANDIS, R.: Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinzipienlösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 325, Paderborn, 2014
- [Bre12] BREDOW, M. J.: Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, München, 2012
- [Bro01] BROWNING, T. R.: Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions. In: IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 48, No. 3, 2001
- [Bru05] BRUGGER, R.: Der IT-Business Case – Kosten erfassen und analysieren – Nutzen erkennen und quantifizieren – Wirtschaftlichkeit nachweisen und realisieren. Springer Verlag, Berlin, 2005
- [BS11] BRIGGS, R. O.; SCHWABE, G.: On Expanding, the Scope of Design Science in IS Research. In: Service-Oriented Perspectives in Design Science Research – 6th International Conference, DESRIST 2011, Milwaukee, 2011
- [Buc09] BUCK, H.: Aktuelle Unternehmenskonzepte und die Entwicklung der Arbeitsorganisation – Visionen und Leitbilder – Arbeitsorganisation. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämpfer, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [Bun09] BUNGARD, W.: Anlaufmanagement am Beispiel der Automobilindustrie – Methoden und Instrumente integrierten Anlaufmanagements. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämpfer, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [Bur08] BURGHARDT, M.: Projektmanagement – Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten. 8. Auflage, John Wiley & Sons Verlag, Weinheim, 2008
- [Bur18] BURGHARDT, M.: Projektmanagement – Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten. 10. Auflage, John Wiley & Sons Verlag, Weinheim, 2018
- [Bus45] BUSH, V.: The Endless Frontier, A Report to the President by Vannevar Bush. 1945
- [BW90] BUSSE VON COLBE, W.; LABMANN, G.: Betriebswirtschaftstheorie – Band. 3: Investitionstheorie. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, 1990
- [CD13] COTTIN, C.; DÖHLER, S.: Risikoanalyse – Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen. Springer Spektrum Verlag, 2. Auflage, Wiesbaden, 2013
- [CS11] CZADO, C.; SCHMIDT, T.: Mathematische Statistik. Springer Verlag, Berlin, 2011
- [Con19-ol] CONTROLLINGPORTAL-PORTAL.DE (HRSG.): Break Even Point. Unter: <https://www.controllingportal.de/Fachinfo/Kostenrechnung/Break-Even-Analyse.html>, 9. September 2019
- [Dan09] DANGELMAIER, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung – Im Sommer keine Kirschpralinen?. Springer Verlag, Berlin, 2009

- [DB07] DANILOVIC, M.; BROWNING, T. R.: Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. In: International Journal of Project Management, Volume 25, Issue 3, 2007
- [Def19-ol] DEFINITION ONLINE: Schulung – Definition Schulung. Unter: <https://definition-online.de/schulung/>, 27. April 2019
- [DG18] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.: Innovationen im Zeitalter der Digitalisierung. Industrie 4.0 Management 2.2018: S. 7-11, Berlin, 2018
- [DGK+15] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; KÜHN, A.; LUCKEY, M.; PLASS, C.; SCHNEIDER, M.; WESTERMANN, T.: Auf dem Weg zur Industrie 4.0 – Erfolgsfaktor Referenzarchitektur. it's OWL Clustermanagement, Paderborn, 2015
- [DS05] DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre – Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht – mit 79 Tabellen. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2005
- [Dud10] DUDEN: Das Fremdwörterbuch. 10. Auflage, Dudenverlag, Bibliographisches Institut GmbH, Mannheim, 2010
- [Dud17] DUDEN: Die deutsche Rechtschreibung – Das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der amtlichen Regeln. 27. Auflage, Bibliographisches Institut GmbH, Berlin, 2017
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortschrittliche mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [Ebe10] EBERLEIN, J.: Betriebliches Rechnungswesen und Controlling. 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2010
- [ECW+98] EPPINGER, S. D.; CARRASCOSA, M.; WHITNEY, D. E.: Using the Design Structure Matrix to Estimate Product Development Time. In: Proceedings of the DECT'98 – ASME Design Engineering Technical Conference. Atlanta, USA, 1998
- [Ehr09] EHRLENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [EKL07] EHRLENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [EM16] EICHORN, P.; MERK, J.: Das Prinzip der Wirtschaftlichkeit. Basiswissen der Betriebswirtschaftslehre. 4. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden, 2016
- [EMW13] ERMSCHER, U.; MÖBIUS, C.; WENGERT, H.: Investition und Finanzierung. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2013
- [ES96] EVERSHEIM, W., UND SCHUH G. (HRSG.): Betriebshütte, Produktion und Management, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1996, S. 2 – 38 ff.
- [ES16] ENCK, T.; STANZEL, K.-J.: Digitalisierung als Branchentreiber: Der Maschinenbau aus Sicht des Finanzierers. In: Emmerich, V. (Hrsg.): Restrukturierung & Finance: Digitalisierung – werden analoge Geschäftsmodelle zum Sanierungsfall? Ausgabe 2016, Dr. Wieselhuber & Partner GmbH, München, 2016
- [Esb18-ol] ESBERGER, D.: Aufwandsschätzung am Beispiel COCOMO II. Unter: http://wwwu.edu.uniklu.ac.at/desberge/docs/COCOMOII_DanielaEsberger.pdf, 22. Oktober 2018
- [Eve89] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 4 – Fertigung und Montage. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [EWS+94] EPPINGER, S. D.; WHITNEY, D.; SMITH, R.; GEBALA, D.: A Model-Based Method for Organizing Tasks in Product Development. In: Research in Engineering Design, March 1994 (6), Springer Verlag, London, 1994

- [Fah95] FAHRWINKEL, U.: Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich 5 – Wirtschaftswissenschaften, Universität-GH Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn 1995
- [FF15] FALLER, C.; FELDMÜLLER, D.: Industry 4.0 Learning Factory for regional SMEs. In: The 5th Conference on Learning Factories, Bochum, 2015
- [FG19-ol] FEES, E.; GÜNTHER, E.: Recycling – Definition. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/recycling-44989>, 29. Juni 2019
- [FGH+18] FAY, A.; GAUSEMEIER, J.; TEN HOMPEL, M. (HRSG.); BUSERT, T.; LEWIN, M.; JOPPEN, R.; MITTAG, T.; POTT, C.; WERNECKE, M.: Einordnung der Beispiele der Industrie 4.0-Landkarte in die Anwendungsszenarien. Acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, 2018
- [FGN+13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.; NAGARAJAH, A.; PAHL, G.; BEITZ, W.; WARTZACK, S.: Lösungsfindung – Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/ Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2013
- [Fin19-ol] FINANZTREFF (HRSG.): Börsenlexikon – Erklärung Risikoloser Zinssatz. Unter: <http://www.finanztreff.de/wissen/boersenlexikon/risikoloser-zinssatz/4913>, 26. März 2019
- [FKL+13] FEHLING, C.; KOLLMANN, T.; LACKES, R.; LEYMAN, R.; SPIERMANN: Kompakt-Lexikon Wirtschaftsinformatik – 1.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden. Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2013
- [FOS+18] FLEISCHMANN, A.; OPPL, S.; SCHMIDT, W.; STARY, C.: Ganzheitliche Digitalisierung von Prozessen: Perspektivenwechsel – Design Thinking – Wertgeleitete Interaktion. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2018
- [FSB08] FISCHER, J.; SPIEKERMANN, M.; BRANDT, C.: Grundlagen von Projektmanagementsystemen – Mit einer Einführung in SAP ERP PS. 6. Auflage, Innovation Publication, Bingen, 2008
- [Gab18a-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort: Systematik. Unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/17721/systematik-v8.html>, 28. Juli 2018
- [Gab18b-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort: Investition. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/investition-39454>, 13. September 2018
- [Gab18c-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort: Produktion. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/produktion-42040/version-181427>, 23. August 2018
- [Gab19-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (HRSG.): Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort: Garantie. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/garantie-33325>, 27. April 2019
- [GB12] GERICKE, K.; BLESSING, L.: An analysis of design process models across disciplines. In: Marjanović, D.; Štorga, M.; Pavković, N.; Bojčetić, N.; Škec, S. (Eds.): Proceedings of the DESIGN 2012, 12th International Design Conference, Dubrovnik, 2012
- [GBW+16] GRAUMANN, S.; BERTSCHEK, I.; WEBER, T.; OHNEMUS, J.: Wirkungen der Digitalisierung: Vorteile und Hemmnisse. In: Machnig, M. (Hrsg.): Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL 2016, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Königsdruck, Berlin, 2016
- [GDE+19] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; ECHTERFELD, J.; PFÄNDER, T.; STEFFEN, D.; THIELEMANN, F.: Innovationen für die Märkte von morgen – Strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen. Carl Hanser Verlag, München, 2019
- [GDJ+14] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; JASPERNEITE, J.; KÜHN, A.; TRSEK, H.: Auf dem Weg zur Industrie 4.0: Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL. it's OWL Clustermanagement, Paderborn, 2014

- [GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; WIEDERKEHR, O.; TSCHIRNER, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Heinz Nixdorf Institut, Fraunhofer IPT, Unity AG, Paderborn, 2013
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Hanser Verlag, München, 2001
- [GH13] GREGOR, S.; HEVNER, A. R.: Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact. In: MIS Quarterly, 2013
- [GKD+16] GAUSEMEIER, J.; KLOCKE, F.; DÜLME, C.; ECKELT, D.; KABASCI, P.; KOHLHUBER, M.; SCHÖN, N.; SCHRÖDER, S.: Industrie 4.0 – Internationaler Benchmark, Zukunftsoptionen und Handlungsempfehlungen für die Produktionsforschung. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Paderborn Aachen, 2016
- [GL14] GELDERMANN, J.; LERCHE, N.: Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung – Methode PROMETHEE. Georg-August-Universität, Göttingen, 2014
- [Gle17] GLEIBNER, W.: Simulationsmodelle und risikogerechte Bewertung von Strategien für Industrie 4.0. In: Lucks, K. (Hrsg.): Praxishandbuch Industrie 4.0: Branchen – Unternehmen – M&A. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2017
- [Gle19a-ol] GLEIBNER, W.: Unternehmenswert – Ausführliche Definition. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/unternehmenswert-48398>, 26. März 2019
- [Gle19b-ol] GLEIBNER, W.: Unternehmenswert – Ausführliche Definition. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/unternehmensbewertung-47294>, 26. März 2019
- [Got16] GOTTMANN, J.: Produktionscontrolling – Wertströme und Kosten optimieren. Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2016
- [Göt14] GÖTZE, U.: Investitionsrechnung – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Auflage, Springer Gabler Verlag, Berlin Heidelberg, 2014
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [Gre18-ol] GREENOUGH, J.: The 'Internet Of Things' Will Be The World's Most Massive Device Market And Save Companies Billions Of Dollars. Unter: <https://www.businessinsider.com.au/how-the-internet-of-things-market-will-grow-2014-10#vXjB3YQ6sM3VpmOu.99>, 14. September 2018
- [Gün19-ol] GÜNTER, E.: Recycling – Definition. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/recycling-44989>, 27. April 2019
- [GS12] GLATZEL, U.; SCHERM, F.: Metallische Werkstoffe. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GSM+15] GLEICH, R.; SCHWARZ, M.; MUNCK, J. C.; DEYLE, N.: Industrie 4.0 – zwischen Evolution und Revolution. In: Horváth, P.; Michel, U. (Hrsg.): Controlling im digitalen Zeitalter – Herausforderungen und Best-Practice-Lösungen. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2015
- [Han55] HANSEN, F.: Konstruktionssystematik – Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure. VEB Verlag Technik, Berlin, 1955
- [HC10] HEVNER, A. R.; CHATTERJEE, S.: Design Research in Information Systems – Theory and Practice. Volume 22, Springer Verlag, New York, 2010
- [HCD08] HOWARD, T. J.; CULLEY S. J.; DEKONINCK, E.: Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. In: Design Studies 29 (4), 2008

- [Hee14] HEESEN, B.: Wissenschaftliches Arbeiten – Methodenwissen für das Bachelor-, Master- und Promotionsstudium. 3. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2014
- [Hee16] HEESEN, S.: Investitionsrechnung für Praktiker – Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen. 3. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden, 2016
- [Hen15] HENKE, M.: Keine Industrie 4.0 ohne Management 4.0. In: Pistorius, S.; Kegel, G.; Röhrig, B.; Felser, W. (Hrsg.): Industrie 4.0 Kompakt II – Menschen und Maschinen für die kooperative Produktion von morgen. Ausgabe 16, NetSkill Solutions, Köln, 2015
- [Her68] HERTZ, D. B.: Investment policies that pay off. Harvard Business Review 1, 1968, S. 96-108
- [Hev07] HEVNER, A. R.: A Three Cycle View of Design Science Research. In: Scandinavian Journal of Information Systems, Volume 19, Issue 2, 2007
- [HH19] HENKE, M.; HILDEBRANDT, W.-C.: Editorial. In: Verband Deutscher Wirtschaftsingenieure (Hrsg.): Management der Industrie 4.0. 1. Auflage, Berlin, 2019
- [HHA13] HAHN, A.; HÄUSLER, S.; GROßE AUSTING, S.: Quantitatives Entwicklungsmanagement – Modellbasierte Analyse von Produktentwicklungsprozessen. Springer Verlag, Berlin, 2013
- [HMP+04] HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S.: Design Science in Information Systems Research. In: MIS Quarterly, 2004
- [HMR10] HELBING, K. W.; MUND, H.; REICHEL, M.: Handbuch Fabrikprojektierung. Springer Verlag, Berlin, 2010
- [Hor01] HORVÁTH I.: A contemporary survey of scientific research into engineering design. In: Culley S, et al. (eds) International Conference on Engineering Design (ICED'01). Glasgow, pp 13–20
- [HRW08] HEINEN, T.; RIMPAU, C.; WÖRN, A.: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme – Heute die Industrie von morgen gestalten. PZH, Produktionstechnisches Zentrum Garbsen, 2008, S. 19-32
- [Hub76] HUBKA, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse – Analyse der Konstruktionstätigkeiten. Springer Verlag, Berlin, 1976
- [Hun15] HUNDT, M.: Investitionsplanung unter unsicheren Einflussgrößen – Thermische Kraftwerke als Realoption. Springer Verlag, Wiesbaden, 2015
- [HWF+12] HABERFELLNER, R.; WECK DE, O. L.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. 12. Auflage, Orell Füssli Verlag, Zürich, 2012
- [HWF+15] HABERFELLNER, R.; WECK DE, O. L.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. 13. Auflage, Orell Füssli Verlag, Zürich, 2015
- [Ifp19-ol] INTERNATIONAL FUNCTION POINT USERS GROUP: Introduction. Unter: <http://www.ifpug.org/introduction/>, 10. Februar 2019
- [IPS+18] ILLNER, B.; PFENNING, P.; SCHMICH, S.; TREBES, D.; VÖLLINGER O.: Leitfaden Investitionsrechnung für Digitalisierungsprojekte und Industrie 4.0 Vorhaben. VDMA Business Advisory, Frankfurt am Main, 2018
- [ISO22400] ISO/FDIS 22400-2: Automation systems and integration – Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management – Part 2: Definitions and descriptions. ISO copyright office, Genf, 2014
- [Jan10] JANSCHKE, K.: Systementwurf mechatronischer Systeme. Methoden – Modelle – Konzepte. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- [JEG+19] JOPPEN, R.; VON ENZBERG, S.; GUNDLACH, J.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Key Performance Indicators in the Production of the Future. In: Butala, P.; Govekar, E.; Vrabic, R.; Roglej-

- Ritonja, A.; Bracun, D.; Kozjek, D.; Malus, A.; Selak, L.; Skulj, G. (Eds.): 52nd CIRP Manufacturing Systems Conference, Ljubljana, 2019
- [JEK+18a] JOPPEN, R.; VON ENZBERG, S.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: A practical Framework for the Optimization of Production Management Processes. In: Seliger, G.; Jawahir, I.S.; Badurdeen, F.; Kohl, H. (Eds.): 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Lexington, 2018
- [JEK+18b] JOPPEN, R.; VON ENZBERG, S.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Data Map - Method for the Specification of Data Flows. In: Teti, R. (Ed.): 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, 2018
- [JEK+19] JOPPEN, R.; VON ENZBERG, S.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Investitionsbewertung vor dem Hintergrund der Digitalisierung am Beispiel Schaltschrankbau. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Carl Hanser Verlag, Ausgabe 7-8, Band 114, München, 2019, S. 483-487
- [JJ10] JACCARD, J.; JACOBY, J.: Theory Construction and Model-Building Skills – a Practical Guide for Social Scientists. The Guilford Press, New York, 2010
- [JK+17] JOPPEN, R.; KÜHN, A.: Auf dem Weg zur Digitalisierung im mittelständischen Schaltschrankbau – Ein praxiserprobter Leitfaden. In: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Wissenschaft trifft Praxis – Digitale Produktionsmittel im Einsatz. Ausgabe 9, Begleitforschung Mittelstand-Digital WIK GmbH, Bad Honnef, 2017
- [JKH+18] JOPPEN, R.; KÜHN, A.; HUPACH, D.; DUMITRESCU, R.: Collecting Data in the Assessment of Investments within Production. In: Teti, R. (Ed.): 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, 2018
- [JLT+19] JOPPEN, R.; LIPSMEIER, A.; TEWES, C.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R.: Evaluation of investments in the digitalization of a production. In: Butala, P.; Govekar, E.; Vrabic, R.; Roglej-Ritonja, A.; Bracun, D.; Kozjek, D.; Malus, A.; Selak, L.; Skulj, G. (Eds.): 52nd CIRP Manufacturing Systems Conference, Ljubljana, 2019
- [JTK18] JOPPEN, R.; TEKAAT, J.; KÜHN, A.: Identification and Structuring of Benefits and Expenses for Evaluating the Profitability of Investments in Digitization within Production. In: Seliger, G.; Jawahir, I.S.; Badurdeen, F.; Kohl, H. (Eds.): 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Lexington, 2018
- [Joo06] JOOS-SACHSE, T.: Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement – Grundlagen – Instrumente - Neue Ansätze. 4. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2006
- [Kai14] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2014
- [KHL+11] KUSTER, J.; HUBER, E.; LIPPMANN, R.; SCHMID, A.; SCHNEIDER, E.; WITSCHI, U.; WÜST, R.: Handbuch Projektmanagement. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2011
- [KJR+18] KÜHN, A.; JOPPEN, R.; REINHART, F.; RÖLTGEN, D.; VON ENZBERG, S.; DUMITRESCU, R.: Analytics Canvas – A Framework for the Design and Specification of Data Analytics Projects. In: Laroche, F.; Bernard, A. (Eds.): 28th CIRP Design Conference, Nantes, 2018
- [KKG+14] KOCH, V.; KUGE, S.; GEISSBAUER, R.; SCHRAUF, S.: Industrie 4.0 - Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution, PWC, Frankfurt am Main, 2014
- [Kle11] KLEIN, A.: Risikomanagement und Risiko-Controlling. Haufe, Freiburg, 2011
- [KM13] KRÜCKHANS, B.; MAIER, H.: Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): Simulation in der Produktion und Logistik – Entscheidungsunterstützung der Planung bis zur Steuerung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 316, Paderborn, 2013

- [KMO+12] KIENER, S.; MAIER-SCHEUBECK, N.; OBERMAIER, R.; WEIß, M.: Produktions-Management – Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. 10. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2012
- [KMO+18] KIENER, S.; MAIER-SCHEUBECK, N.; OBERMAIER, R.; WEIß, M.: Produktionsmanagement: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. 11. Auflage, Walter de Gruyter GmbH, Berlin, 2018
- [KN97] KAPLAN, R.; NORTON, D.: Balanced Scorecard – Strategien erfolgreich umsetzen. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1997
- [Kof18] KOFLER, T.: Das digitale Unternehmen – Systematische Vorgehensweise zur zielgerichteten Digitalisierung. Springer Vieweg Verlag, Berlin, 2018
- [Kor10] KOREN, Y.: The Global Manufacturing Revolution – Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010
- [Kri10] KRISCHUN, S.: Total Cost of Ownership – Bedeutung für das internationale Beschaffungsmanagement. Diplomica Verlag, Hamburg, 2010
- [Kru11] KRUSCHWITZ, L.: Investitionsrechnung. 13. Auflage, De Gruyter Studium Verlag, Oldenbourg, 2011
- [Kuh+08] KUHN, H.: Grundkonzepte, Grundlagen – Planung logistischer Systeme – Konfigurationsplanung bei Zentrenproduktion. In: Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A. Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [LB15] LINGAU, V.; BRENNING, M.: Komplexität, Flexibilität und Unsicherheit – Konzeptionelle Herausforderungen für das Controlling durch Industrie 4.0. In: Horváth, P.; Reichmann, T.; Baumöl, T.; Hoffjan, A.; Möller, K.; Pedell, B. (Hrsg.): Controlling – Zeitschrift für Erfolgsorientierte Unternehmenssteuerung. Heft 8/9, Beck Verlag, München, 2015
- [LB91] LÜCKE, W.; BLOECH, J.: Investitionslexikon. 2. Auflage, Vahlen Verlag, München, 1991
- [LBP12] LANZA, G.; BEHMANN, B.; PETERS, S.: Bewertung von Herstellkosten. In: Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U. (Hrsg.). Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Hanser, München, 2012, S. 153–176
- [LCW16] LUFT, T.; LE CARDINAL, J.; WARTZACK, S.: Methoden der Entscheidungsfindung. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2016
- [Leh19-ol] LEHNER, F.: Software-Wartung. Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik Online-Lexikon. Unter: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/is-management/Systementwicklung/Hauptaktivitaeten-der-Systementwicklung/Software-Wartung>, 28. Juni 2019
- [Lie19-ol] LIES, J.: Service – Ausführliche Definition: In: Galber Wirtschaftslexikon – Grundlagen des Marketings. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/service-42239>, 27. April 2019
- [Lin07] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Systeme – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [Lin65] LINTNER, J.: The Valuation of Risk Assets and the Selection of Risky Investments in Stock Portfolios and Capital Budgets. In: The Review of Economics and Statistics, Vol. 47, No. 1, Februar 1965, Cambridge, The MIT Press, 1965, S. 13-37
- [Lot85] LOTTER, B.: Aufbau und Einsatz flexibler Montagesysteme. 6. Dt. Montagekongress, 24./24. 10. München, 1985
- [Mar52] MARKOWITZ, H. M.: Portfolio selection. Journal of Finance, Volume 7, American Finance Association, 1952, S. 77–91
- [Mar59] MARKOWITZ, H. M.: Portfolio selection: Efficient diversification of investments. Yale University Press, John Wiley & Sons, New York, 1959

- [Mau07] MAURER, M. S.: Structural Awareness in Complex Product Design, Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen, TU München, Verlag Dr. Hut, München, 2007
- [Mau17] MAUERER, J.: Studie Industrie 4.0 2017. IDG Business Media GmbH, München, 2017
- [MBS+05] MAURER, M.; BOESCH, N.-O.; SHENG, G.; TZONEV, B.: A Tool for Modelling flexible Product Structure – MOFLEPS. International Conference on Engineering Design ICED, Melbourne, 2005
- [MCB+15] MANYIKA, J.; CHUI, M.; BISSON, P.; WOETZEL, J.; DOBBS, R.; BUGHIN, J.; AHARON, D.: The Internet of Things – Mapping the Value Beyond the Hype, McKinsey Global Institute, 2015
- [MCB+17] MÜLLER, A.; CHOUDRY, S.; BORNSCHLEGL, M.; MANTWILL, F.: Der modulare Lebenszykluskosten-Baukasten – Eine praxisorientierte Methodenstrukturierung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Ausgabe 7-8, Band 112, Carl Hanser Verlag, München, 2017
- [Mec19-ol] MECKE, I.: Economies of Scope – Definition. In: In: Gabler Wirtschaftslexikon (Hrsg.). Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/economies-scope-36320>, 19. Dezember 2019
- [MHK11] MÖLLER, H. P.; HÜFNER, B.; KETTNIß, H.: Internes Rechnungswesen. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2011
- [Mit09] MITSCHLE, A.: Intelligente Methoden im Integrierten Risikomanagement. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Technische Universität Karlsruhe, Universitätsverlag, Karlsruhe, 2009
- [MS13] MEREDITH, J., R.; SHAFER, S. M.: Operations Management for MBAs. 5th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2013
- [Mül06] MÜLLER, D.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [Mül08] MÜLLER, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Utz, Band 209, München, 2008
- [Mül14] MÜLLER, D.: Investitionscontrolling. Springer Verlag, Berlin, 2014
- [Mül90] MÜLLER, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften – Systematik, Heuristik, Kreativität. Springer Verlag, Berlin, 1990
- [Nag14] NAGL, A.: Der Businessplan – Geschäftspläne professionell erstellen – Mit Checklisten und Fallbeispielen. 7. Auflage, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2014
- [Nak95] NAKAJIMA, S.: Management der Produktionseinrichtungen. Campus Verlag, Frankfurt am Main, 1995
- [Neb07] NEBL, T.: Produktionswirtschaft. 6. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2007
- [NHR+08] NYHUIS, P.; HEINEN, T.; REINHART, G.; RIMPENAU, C.; ABELE, E.; WÖRN, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 98, Ausgabe 1/2, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2008
- [Nie07] NIEMANN, J.: Eine Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Stuttgart, Jost-Jetter-Verl., Nr. 459, Heimsheim, 2007
- [NP18] NAUMANN, V.; PFLAUM, A.: Lebenszykluskosten und das Internet of Things. In: Konferenz zu Controlling, Accounting, Risiko, Finanzen. CARF Luzern, 2018
- [Obe15] OBERMAIER, R.: Wo ist das Kennzahlensystem 4.0?. Produktion Magazin – Intelligente Fabrik: Industrial Automation & IT, 07/2015

- [OHK15] OBERMAIER, R.; HOFMANN, J.; KIRSCH, V.: Konzeption einer Prozess- und Potenzialanalyse zur Ex-ante-Beurteilung von Industrie 4.0-Investitionen. Controlling, 27. Jahrgang 2015, Heft 8/9, Verlag C.H.BECK oHG, München, 2015
- [OR09] OLFERT, K.; REICHEL, C.: Investition. Kompendium der praktischen Betriebswirtschaft. 11. Auflage, Kiehl Verlag, Ludwigshafen, 2009
- [OR12] OPRESNIK, M. O.; RENNHAKE, C.: Grundlagen der Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre – Eine Einführung aus marketingorientierter Sicht. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012
- [Ose19-ol] OSER, P.: Bewertung – Definition. Unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/bewertung-27780>, 11. Mai 2019
- [PAA+17] PICCIRILLO, I. N.; DE ALMEIDA, L. F. M.; DE ARAÚJO, L. Q.; DA SILVA, S. L.: Design Structure Matrix and Project Management: bibliometric analysis. In: Management & Development Vol. 15, n. 2, 2017
- [Pau15] PAUL, J.: Praxisorientierte Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre – Mit Beispielen und Fallstudien. 3. Auflage, Springer Fachmedien Verlag, Wiesbaden, 2015
- [Paw16] PAWELLEK, G.: Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik: Vorgehensweisen, Methoden, Tools. 2. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Berlin, 2016
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, E.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [PD19-ol] PATIG, S.; DIBBERN, J.: Anforderungen. Unter: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/is-management/Systementwicklung/Hauptaktivitaeten-der-Systementwicklung/Problemanalyse-/Requirements-Engineering/index.html?searchterm=anforderung>, 29 Juni 2019
- [PE94] PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D.: Integration Analysis of Product Decompositions, Massachusetts, Cambridge, 1994
- [Pet15] PETERS, H.: Game Theory – A Multi-Leveled Approach. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2015
- [Pla19-ol] PLATTFORM INDUSTRIE 4.0: Industrie 4.0 Landkarte. Unter: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/In-der-Praxis/Anwendungsbeispiele/anwendungsbeispiele.html>, 2. Mai 2019
- [Pog15] POGGENSEE, K.: Investitionsrechnung. Grundlagen – Aufgaben – Lösungen. 3. Auflage, Springer Fachmedien Verlag, Wiesbaden, 2015
- [Pre08] PREIBLER, P.: Betriebswirtschaftliche Kennzahlen – Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Berlin, 2008
- [PTG+06] PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; GENGLER, C. E.; ROSSI, M.; HUI, W.; VIRTANEN, V.; BRAGGE, J.: The design science research process: A model for producing and presenting information systems research. In: Journal of Management Information Systems, Claremont, 2006
- [Püm92] PÜMPIN, C.: Das Dynamik-Prinzip – Zukunftsorientierungen für Unternehmen und Manager. ECON Taschenbuch Verlag, Düsseldorf, 1992
- [PZ07] PETERS, M. L.; ZELEWSKI, S.: TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse. In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium: WiSt – Zeitschrift für Studium und Forschung, Ausgabe 1/2007, C.H.BECK oHG Verlag, München, 2007, S. 9-15
- [RD09] RHENSIUS, T.; DÜNNEBACKE, D.: RFID – Business Case Calculation: 3-stufiges Vorgehen zur Planung und Bewertung des RFID-Einsatzes. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Edition Forschung. Aachen, 2009

- [Ref90] REFA- VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1990
- [Rei09] REIF, R.: Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Universitätsverlag, München, 2009
- [Rei16] REINHART, F.: Industrial Data Science – Data Science in der industriellen Anwendung. In: Industrie 4.0 Management. GITO mbH Verlag, Berlin, 2016,
- [RLG+15] RÜBMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M.: Industry 4.0 – The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. The Boston Consulting Group, 2015
- [RM05] ROSENKRANZ, F.; MISSLER-BEHR, M.: Unternehmensrisiken erkennen und managen – Einführung in die quantitative Planung. Springer Verlag, Berlin, 2005
- [Rog09] ROGALSKI, S.: Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen – Messung von Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität zur Bewältigung von Planungsunsicherheiten in der Produktion. Dissertation, Universitätsverlag Karlsruhe, Bd. 2, Karlsruhe, 2009
- [Röh07] RÖHRICH, M.: Grundlagen der Investitionsrechnung – Eine Darstellung anhand einer Fallstudie. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2007
- [Rud16] RUDTSCH, V.: Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 355, Paderborn, 2016
- [Saa08] SAATY, T. L.: Decision making with the analytic hierarchy process. In: Desheng, W. (Ed.): International Journal of Services Sciences, Ausgabe 1/2008, Genf, 2008, S: 83-98
- [SB09a] STETTER, R.; BLUM, T.: Verschläft der Deutsche Maschinenbau seine Chancen? – Mechatronische Möglichkeiten im internationalen Wettbewerb, 2009
- [SB09b] SCHAWEL, C.; BILLING, F.: Top 100 Management Tools – Das wichtigste Buch eines Managers. 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009
- [Sch05a] SCHUH, G.: Produktkomplexität managen – Strategien – Methoden – Tools, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2005
- [Sch05b] SCHWANINGER, M.: Systemorientiertes Design – ganzheitliche Perspektive in Innovationsprozessen. In: Schäppi, B.; Andreasen, M. M.; Kirchgeorg, M.; Radermacher, F.-J. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2005
- [Sch12] SCHNELL, H.: Produktionscontrolling: Bedeutung, Selbstverständnis, Aufgaben, Instrumente. In: Klein, A.; Schnell, H. (Hrsg.): Controlling in der Produktion – Grundlagen, Instrumente und Kennzahlen. Haufe-Lexware, München, 2012
- [Sch17] SCHIERBAUM, T.: Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 368, Paderborn, 2017
- [Sch18] SCHNEIDER, M.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung und Analyse von Wertschöpfungs-systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 386, Paderborn, 2018
- [SD16] SPATH, D.; DANGELMAIER, M.: Produktentwicklung Quo Vadis. In: Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2016

- [SGW+04] SCHUH, G.; GULDEN, A.; WEMHÖNER, N.; KAMPKER, A.: Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen – Kennzahlen zur Bewertung der Stückzahl-, Varianten- und Produktänderungsflexibilität auf Linienebene. In: wt Werkstatttechnik online, Ausgabe 6, VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf, 2004, S. 299-304
- [Sie17-ol] SIEMENS: Finetrading: verlängertes Zahlungsziel für Wareneinkäufe. Unter: <https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/financing/brochures/germany/sfs-gr-wc-finetrading-wareneinkauf-intelligent-finanziert.pdf>, 1. Oktober 2017
- [SL15] SIBBERTSEN, P.; LEHNE, H.: Statistik – Einführung für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2015
- [SPT14] SCHUH, G.; POTENTE, T.; THOMAS, C.: Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik – Anwendungen – Technologien – Migration. Springer Verlag, Wiesbaden, 2014
- [SR17] SCHUH, G.; RIESENER, M.: Produktkomplexität managen: Strategien – Methoden – Tools, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2017
- [SS09] SCHÖNSLEBEN, P.; SCHERER, E.: Produktionssteuerung in dezentralisierten Leistungsprozessen – Die betriebliche Realität am Übergang zwischen PPS und Wertschöpfung. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [SS16] SCHENTLER, P.; SCHWEIGER, J.: Wirtschaftlichkeitsberechnung von IT-Projekten im Einkauf. In: Der Controlling-Berater. Band 46. Haue Verlag, Freiburg, 2016
- [SSR15] SEITER, M.; SEJDIC, G.; RUSCH, M.: Welchen Einfluss hat Industrie 4.0 auf die Controlling-Prozesse?. In: Horváth, P.; Reichmann, T.; Baumöl, T.; Hoffjan, A.; Möller, K.; Pedell, B. (Hrsg.): Controlling – Zeitschrift für Erfolgsorientierte Unternehmenssteuerung, Heft 8/9, Verlag C.H.BECK Verlag, München, 2015
- [Sta18-ol] STATISTA – THE STATISTICS PORTAL: Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025 (in billions). Unter: <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>, 14. September 2018
- [Ste00] STEFAN, H.: Aktien-Einsteigerbuch. TM Börsenverlag AG, München, 2000
- [Ste81] STEWARD, D. V. The design structure system: a method for managing the design of complex systems. IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 28, no. 3, 1981, p. 71-74
- [Ste14] STEGER, J.: Kennzahlen und Kennzahlensysteme. NWB Verlag, Herne, 2014
- [Tas13] TASCHNER, A.: Business Cases – Ein anwendungsorientierter Leitfaden. 2. Auflage, Springer Fachmedien Verlag, Wiesbaden, 2013
- [Tas17] TASCHNER, A.: Business Cases. Ein anwendungsorientierter Leitfaden. 3. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden, 2017
- [Tav07] TAVASLI, S.: Six Sigma Performance Measurement System: Prozesscontrolling als Instrumentarium der modernen Unternehmensführung. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2007
- [TBN+13] TRIER, M.; BOBRIK, A.; NEUMANN, N.; WYSSUSSEK, B.: Systemtheorie und Modell. In: Krallmann, H.; Bobrik, A.; Levina, O. (Hrsg.): Systemanalyse im Unternehmen – Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik. 6. Auflage, Oldenbourg, München, 2013
- [TSW12] TILSTRA, A. H.; SEEPERSAD, C. C.; WOOD, K. L.: A high-definition design structure matrix (HDDSM) for the quantitative assessment of product architecture. In: Journal of Engineering Design. Taylor & Francis Group, London, 2012

- [UE95] ULRICH, K.; EPPINGER, S.: Product Design and Development. McGraw-Hill, Singapore, 1995
- [UY01] UPTON, N.; YATES, I.: Putting design research to work. In: Culley, S. (Ed.): International Conference on Engineering Design (ICED'01), Glasgow, 2001
- [Urb19-ol] URBACH, N.: Cloud Computing – Begriffsverständnis. Unter: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/uebergreifendes/Kontext-und-Grundlagen/Markt/Softwaremarkt/Geschäftsmodell-%28fur-Software-und-Services%29/Cloud-Computing/index.html/?searchterm=cloud>, 29. Juni 2019
- [Val05] VALERDI, R.: The Constructive Systems Engineering Cost Model (COSYSMO). Dissertation, The Faculty of the Graduate School, University of Southern California, Kalifornien, 2005
- [VDI2884] VDI-RICHTLINIE 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2005
- [VDI3633] VDI-RICHTLINIE 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2010
- [VDI4400] VDI-RICHTLINIE 4400, Blatt 2: Logistikkennzahlen für die Produktion. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004
- [VDI5200] VDI-RICHTLINIE 5200, Blatt 1: Fabrikplanung – Planungsvorgehen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2011
- [VWB+09] VAJNA, S.; WEBER, C.; BLEY, H.; ZEMAN, K.: CAX für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [WAD+16] WESTERMANN, T.; ANACKER, H.; DUMITRESCU, R.; CZAJA, A.: Reference architecture and maturity levels for cyber-physical systems in the mechanical engineering industry. In: International Symposium on Systems Engineering (ISSE) (Hrsg.): 2016 International Symposium on Systems Engineering, 3. – 5. Oktober 2016. IEEE, Edinburgh, 2016
- [WBH+96] WARNECKE, H. J.; BULLINGER, H.-J.; HICHERT, R.; VOEGELE, A.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. 3. Auflage, Carl Hanser-Verlag, München, 1996
- [Wel19a-ol] WELT-DER-BWL: Annuität – Definition. Unter: <https://welt-der-bwl.de/Annuität>, 12. März 2019
- [Wel19b-ol] WELT-DER-BWL: Risikoloser Zinssatz – Definition. Unter: <https://welt-der-bwl.de/Risikoloser-Zinssatz>, 26. März 2019
- [Wel19c-ol] WELT-DER-BWL: Return on Investment (ROI) – Definition. Unter: <https://welt-der-bwl.de/ROI-Return-on-Investment>, 9. September 2019
- [Wes17] WESTERMANN, T.: Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe Band 375, Paderborn, 2017
- [Wie06] WIELENBERG, S.: Externe Unternehmensrechnung. In: Becker, F. (Hrsg.): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [Wie14] WIENDAHL, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 8. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [Wir19a-ol] WIRTSCHAFTSLEXIKON24.COM (Hrsg.): Marktpreisrisiko. Unter: <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/marktpreisrisiko/marktpreisrisiko.htm>, 26. März 2019
- [Wir19b-ol] WIRTSCHAFTSLEXIKON24.COM (Hrsg.): Risikodiversifikation. Unter: <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/risikodiversifikation/risikodiversifikation.htm>, 26. März 2019
- [WKB14] WEBER, W.; KABST, R.; BAUM, M.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. 9. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden, 2014

- [WKK+13] WITTE, C.; KLUMPP, M.; KEUSCHEN, T.; ZELEWSKI, S.: AHP-Analyse der Prozessanpassungen in der Logistik beim Einsatz von Elektronutzfahrzeugen. In: Schenk, M.; Zadek, H.; Müller, G.; Richter, K.; Seidel, H. (Hrsg.): 18. Magdeburger Logistiktage „Sichere und nachhaltige Logistik“. Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Magdeburg, 2013
- [WM11] WIECZORREK, H. W.; MERTENS, P.: Management von IT-Projekten – Von der Planung zur Realisierung. 4. Auflage, Springer Verlag, 2011
- [WNK+05] WIENDAHL, H.-P.; NOFEN, D.; KLUßMANN, J. H.; BREITENBACH, F.: Planung modularer Fabriken – Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Hanser Verlag, München, 2005
- [Wöh13] WÖHE, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaft. 25. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 2013
- [WRN14] WIENDAHL, H.-P.; REICHARDT, J.; NYHUIS, P.: Handbuch Fabrikplanung – Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2014
- [WWB15] WISCHMANN, S.; WANGLER, L.; BOTTHOFF, A.: Industrie 4.0 – Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland. Loesch Hund Liepold Kommunikation GmbH, Berlin, 2015
- [Zan76] ZANGEMEISTER, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 4. Auflage, Wittemann, München, 1976

Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1	Ergänzungen zur Problemanalyse..... A-1
A2	Ergänzungen zum Stand der Technik A-3
A2.1	Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices..... A-3
A2.2	Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen A-5
A2.3	Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase A-6
A2.4	Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie A-8
A2.5	Modularer Lebenszykluskosten-Baukasten..... A-9
A2.6	Leitfaden Investitionskonzepte A-10
A2.7	Constructive Cost Model A-11
A2.8	Netzplantechnik..... A-13
A2.9	Ansatz zur Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen ... A-14
A3	Ergänzungen zur Systematik..... A-17
A3.1	Beispielhafte Anwendungen des Referenzmodells einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion A-17
A3.2	Anwendung der Merkmale von Investitionsobjekten A-19
A3.3	Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion A-21
A3.4	Vollständiger Kostenkatalog..... A-23
A3.5	Workshopkarte für Annahmen und Rahmenbedingungen A-27
A3.6	Steckbriefe zu Berechnungsmethoden A-27

A1 Ergänzungen zur Problemanalyse

Im Folgenden wird eine Ergänzung zur Problemanalyse (Kapitel 3) beschrieben. Das **Polylemma der Fertigungssteuerung** stellt den Zielkonflikt zwischen Leistung, Durchlaufzeiten, Kosten und Termintreue in der Fertigung qualitativ dar. Der Bestand ist dabei die erklärende Variable. Alle beschriebenen Verläufe haben ein individuelles Optimum, d.h. ein Minimum bzw. ein Maximum [Wie14, S. 266]. Dargestellt ist das Polylemma der Fertigungssteuerung in Bild A-1.

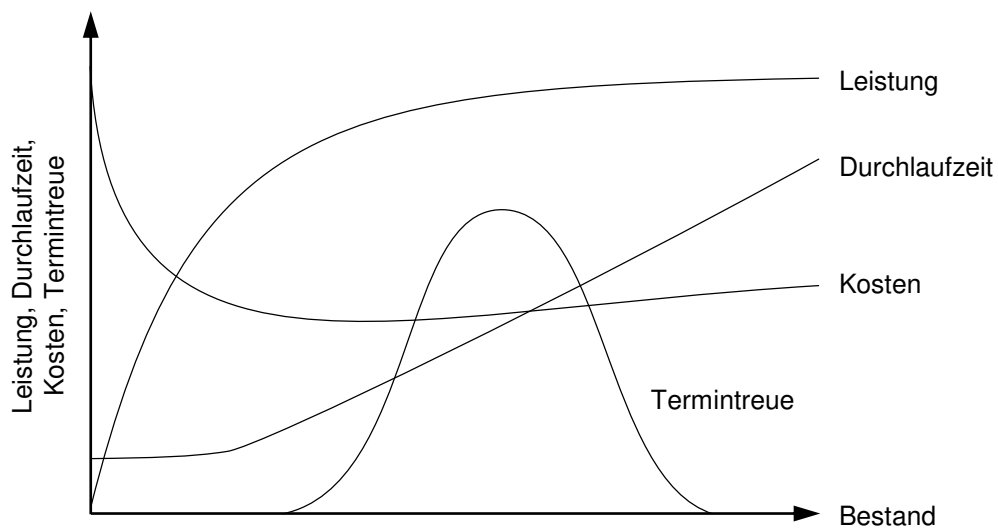


Bild A-1: Polylemma der Fertigungssteuerung nach [Wie14, S. 266]

Die Leistung des Systems steigt zunächst mit steigendem Bestand und konvergiert schließlich. Der Grund dafür ist, dass mit steigendem Bestand auch die Materialverfügbarkeit und somit die Auslastung der Ressourcen steigen. Sind die Ressourcen ab einem bestimmten Punkt vollständig ausgelastet, kann der Mehrbestand nicht genutzt werden. Dementgegen führt die steigende Leistung zu einem nahezu inversen Verlauf der Stückkosten. Die Stückkosten fallen zunächst mit steigendem Bestand schnell ab. Da die Leistung ab einem gewissen Punkt nicht mehr steigt, erhöhen sich die Stückkosten wieder leicht. Der Grund sind die steigenden Bestandskosten. Die Durchlaufzeit verläuft zunächst nahezu horizontal. Die erhöhten Liegezeiten des Materials führen im weiteren Verlauf zu einem linearen Anstieg der Durchlaufzeit mit dem Bestand. Schließlich lässt sich der Verlauf der Termintreue mit einer Normalverteilung beschreiben. Auf Grund einer erhöhten Materialverfügbarkeit steigt die Termintreue zunächst mit steigendem Bestand an. Da die Liegezeiten auf Grund des erhöhten Bestands steigen, fällt die Termintreue wieder ab [Wie14, S. 255ff.].

A2 Ergänzungen zum Stand der Technik

Im Folgenden werden Ergänzungen zum Stand der Technik beschrieben. Das sind Ansätze, welche ähnliche Ideen wie die bereits in Kapitel 4 beschriebenen Ansätze verfolgen.

A2.1 Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices

SCHIERBAUM entwickelte eine Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Die Systematik gliedert sich in ein Vorgehensmodell, ein Kostenmodell, eine Modellierungssprache und ein Konzept für die Werkzeugunterstützung. Das Vorgehensmodell strukturiert die zu tätigen Aufgaben und ergänzenden Hilfsmittel in einen zeitlichen Kontext [Sch17, S.79f.]. Dargestellt ist das Vorgehensmodell in Bild A-2.

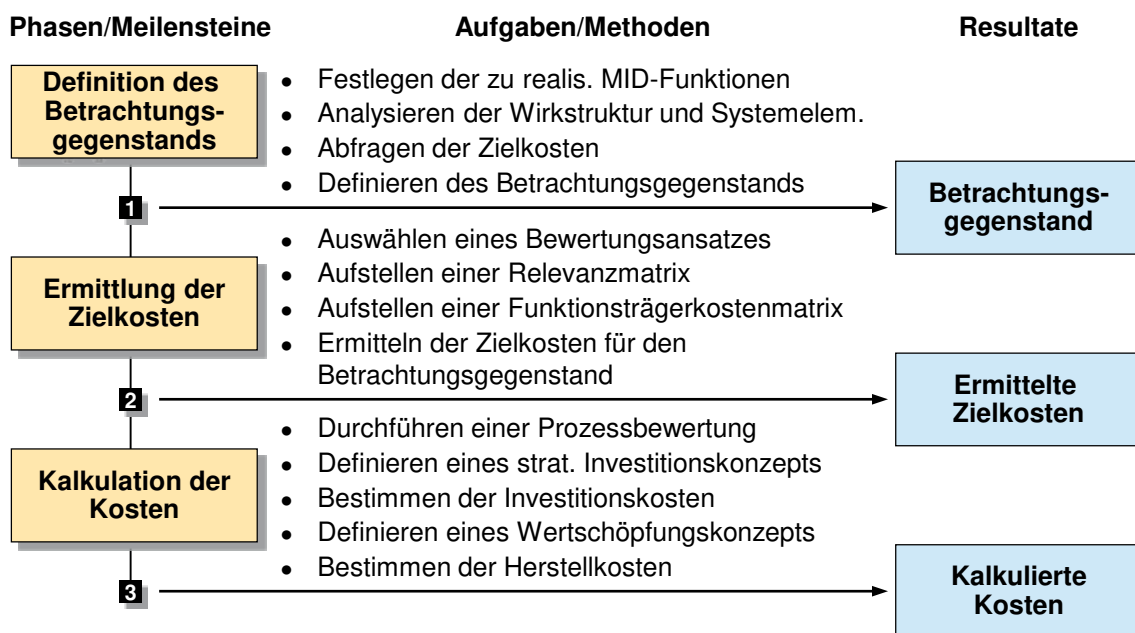


Bild A-2: Vorgehen zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices nach [Sch17, S. 80]

Grundlage der Systematik ist ein Entwicklungsstand von mechatronischen Systemen, bei dem eine Anforderungs-, Umfeld- und Funktionsbeschreibung bereits erfolgt ist und idealerweise ein Entwicklungsauftrag vorliegt. Die Wirkungsweise des Systems ist noch nicht spezifiziert. Die folgende Kostenbewertung ist parallel zur Konzipierung von Produkt und Produktionssystem durchzuführen [Sch17, S. 80f.].

Die erste Phase ist die **Definition des Betrachtungsgegenstands**. In diesem Rahmen werden zunächst die zu realisierenden MID-Funktionen festgelegt. Dies wird in Form

einer Funktionshierarchie dokumentiert. Anschließend werden geeignete Lösungen zu den identifizierten MID-Funktionen in Form eines morphologischen Kastens zugeordnet. Nach der Ermittlung weiterer relevanter Funktionen wird die Wirkstruktur modelliert und analysiert. Dazu wird die CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems (CONSENS) eingesetzt. Weiterhin gilt es die Bauteile zu analysieren, welche neben dem eigentlichen MID-Bauteil Teil des Betrachtungsgegenstands sind. Abschließend sind die Zielkosten aus dem Entwicklungsauftrag bzw. aus der Anforderungsliste zu entnehmen und zu dokumentieren. Das Resultat der ersten Phase ist der definierte Betrachtungsgegenstand für die Kostenbewertung [Sch17, S. 83ff.].

Phase 2 ist die **Ermittlung der Zielkosten**. Grundlage für die Ermittlung der Zielkosten sind die Gesamt-Zielkosten, welche aus dem Entwicklungsauftrag zu entnehmen sind. Daraus werden die Teilzielkosten ermittelt. Es wird zunächst der Hauptfunktionserfüllungsgrad des Funktionsbündels des Betrachtungsgegenstands ermittelt, wozu ein Bewertungsansatz auszuwählen ist. Vorgestellt werden der Bottom-Up-Ansatz, Top-Down-Ansatz und der Überschlagsansatz. Weiterhin wird der Erfüllungsanteil an der Hauptfunktion jeder Funktion mit Hilfe einer Relevanzmatrix ermittelt. Darüber hinaus wird eine Funktionsträgerkostenmatrix mit den Funktionen und Systemelementen des Betrachtungsgegenstands erstellt. Das Resultat der zweiten Phase sind die ermittelten Zielkosten [Sch17, S. 87].

Die abschließende dritte Phase ist die **Kalkulation der Kosten**. Die betrachteten Bestandteile sind Material-, Fertigungs- und Investitionskosten. Zur Prüfung von Investitionskosten wird ein Investitionskonzept erarbeitet. Dazu wird eine Prozessbewertung durchgeführt und in einem Prozessportfolio zusammengefasst. Dies hat die Achsen relative Kompetenzen und relative Kapazitäten. Im Anschluss werden die Investitionskosten mit Hilfe eines Kostenplans bestimmt. Darauf aufbauend wird ein strategisches Investitionskonzept erarbeitet. Es gilt eine Make-Or-Buy Entscheidung zu tätigen. Anschließend wird das Wertschöpfungskonzept mit Hilfe der Methode OMEGA spezifiziert. OMEGA steht für **O**bjektorientierte **M**ethode zur **G**eschäftsprozessmodellierung und -analyse nach [Fah95] bzw. [GP14]. Abschließend werden die Herstellkosten bestimmt. Resultat der dritten Phase sind die kalkulierten Kosten und daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen [Sch17, S. 87ff.].

Bewertung: SCHIERBAUM stellt eine Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices vor. Wie bei dem Ansatz von RHENSIUS ET AL., ist der Ansatz von SCHIERBAUM stark auf eine Technologie fokussiert, in diesem Fall Molded Interconnect Devices. Wie zuvor, ist somit die Übertragbarkeit auf andere Industrie 4.0 Anwendungen nicht einfach gegeben. Weiterhin wird der Nutzen der potentiellen Investition nicht bewertet.

A2.2 Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen

NIEMANN entwickelte eine Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen. Kern der Arbeit ist ein Regelkreis zum Kostenvergleich von alternativen Produktionsszenarien [Nie07].

Im Rahmen der Planung werden zu Beginn sogenannte Kapazitätspakete für das Produktionssystem gebildet. Grundlage dafür sind die herzustellenden Produkte. Die Kapazitätspakete sind die benötigten Kapazitäten der Fertigungsverfahren, welche über eine oder mehrere Ressourcen abgebildet werden müssen. Anschließend werden die ermittelten Kapazitäten mit den verfügbaren Nenn-Kapazitäten aus einem Referenzmodell in einer Vor-kalkulation und Investitionsplanung verglichen. Das Referenzmodell beinhaltet die Ressourcen, Kosten und Strukturen und gibt somit neben den Kosten auch die Systemkonfiguration und Zeiten vor [Nie07, S. 95ff.].

Nach der Planung folgt die Systemoptimierung. Es werden alternative Produktionsszenarien bzw. alternative Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Effizienz bzw. Wirtschaftlichkeit miteinander verglichen. Dazu werden Verbesserungsmaßnahmen identifiziert und das Betriebsverhalten simuliert. Eine Bewertung erfolgt anhand eines Stückkostenvergleichs zwischen dem ursprünglichen und simulierten Produktionsszenario bzw. -system [Nie07, S. 97].

Mit einer einhergehenden Nachkalkulation ermöglicht die durchgängige Überwachung der Betriebsdaten die Planungstätigkeiten in einen geschlossenen Regelkreis zu überführen. Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung werden die Ergebnisse dann im nächsten Durchlauf des Kreislaufs als Planungsgrundlage für zukünftige Kalkulationen genutzt. Bild A-3 zeigt den Regelkreis zum Life Cycle Controlling von Produktionssystemen nach [Nie07, S. 96f.].

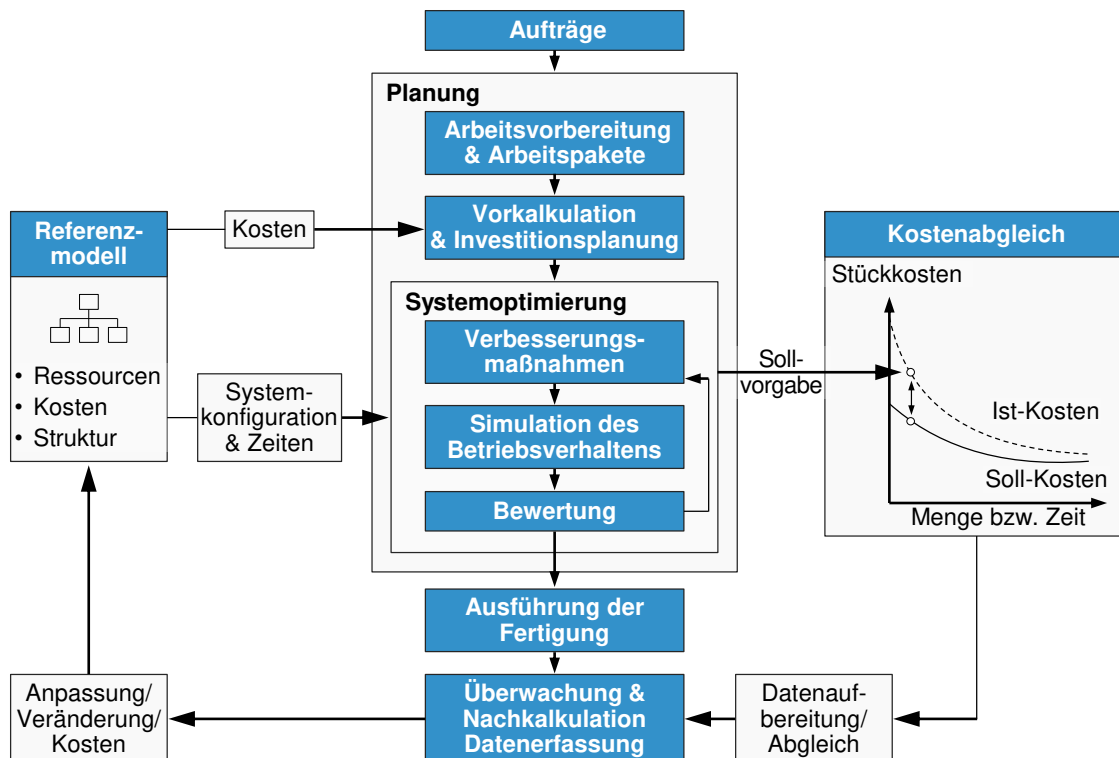


Bild A-3: Regelkreis zum Life Cycle Controlling nach NIEMANN [Nie07, S. 96]

Bewertung: Grundlage der Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen nach NIEMANN ist eine systematische Aufbereitung der Daten zu einem umfassenden Bild über das Produktionssystem. Somit können Veränderungen durch eine Investition in der Produktion ermittelt und bewertet werden.

Zentrale Herausforderung bei der Anwendung des Life Cycle Controllings sind jedoch der Aufwand des Ansatzes und die Nachvollziehbarkeit auf Grund des Simulationsansatzes. Weiterhin gibt es keine Unterstützung bei der Spezifikation des Investitionsobjekts und der Datenaufnahme.

A2.3 Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase

RUDTSCH entwickelte eine Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Das Ziel der Methodik ist es Produktionssystemkonzepte zu bewerten. Dies gilt nicht für vollständig geplante Produktionssysteme [Rud16].

Ein Vorgehensmodell beschreibt die durchzuführenden Tätigkeiten und die einzusetzenden Methoden. Ergänzt wird dies durch ein Analysemodell und eine Spezifikationstechnik. Das Analysemodell fasst die notwendigen Methoden zusammen, welche zur Bewertung des Produktionssystemkonzepts erforderlich sind. Die Spezifikationstechnik ist eine Notation zur Beschreibung des Verhaltens eines Produktionssystems. Das Vorgehen ist in vier Phasen gegliedert [Rud16, S. 85f.]. Es ist in Bild A-4 dargestellt.

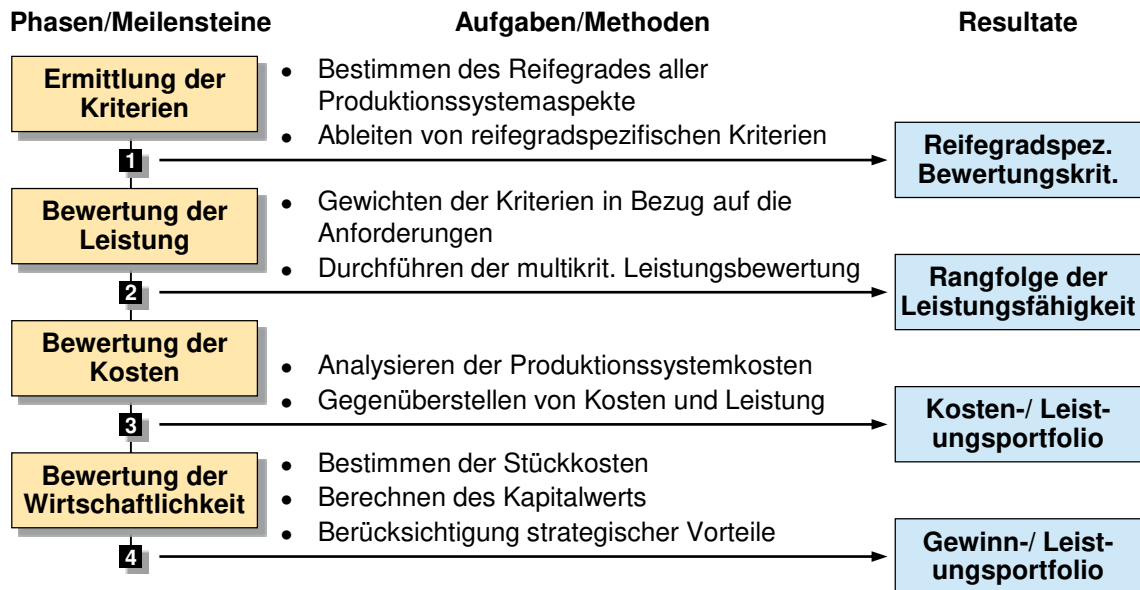


Bild A-4: Vorgehen zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase nach [Rud16, S. 86]

Die erste Phase ist die **Ermittlung der Kriterien**. Dafür wird zunächst eine Bewertung des Produktionssystem-Reifegrads durchgeführt. Es wird ein Reifegrad für die Prozesse, ein Reifegrad für die Ressourcen, ein Reifegrad für die Gestalt und ein Reifegrad für das Verhalten des Produktionssystems erarbeitet. Entsprechend der Reifegrade werden Kriterien zur Leistungsbewertung abgeleitet [Rud16, S. 89ff.].

Phase 2 ist die **Bewertung der Leistung**. Es ist zunächst der Einfluss der einzelnen Kriterien auf die Gesamtbewertung zu bestimmen. Dafür wird eine Gewichtungsmatrix aufgestellt und ein paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien durchgeführt. Die Bildung des Eigenvektors ermöglicht die Ableitung einer Rangfolge. Anschließend wird der Erfüllungsgrad der Produktionssystemalternativen bestimmt. Die Produktionssystemalternativen werden in einer Matrix für jedes Kriterium gegenübergestellt und ein paarweiser Vergleich wird durchgeführt. Durch Bildung eines Eigenvektors wird die relative, wahrgenommene Leistungsfähigkeit ermittelt [Rud16, S. 115ff.].

In der dritten Phase wird die **Bewertung der Kosten** durchgeführt. Diese sollen den wahrgenommenen Leistungsfähigkeiten der Produktionssystemalternativen gegenübergestellt werden. Es werden jeweils die Kosten für Technologiekompetenzen, die Kosten für die Ressourcen und die Kosten für die Infrastruktur erfasst. Diese werden normiert und der Leistungsbewertung in einem Kosten-/Leistungsportfolio gegenübergestellt [Rud16, S. 125ff.].

Phase 4 schließt mit der **Bewertung der Wirtschaftlichkeit** ab. In diesem Rahmen werden zunächst die Produktionsstückkosten bestimmt. Abgebildet wird dies in Form einer Produktionsmengen-Stückkostenfunktion. Anschließend wird der Kapitalwert für die alternativen Produktionskonzepte bestimmt. Schließlich wird ein Gewinn-/Leistungsport-

folio mit Hilfe des Analytic Hierarchy Process (AHP) erstellt. Das Portfolio sieht Normstrategien zum Umgang mit den Alternativen entsprechend ihrer Platzierung vor [Rud16, S. 137ff.].

Bewertung: Die von RUDTSCH entwickelte Methodik ermöglicht eine Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Für eine Bewertung muss das Produktionssystem noch nicht vollständig geplant werden. Es reicht ein Konzept.

Der Fokus der Methode impliziert, dass es sich um ein neues zu planendes Produktionssystem handelt. Es werden somit keine Restriktionen der bestehenden Infrastruktur berücksichtigt. Dies erlaubt keine Übertragbarkeit auf die Bewertung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in einer bestehenden Produktion.

A2.4 Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie

BREDOW entwickelte eine Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie. Ziel ist zum einen eine Bewertung der Vorteilhaftigkeit einer Wertschöpfungskonfiguration. Zum anderen können alternative Wertschöpfungskonfigurationen miteinander verglichen werden. Weiterhin kann die Wirksamkeit von Risikosteuerungsmaßnahmen bewertet werden [Bre12, S. 118]. Dazu ist ein Vorgehen mit vier Phasen vorgesehen. Dies ist in Bild A-5 dargestellt.

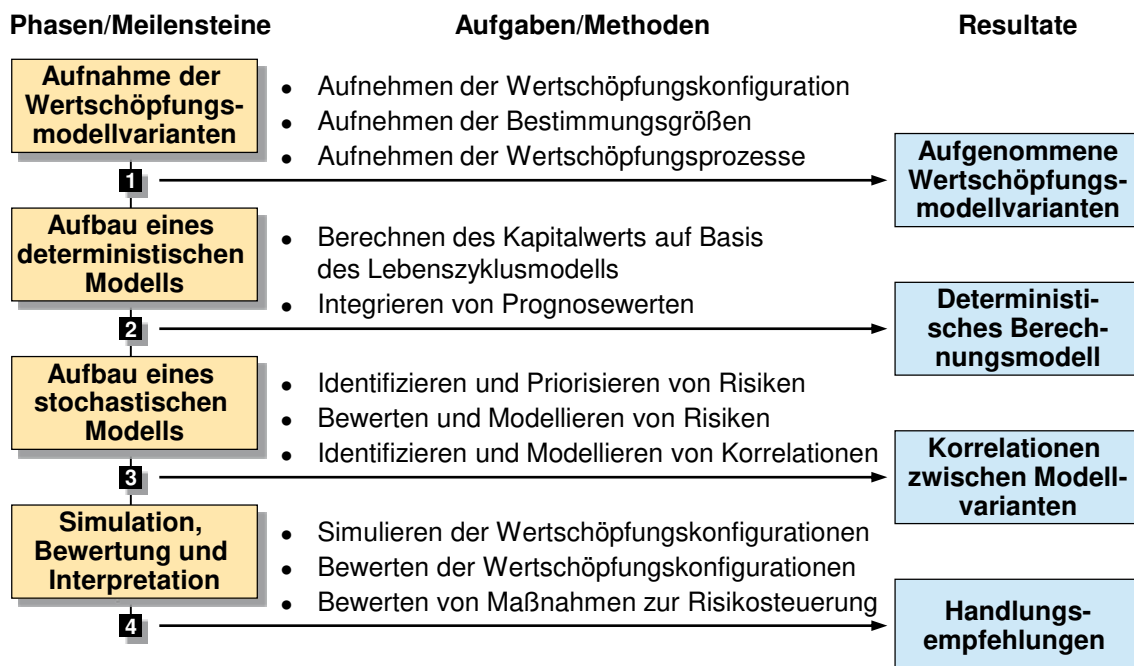


Bild A-5: Vorgehen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos von Wertschöpfungskonfigurationen [Bre12, S. 87]

Phase 1 ist die **Aufnahme der Wertschöpfungsmodellvarianten**. Dafür werden die Struktur der Wertschöpfungskonfigurationen erfasst und die Bestimmungsgrößen der Kunden-Lieferanten-Beziehungen (KLB) aufgenommen. Dazu werden wesentliche Bestimmungsgrößen der KLB vorgegeben. Weiterhin werden die Wertschöpfungsprozesse aufgenommen. Dies geschieht bspw. in Form einer Wertstromanalyse. Das Resultat der ersten Phase sind die aufgenommenen Wertschöpfungsmodellvarianten [Bre12, S. 88ff.].

Phase 2 ist der **Aufbau eines deterministischen Modells**. Dies basiert auf der Berechnung des Kapitalwerts. Er liefert die Grundlage für die Investitionsbewertung. Der Kapitalwert wird auf Basis eines Lebenszyklusmodells berechnet. Dies berücksichtigt alle relevanten Faktoren der unternehmensübergreifenden Wertschöpfung über den Lebenszyklus hinweg. Weiterhin werden Prognosewerte für die zentralen Faktoren des Berechnungsmodells integriert. Resultat der Phase ist ein deterministisches Berechnungsmodell [Bre12, S. 93ff.].

Phase 3 ist der **Aufbau eines stochastischen Modells**. In diesem Zusammenhang werden zunächst Risiken und Chancen identifiziert und priorisiert. Risiken sind negative Abweichungen, während Chancen positive Abweichungen von der antizipierten Zielgröße darstellen. Weiterhin werden die Risiken und Chancen bewertet und modelliert. Schließlich werden Korrelationen zwischen den Parametern des Modells identifiziert und modelliert. Diese führen i.d.R. zu extremen Ergebnissen. Zentraler Fokus der Abbildung der Korrelation ist die Vermeidung von inkonsistenten Szenarien [Bre12, S. 99ff.].

Phase 4 beschreibt die **Simulation, Bewertung und Interpretation**. Die Wertschöpfungskonfigurationen werden simuliert und bewertet. Ergebnis ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung an möglichen Kapitalwerten für die alternativen Wertschöpfungskonfigurationen. Weiterhin werden Maßnahmen zur Steuerung des Risikos beschrieben und bewertet [Bre12, S. 9108ff.].

Bewertung: Die Methode nach BREDOW ermöglicht eine Bewertung der Vorteilhaftigkeit einer Wertschöpfungskonfiguration sowie einen Vergleich alternativer Wertschöpfungskonfigurationen.

Eine zentrale Herausforderung wird in der Arbeit adressiert: *Häufig liegen historische Daten nicht in ausreichender Güte vor, um einen Korrelationskoeffizienten zu errechnen* [Bre12, S. 106]. Dies wird auch für andere Schritte der Methode gelten. Die Methode ist fokussiert auf Wertschöpfungskonfigurationen. Sie lässt sich nicht direkt auf einzelne Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in einer Produktion übertragen.

A2.5 Modularer Lebenszykluskosten-Baukasten

MUELLER ET AL. stellen einen Ansatz für einen modularen Lebenszykluskosten-Baukasten vor. Grundlage des Baukastens ist die Lebenszykluskostenrechnung. Der Ansatz unterstützt die Auswahl von Methoden zur Ermittlung der Lebenszykluskosten auf Basis der technischen Möglichkeiten und der Informationsverfügbarkeit. Der Baukasten ist eine

Abwandlung des morphologischen Kastens [MCB+17, S. 501f.]. Dargestellt ist der Ansatz in Bild A-6.

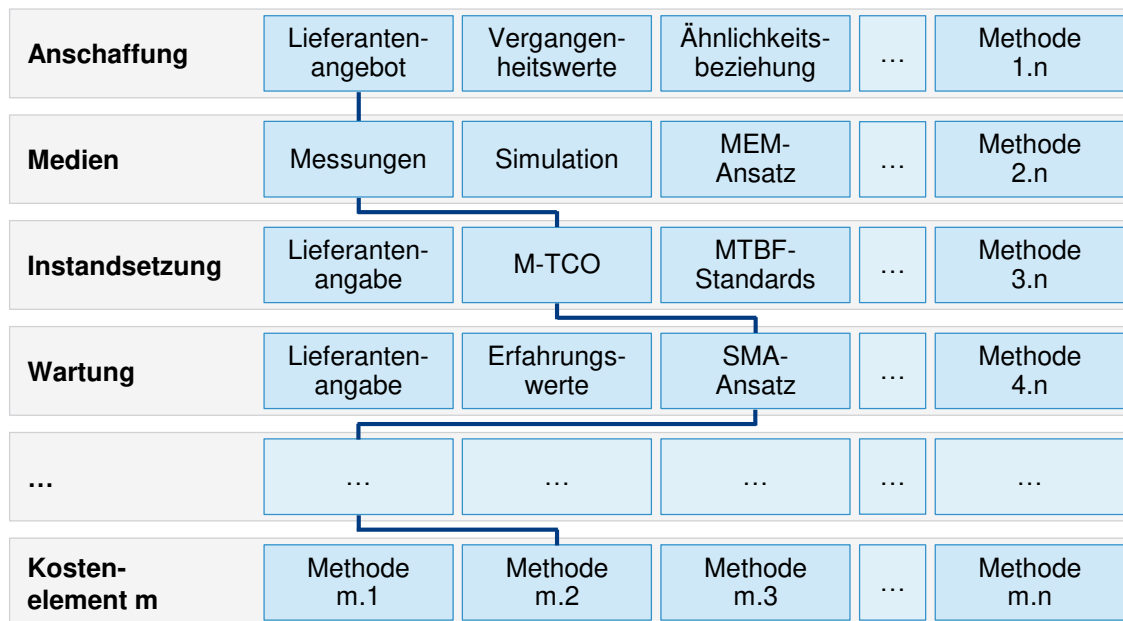


Bild A-6: Darstellung des modularen Lebenszykluskosten-Baukastens mit exemplarischer Ausprägung nach [MCB+17, S. 503]

Den einzelnen Lebenszyklusphasen werden im Rahmen des Ansatzes Methoden zur Berechnung der Kosten zugeordnet. So lassen sich bspw. im Rahmen der Anschaffung die Kosten auf Basis von Lieferantenangeboten, Vergangenheitswerten oder Ähnlichkeitsbeziehungen ermitteln. Im Rahmen der Phase der Medien lassen sich Messungen, Simulationen und die Methods-Energy-Measurement (MEM) Methode nach [BBF16] einsetzen.

Bewertung: Der von MUELLER ET AL. vorgestellte Lebenszyklusbaukasten ist ein Ansatz zur Strukturierung von Methoden im Rahmen der Lebenszykluskostenrechnung. Der Ansatz listet die Methoden entsprechend ihrer Einsetzbarkeit im Lebenszyklus auf. Eine weitere Unterstützung hinsichtlich der Auswahl einer Methode wird nicht beschrieben. Auch werden die Methoden an sich nicht beschrieben. Darüber hinaus wird die Bewertung des Nutzens nicht berücksichtigt. Somit ist keine Übertragbarkeit auf die ganzheitliche Bewertung von Investitionen in Industrie 4.0 Anwendungen in einer Produktion möglich.

A2.6 Leitfaden Investitionskonzepte

Im Rahmen des Kompetenzzentrums DIGITAL IN NRW wurde ein Leitfaden Investitionskonzepte erarbeitet. Ziel des Leitfadens ist eine schrittweise Projektplanung bis zur Erstellung eines Business Cases für Digitalisierungsprojekte. Dabei sind fünf Schritte zu durchlaufen [BP19 S. 2].

Im ersten Schritt ist das Projektvorhaben zu beschreiben. Die Projekthinhalte, der Zeitrahmen, die Verantwortlichkeiten sowie das verfügbare Budget sind festzuhalten. Im zweiten Schritt ist eine Art Reifegradmodell für das Unternehmen zu erstellen. Es werden die Bewertungsdimensionen „Kundenzufriedenheit“, „Flexibilität“, „Transparenz intern“, „Transparenz extern“, „Effizienz“ und „Unternehmensklima“ vorgeschlagen. In den Dimensionen sind die aktuelle Situation sowie die Zielvorstellung auf einer Skala von eins bis fünf zu bewerten. Dabei sind der Umsetzungsaufwand zur Erreichung der Zielsituation sowie der resultierende Nutzen zu bewerten. Im anschließenden Schritt ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu analysieren. Es sind nicht nur projektbezogene Kosten zu berücksichtigen, sondern auch die allgemeine Situation qualitativ einzuschätzen. Schritt vier stellt die Risikoabschätzung dar. Die Wahrscheinlichkeit sowie die Auswirkungen verschiedener möglicher Risiken sind zu bewerten. Als Beispiel wird die Mitarbeiterakzeptanz bzgl. der zu bewertenden Investition angeführt. Der letzte Schritt stellt die Auswertung dar. Die Grundlage dafür sind die Kosten-Nutzenanalyse und die Risikoabschätzung [BP19, S. 3ff.].

Bewertung: Der Leitfaden Investitionskonzepte stellt ein grobes Vorgehen zur Bewertung von Investitionen dar. Es wird nahezu keinerlei methodische Unterstützung geliefert. Bspw. wird keine Unterstützung bei der Bewertung des Umsetzungsaufwands oder des Nutzens von Investitionen aufgezeigt. Gleiches gilt für die Durchführung der Risikoabschätzung und der Auswertung.

A2.7 Constructive Cost Model

Das Constructive Cost Model (COCOMO) ist eine auf Erfahrungswissen basierende Methode zur Schätzung des Aufwands eines IT-Projekts. Mit Hilfe von empirischen Untersuchungen erkannte BOEHM Ende der siebziger Jahre einen funktionalen Zusammenhang zwischen IT-Systemgrößen und dem Erstellungsaufwand einer Software. Ein Beispiel für eine IT-Systemgröße ist die Anzahl an Codezeilen. Grundlegende Änderungen in der Softwareentwicklung erforderten eine Überarbeitung des Modells. Im Jahr 2000 wurde COCOMO II veröffentlicht. COCOMO II zählt zu den algorithmischen Modellen zur Kosten- und Aufwandsschätzung von Software (vgl. Kapitel 4.2.3.1) [Esb18-ol, S. 3f.].

Eine zentrale Annahme des Modells ist, je höher die Entwicklungsstufe und das Fortschreiten des Projektes, umso genauer kann die Abschätzung erfolgen. Entsprechend des Fortschritts kommt eins der drei folgenden Teilmodelle zum Einsatz: Application Composition Model, Early Design Model, Post-Architecture Model. Bild A-7 zeigt die Phasen und Meilensteine eines Softwareentwicklungsprojekts. Es wird sowohl aufgezeigt, welches der drei Teilmodelle in welcher Phase einzusetzen ist, als auch wie genau die Abschätzung ist. Dabei steht die relative Größe der Software (in Form von Anzahl an Codezeilen) in Korrelation zu der Kostenschätzung [BH00, S.10ff.], [Bur18, S.217f.].

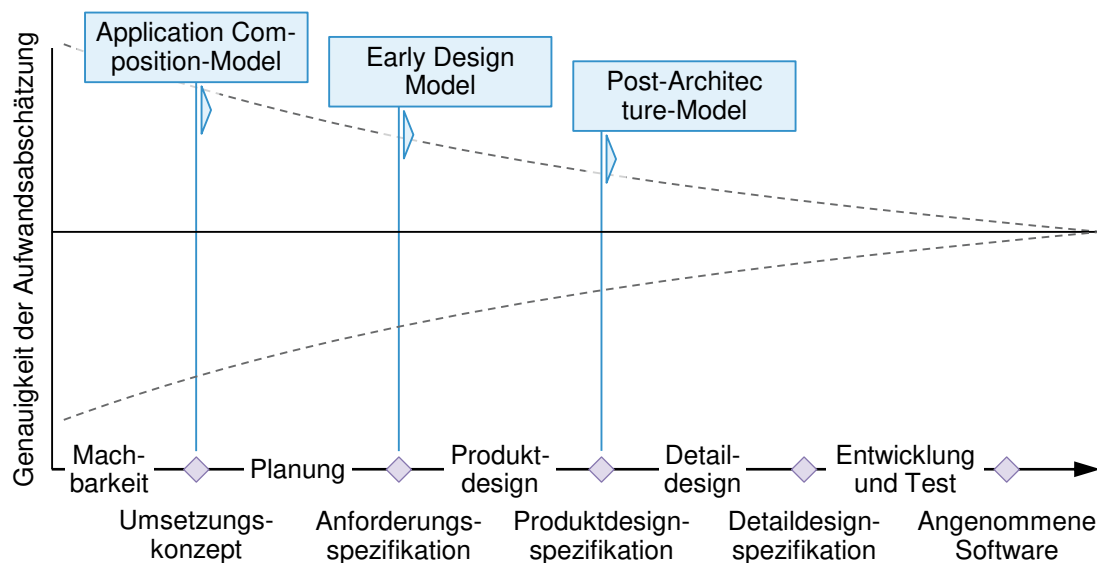


Bild A-7: Phasen und Meilensteine eines Softwareentwicklungsprojekts mit entsprechenden Teilmodellen von COCOMO II nach [BH00], [Esb18-ol]

Die drei Teilmodelle unterscheiden sich bzgl. Skalenfaktoren, Aufwandsmultiplikatoren und Modellkonstanten. Das **Application Composition Model** ermöglicht eine erste Grobschätzung mit Hilfe von Object Points und mit einer Größen- bzw. Produktivitätsformel. Object Points sind z.B. Bildschirmmasken, Berichte und Module in höheren Programmiersprachen. Das **Early Design Model** liefert eine fundiertere tabellenbasierte Schätzung auf Basis von Function Points, eine Zusammensetzung aus einer Schätzung der Lines of Code, der Neuartigkeit des Projekts und Projektfaktoren. Das **Post-Architecture Model** ermöglicht eine fundierte, tabellenbasierte Schätzung auf Basis von 17 Produkt- (Zuverlässigkeit), Computer- (Speicher), Personal- (Erfahrung der Programmierer) und Projektattributen (Softwarewerkzeuge) [BH00, S.10ff.], [Esb18-ol, S. 4].

Einsatzmöglichkeiten der Methode sind die Bewertung der Aufwände von Endbenutzerprogrammierung, die Generierung von Applikationen und Hilfsmitteln für deren Aufbau, der Aufbau von Applikationen, die Durchführung von Systemintegrationen sowie die Entwicklung von Infrastruktur [BH00, S. 6].

Bewertung: BOEHM entwickelte ein Modell zur Schätzung des Aufwands von IT-Projekten. Hierzu wurden Projekte empirisch ausgewertet und ein mathematisches Modell mit zahlreichen Parametern und Konstanten entwickelt. Hervorzuheben ist der empirische Charakter des Modells. Dieser ermöglicht die Nutzung von Erfahrungswissen für die Abschätzung neuer Softwareentwicklungsprojekte.

Das Modell ist jedoch ausschließlich auf Softwareentwicklungsprojekte anwendbar. Projekte zur Einführung von verfügbaren Softwarelösungen können sich grundlegend unterscheiden und sind ausgeschlossen. Somit ist auch eine Übertragbarkeit auf die Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion nicht gegeben. Darüber hinaus werden ausschließlich die Kosten und nicht der Nutzen einer Software berücksichtigt.

A2.8 Netzplantechnik

Die Netzplantechnik stellt ein bewährtes Hilfsmittel zur Analyse, Beschreibung, Planung, Kontrolle und Steuerung von Projekten dar. Dabei beschränkt sich der Ansatz nicht nur auf IT-Projekte. Die Netzplantechnik ist *universell einsetzbar, unabhängig von der Größe des Projekts, von der Dauer [...] [und] dem Projektinhalt* [Bur08, S. 245].

Eine Gliederungsform der Netzplanmethoden stellt die Unterscheidung zwischen deterministischen und stochastischen Projektablaufen dar. Bei deterministischen Projektablaufen sind die Abläufe vorherbestimmbar. Das bedeutet, dass alle im Netzplan geplanten Vorgänge durchlaufen werden müssen. Im Gegensatz dazu sind bei stochastischen bzw. probabilistischen Ablaufstrukturen unterschiedliche Vorgehen zur Erreichung des Ziels möglich. *Ein Vorgang stellt ein zeiterforderndes Geschehen im Projektablauf dar* [Bur08, S. 246].

Beispiele von Netzplanmethoden zur Abbildung von deterministischen Projektablaufen sind der Vorgangspfeil-Netzplan (auch: Critical Path Method – CPM), der Vorgangsknoten (auch: Metra-Potential-Method – MPN) und der Ereignisknoten-Netzplan (auch: Program Evaluation and Review Technique – PERT). Beispiele für Netzplanmethoden zur Abbildung von stochastischen Projektablaufen sind GERT, GAN und Petri-Netze. Nach BURGHARDT haben sich für technische und betriebliche Abläufe die deterministischen Modelle durchgesetzt [Bur08, S. 246], [FSB08, S. 107f.]. Bild A-8 stellt die drei Arten von deterministischen Netzplänen exemplarisch dar.

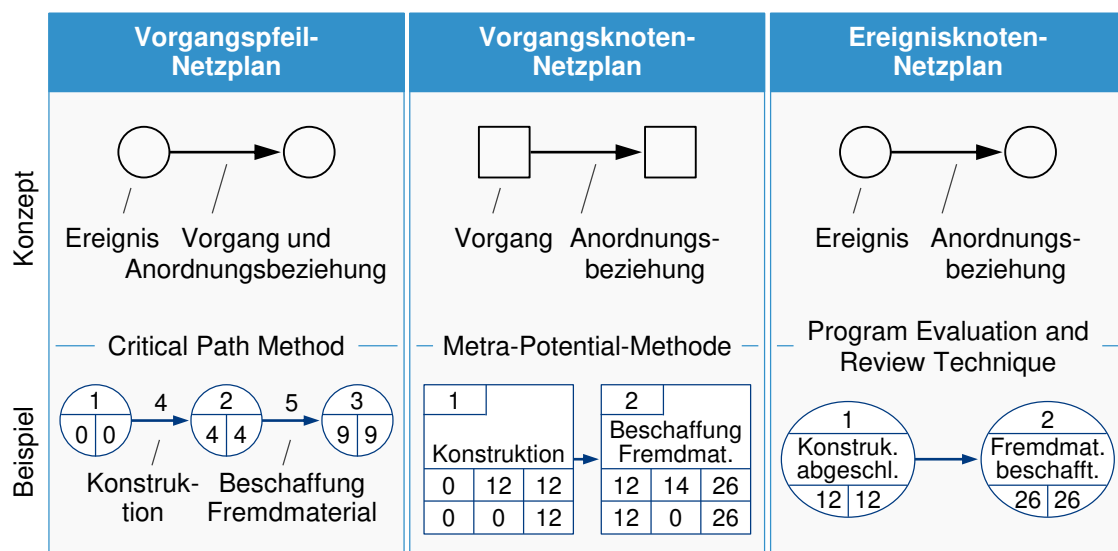


Bild A-8: Übersicht über die Netzplan-Methoden für deterministische Projektablaufe nach [Bur08, S. 246]

Ist ein Projekt mit Hilfe eines Netzplans geplant und gestartet, gilt es den Fortschritt zu kontrollieren und zu steuern. Dazu kommt häufig ein sog. Kosten-Termin-Diagramm zum Einsatz. In dem Diagramm werden auf der Abszisse die Zeit und auf der Ordinate die Kosten aufgetragen. Durch das Eintragen des Plan- und des Ist-Verlaufs des Projekts

in Form von Meilensteinen, wird der Projektfortschritt überwacht [Bur08, S. 386], [HHA13, S. 40].

Bewertung: Die Netzplantechnik ist ein Ansatz zur konsistenten Beschreibung, Planung, und Steuerung von Projekten. Sowohl entsprechend dem Top-Down als auch dem Bottom-Up Vorgehen lassen sich Projekte mit ihren terminlichen Restriktionen und ihren Aufwänden planen.

Eine Übertragung des Ansatzes auf Investitionen ist nicht einfach gegeben. Bspw. wird keine konkrete Unterstützung bei der Schätzung der Aufwände geliefert. Dies basiert auf Erfahrungswissen. Weiterhin wird der Nutzen eines Projekts nicht betrachtet.

A2.9 Ansatz zur Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen

SCHUH ET AL. stellen einen Ansatz zur Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen vor. Der Ansatz fußt auf Kennzahlen zur Bewertung der Stückzahl-, Varianten- und Produktänderungsflexibilität auf Linienebene. Die Flexibilitätskennzahlen werden als Mengenflexibilität, Mixflexibilität und Produktänderungsflexibilität bezeichnet. Die Mengenflexibilität beschreibt, um wie viel der Output des Systems variieren darf, ohne dass die Wirtschaftlichkeit des Produktionssystems gefährdet wird. Die Mixflexibilität beschreibt den maximalen Profit, der bei einem optimalen Produktionsprogramm erwirtschaftet werden kann. Es werden somit die Einbußen durch die Variantenvielfalt beschrieben. Die Produktänderungsflexibilität beschreibt inwiefern das Produktionssystem hinsichtlich Produktänderungen anpassungsfähig ist [SGW+04, S. 302].

Ein Vorgehensmodell definiert die Schritte zur Bewertung eines Produktionssystems. Im ersten Schritt sind die Strukturen, Prozesse und produzierten Produktvarianten zu spezifizieren. Anschließend werden die Systemgrenzen definiert und so ein Systemmodell des Produktionssystems bestimmt. Mit dem Systemmodell werden abstrakte Klassen sowie konkrete Objekte innerhalb des Produktionssystems ermittelt. Beispiele sind Segmente, Linien und Arbeitsplätze in einer Fertigung. Daraufhin werden definierte Referenzszenarien herangezogen. Sie beschreiben die Anforderung eines Produktionssystems, welche es im Betrieb erfüllen muss. Die Szenarien werden hinsichtlich ihrer Bedeutung für das betrachtete Produktionssystem gewichtet. Aus den relevantesten Szenarien werden die Anpassungspotentiale auf Subsystem-Ebene abgeleitet und bewertet. Aus diesen wird eine Flexibilität auf Subsystem-Ebene bestimmt und auf Gesamtsystemebene aggregiert [SGW+04, S. 301f.].

Bewertung: Der Ansatz nach SCHUH ET AL. ermöglicht die Bewertung der Flexibilität eines Produktionssystems mit Hilfe einer Mengenflexibilität, Mixflexibilität und Produktänderungsflexibilität. Die Übertragung des Ansatzes auf eine Investitionsbewertung ist nicht einfach gegeben. Der Nutzen einer Flexibilitätssteigerung wird in Form der

Kennzahlen quantifiziert, ist jedoch nicht einfach monetarisierbar. Gleichzeitig wird die Kostenseite nicht berücksichtigt.

A3 Ergänzungen zur Systematik

Im Folgenden werden Ergänzungen zur Systematik zur Bewertung von Industrie 4.0 Anwendungen in der Produktion beschrieben.

A3.1 Beispielhafte Anwendungen des Referenzmodells einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion

In Kapitel 5.2.2 wird ein Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion aufgezeigt. Im Folgenden werden drei Industrie 4.0 Anwendungen aus der Industrie 4.0 Landkarte exemplarisch mit dem Modell beschrieben. Die drei Beispiele werden in Kapitel A3.2 anhand der Merkmale von Investitionsentscheidungen bewertet. Bild A-9 zeigt einen intelligenten Kanban-Behälter im Referenzmodell.

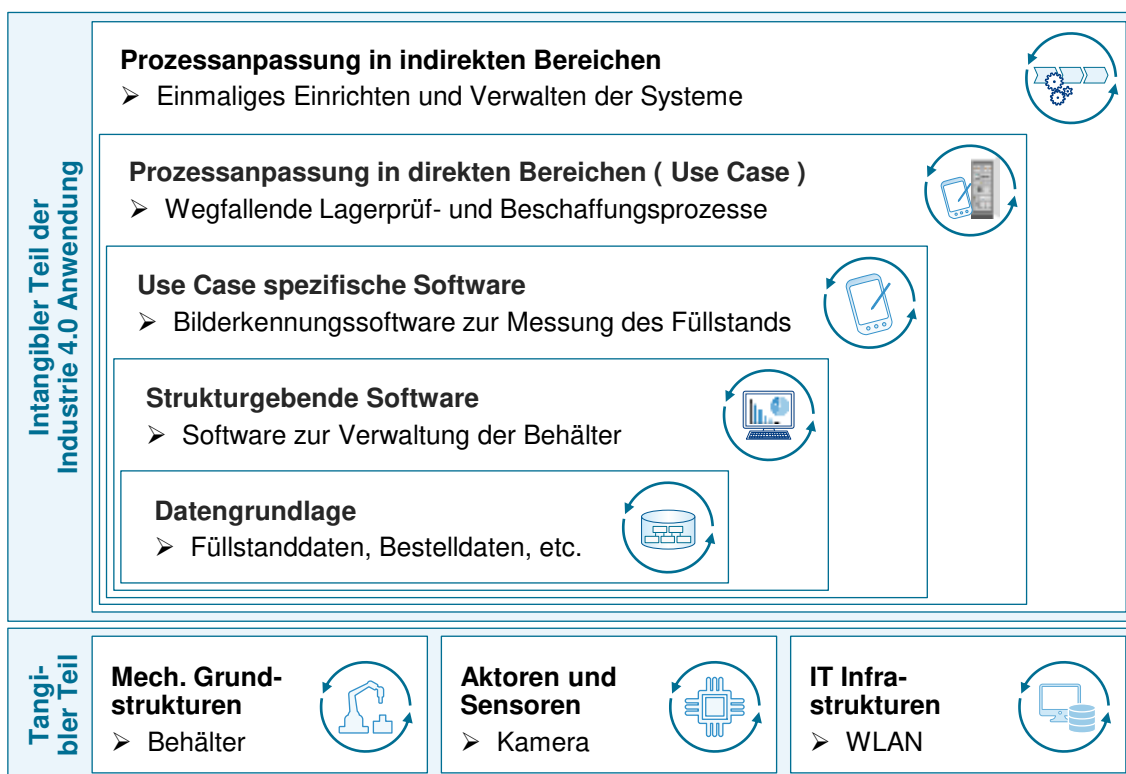


Bild A-9: Beispiel eines intelligenten Kanban-Behälters im Referenzmodell einer Investition in eine Industrie 4.0 Anwendung in der Produktion

Bild A-10 zeigt eine Internet of Things (IoT) Plattform im Referenzmodell.

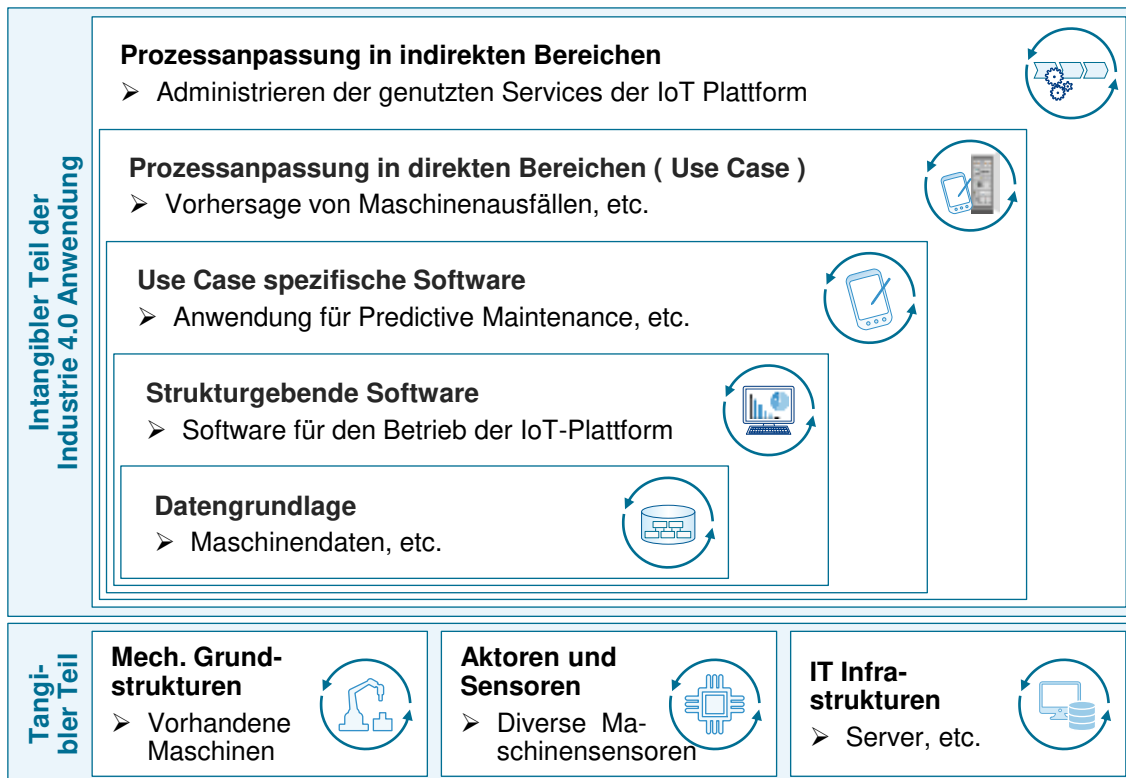


Bild A-10: Beispiel einer IoT Plattform im Referenzmodell

Bild A-11 zeigt ein fahrerloses Transportsystem im Referenzmodell.

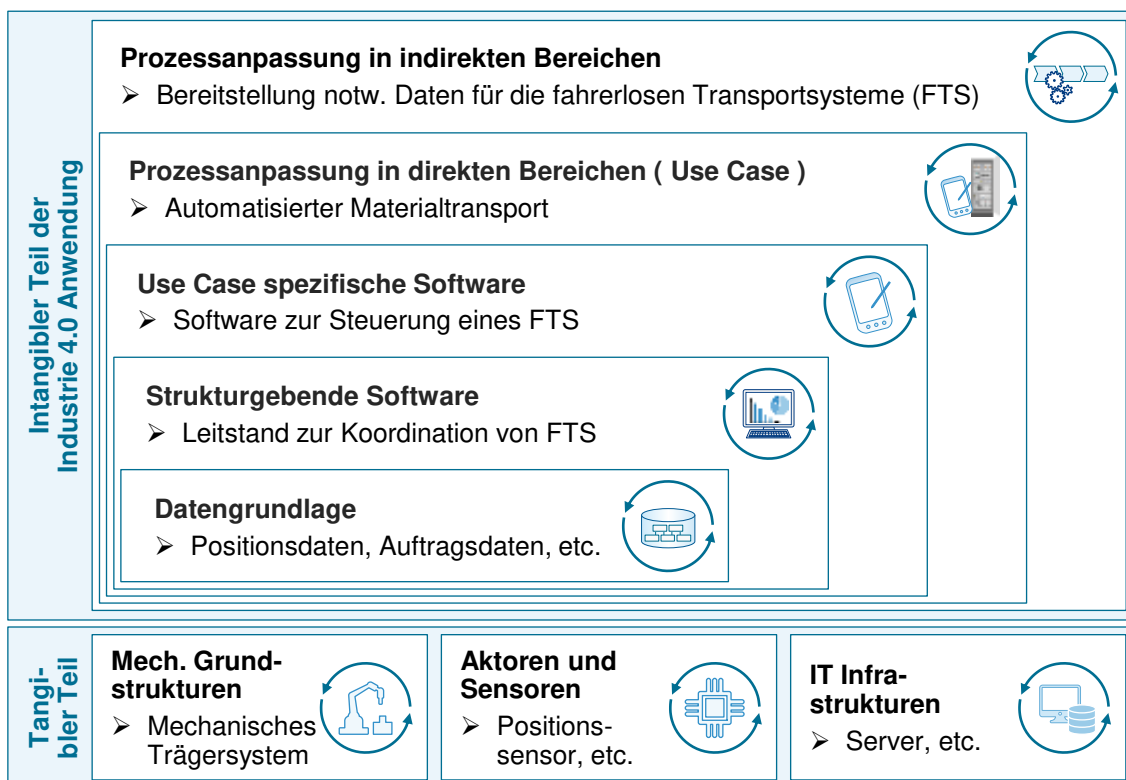


Bild A-11: Beispiel eines fahrerlosen Transportsystems im Referenzmodell

A3.2 Anwendung der Merkmale von Investitionsobjekten

In Kapitel 5.2.3 werden Merkmale von Investitionsobjekten vorgestellt. Sie dienen dazu Industrie 4.0 Anwendungen in einer der zwei Kategorien überschaubare und unüberschaubare Investitionen einzuordnen und ein geeignetes Vorgehensmodell abzuleiten. Entsprechend dem Vorgehen bei der Strukturierung von Anwendungsszenarien und -beispielen von Industrie 4.0 (vgl. Kapitel 3.2.4) wurden Anwendungsbeispiele der Industrie 4.0 Landkarte bewertet. Die Bewertung erfolgte aus Sicht kleiner und mittlerer produzierender Unternehmen. Es handelt sich um mögliche Anwender der Industrie 4.0 Anwendungen. Die Tabelle A-1 zeigt die mit den Merkmalen zur Kategorisierung von Investitionsobjekten bewerteten Industrie 4.0 Anwendungsbeispiele. Zu beachten ist, dass die Bewertung der Investitionsobjekte anhand der Merkmale unternehmensindividuell durchzuführen ist. Aus Sicht eines großen Unternehmens kann die Bewertung anders ausfallen.

Ein Beispiel für eine überschaubare Investition in der Produktion ist ein **intelligenter Kanban-Behälter**. Dieser bestellt Material selbständig nach, sobald ein gewisser Füllstand unterschritten wird. Aus Sicht eines Anwenders ist die Anwendung technisch wenig anspruchsvoll, die Funktionalitäten sind jedoch nicht ohne substanzielle Aufwände erweiterbar, wobei nur eine Abteilung ist betroffen. Weiterhin handelt es sich um eine kleine Investition mit mittleren, laufenden Kosten.

Ein Beispiel für eine unüberschaubare Investition in der Produktion ist eine Business Analytics Plattform. Es handelt sich um eine **Internet of Things (IoT) Plattform**, die bspw. diverse Services zur Analyse und Optimierung von Maschinen anbietet. Aus Sicht des Anwenderunternehmens ist die Anwendung hoch anspruchsvoll. Die Funktionalitäten sind über vorhandene Schnittstellen erweiterbar, was eine initiale Spezifikation der Industrie 4.0 Anwendung deutlich erschwert. Auch die einmaligen und laufenden Kosten sind hoch bzw. sehr hoch.

Ein weiteres Beispiel für eine unüberschaubare Investition in der Produktion ist ein **fahrerloses Transportsystem**, den sog. LogiMover. Das System ist aus Sicht des Anwenders hoch anspruchsvoll. Auch wenn die Funktionalitäten des Systems nicht ohne substanzielle Aufwände erweiterbar sind und die Unternehmensdurchdringung nicht sehr hoch ist, ist die Höhe der einmaligen Kosten ein zentraler Aspekt, weshalb die Investition zunächst unüberschaubar ist.

Tabelle A-1: Beispielhafte, mit den Merkmalen zur Kategorisierung von Investitionsobjekten bewertete Industrie 4.0 Anwendungen

Bezeichnung der Anwendung auf der I4.0 Landkarte	Kurzbeschreibung	Technischer Anspruch	Erweiterbarkeit	Unternehmensdurchdringung	Höhe der einmaligen Kosten	Höhe der laufenden Kosten	Mittelwert	Link zur Beschreibung
Intelligentes, vernetztes C-Teile-Management	Intelligenter Kanban-Behälter der Material nachbestellt	0	0	0	0	1	0,2	Link zur Beschreibung
ESYS GmbH: Predictive Maintenance	IoT Sensor für die Erfassung von Maschinendaten	1	0	0	0	0	0,2	Link zur Beschreibung
3D-Druck von Gasturbinenkomponenten	3D-Druck für Prototypenbau	1	0	1	2	1	1,0	Link zur Beschreibung
WERKBLIQ: Ihr digitaler Blick ins Werk	System für Instandhaltungsmanagement von Maschinen	2	1	1	2	1	1,4	Link zur Beschreibung
Energiemanagementsystem MESSDAS®	System zur Messung und Analyse von Energieverbräuchen	2	1	1	2	0	1,2	Link zur Beschreibung
MES HYDRA	Fertigungsleitstand	3	2	2	3	2	2,4	Link zur Beschreibung
KapaflexCy	Dashboard in der Produktion zur Personaleinsatzplanung	3	1	2	2	1	1,8	Link zur Beschreibung
Traceability	Assistenzsystem in der Produktion welches die Arbeitsschritte vorgibt	3	1	1	2	3	2,0	Link zur Beschreibung
Business Analytics Plattform	IoT Plattform mit diversen Services zur Analyse und Optimierung von Maschinen	3	2	2	2	3	2,4	Link zur Beschreibung
SMART FACE	System zur dezentralen Produktionssteuerung	3	2	2	3	3	2,6	Link zur Beschreibung
Celonis-Process Mining	Process-Mining Lösung	3	1	2	2	1	1,8	Link zur Beschreibung
Predictive Maintenance	Vorhersage von Maschinenausfällen	2	1	1	1	0	1,0	Link zur Beschreibung
Predictive Analytics in der Aggregatefertigung	Prozessoptimierung mit Machine Learning	2	1	1	1	0	1,0	Link zur Beschreibung
Selbstoptimierung bei Weidmüller	Selbstoptimierung einer Stanz-Biegemaschine	3	1	1	2	0	1,4	Link zur Beschreibung
Automatisiertes Lager-system Dry Tower	Automatisiertes Lager	3	0	1	3	1	1,6	Link zur Beschreibung
LogiMover	Fahrerloses Paletten-Transportsystem	3	0	1	3	1	1,6	Link zur Beschreibung
Assembly-by-Light: Beleg-loser Montagearbeitsplatz	Pick by Light Lösung für Montagearbeitsplätze	3	2	1	2	3	2,2	Link zur Beschreibung

A3.3 Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion

Tabelle A-2: Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion (1/2)

Nr.	Kategorie	Potential	Bedeutung	Monetäre Bewertung	Bewertungsgrundlage
1.1	Leistung / Qualität	Prozess-innovation	Arbeitsteilung bzw. Vorbereitung von Arbeitsinhalten	Wegfall von redundanten Arbeitsabläufen	Mitarbeiterauslastung
1.2	s.o.	Prozessvereinfachung	Vermeidung von Fehlern bei Montagetätigkeiten	Weniger Nacharbeitszeit	s.o.
1.3	s.o.	s.o.	Schnelleres Anlernen von neuen Mitarbeitern	Weniger Arbeitszeit zum Anlernen	s.o.
1.4	s.o.	s.o.	Prozessvereinfachung durch Expertenwissen	Weniger Arbeitszeit	s.o.
2.1	Durchlaufzeit / Termintreue	Parallelisierung von Prozessen	Schnellere Auslieferung von Produkten	Höhere Preise für schnellere Lieferung	Produktwert
2.2	s.o.	s.o.	Opportunitätskosten für nicht eingehaltene Termine	Vermeidung von Vertragsstrafen	s.o.
3.1	Personal-kosten / Arbeitszeiten	Mitarbeiterflexibilität	Einsatz geringer qualifizierter Mitarbeiter	Geringere Lohnkosten für best. Tätigkeiten	Mitarbeiterkosten und -auslastung
3.2	s.o.	s.o.	s.o.	Mehr Output durch mehr Arbeitskräfte	s.o.
4.1	Transparenz	Prozess-transparenz	Fehlerreduktion	Weniger Nacharbeit	Mitarbeiterauslastung
4.2	s.o.	s.o.	Weniger Hin- und Herlaufen von Mitarbeitern	Einsparung von unproduktiver Arbeitszeit	s.o.
5.1	Lager / Bestand	Geringere Durchlaufzeit	Geringerer Lagerbestand	Geringere Bestandskosten	Lagerbestandswert
5.2	s.o.	s.o.	s.o.	Weniger Handlingszeit	Personal-arbeitszeit

Tabelle A-3: Katalog an monetarisierbaren Potentialen in der Produktion (2/2)

6.1	Anlagen- / Kapitalkosten	Ermögl. von Zusammenarbeit	2-Schicht Betrieb ermöglichen	Geringere Kapitalkosten für Maschinen	Ressourcen
6.2	s.o.	s.o.	s.o.	Geringere Kapitalkosten für Gebäude	Infrastruktur
6.3	s.o.	Instandhaltung von Anlagen	Verbesserung der Instandhaltung	Weniger Maschinenausfälle	Ressourcen und Infrastruktur
6.4	s.o.	s.o.	Automatisierung der Instandhaltung	Weniger benötigte Arbeitszeit	Personalarbeitszeit
6.5	s.o.	s.o.	Verbesserung der Instandhaltung	Höhere Maschinenverfügbarkeit	Maschinen / Anlagen
7.1	Energie- / Ressourcenmanagement	Energiekosten	Reduktion des Energieverbrauchs	Reduktion von Energiekosten	Ressourcen und Infrastruktur
7.2	s.o.	Prozessvereinfachung	Vermeidung von Fehlern bei Montage-tätigkeiten	Weniger verschwendetes Material	Ressourcen und Personalarbeitszeit
8.1	Arbeitsqualität / Ergonomie	Steigerung der Ergonomie	Geringere Krankenstände bzw. Fehltage	Mehr Arbeitszeit	Mitarbeiterauslastung
8.2	s.o.	s.o.	Reduktion von Arbeitsunfällen	s.o.	s.o.
9.1	Sonstiges	Funktionserweiterung	Aktuellen Lagerbestand einsehen	Einsparung von Arbeitszeiten	Mitarbeiterauslastung
9.2	s.o.	s.o.	Steuerung von CNC-Maschinen	s.o.	s.o.

A3.4 Vollständiger Kostenkatalog

Tabelle A-4: Kostenkatalog (1/4)

Lebens- zyklus	Kosten- art	Kosten- element	Nr.	Beschreibung	Quellen
Produktionssystem- planung	Bestandsaufnahme	Bedarfs- ermittlung	1	Ermitteln, Erfassen und Aufbereiten von Veränderungsbedarfen	[VDI2884]
		Prozessauf- nahme und -analyse	2	Erfassen und Analysieren von Ist-Prozessen	[GP14]
		Bestands- aufnahme der Infrastruktur	3	Bestandsaufnahme der technischen Infrastruktur, IT-Systemlandschaft, vorhandenen Schnittstellen und Daten	[JEK+18], [KJR+18]
		Potential- identifikation	4	Ermitteln, Erfassen und Aufbereiten von Verbesserungsmöglichkeiten	[GP14]
	Soll-Planung	Anforderungs- erfassung	5	Erfassen der Eigenschaften die das System besitzen muss	[NP18], [PD19-ol]
		Prozessplanung	6	Erarbeiten von Soll-Prozessen	[GP14]
		Konzeptplanung	7	Erarbeitung eines Konzepts zur Integration der antizipierten Lösung in die Prozesse und Organisation	[Paw16]
		Marktanalyse	8	Recherchieren und Bewerten von marktseitigen Angeboten	[VDI2884]
		Planung und Angebot	9	Ausarbeitung der Planung und des Angebots	[VDI2884]
Entwicklung	Hardware	Physisches In- vestitionsobjekt	10	Kosten für das Investitionsobjekt (z.B. Maschine, IT-System)	[VDI2884]
		Fracht	11	Kosten für den Transport	[VDI2884]
		Erstausstattung Ersatzteile	12	Ersatz von Bauteilen zur Sicherung des Regelbetriebs	[VDI2884]
		Zusätzliche Anlagen	13	Relevante Anlagen bzw. Peripheriegeräte, welche für den Betrieb der Maschine notwendig sind	[VDI2884]
		Zusätzliche Infrastruktur	14	Relevante Infrastruktur wie z.B. Wlan oder GPS-Sensoren	[JEK+18], [KJR+18]
		IT-Hardware	15	Anschaffung relevanter Hardware	[MBS+19], [VDI2884]
	Software	Software- beschaffung	16	Anschaffung relevanter Software	[MBS+19], [VDI2884]
		Software Customizing	17	Anpassen der einzusetzenden Softwarelösung auf die Ansprüche des betrachteten Unternehmens	[MBS+19], [AAA+09]
		Schaffen von Datenbanken	18	Erstellen und Installieren von Datenbanken	[JEK+18], [KJR+18]

Tabelle A-5: *Kostenkatalog (2/4)*

Entwicklung	Software	Anbindung an Systeme und Datenbanken	19	Schaffung von Schnittstellen zu gegebenen Datenbanken zum Austausch und zur Konvertierung von Daten	[JEK+18], [KJR+18]
		Cloud-Bereitstellung und Anbindung	20	Einrichten der Infrastruktur zur Bereitstellung von Software-Applikationen	[NP18], [Urb19-ol]
	Personalkosten	Personalbeschaffung	21	Beschaffung von notwendigem zusätzlichem Personal (z.B. auf Internetplattformen)	[VDI2884]
		Interne Mitarbeiter für die Entwicklung	22	Löhne, Gehälter und Sozialversicherungsbeiträge	[VDI2884]
		Externe Mitarbeiter für die Entwicklung	23	Externe unterstützende Unternehmen (z.B. Beratungsunternehmen)	[VDI2884]
		Reise	24	Kosten die auf Grund von Reisen beteiligter Mitarbeiter anfallen	[VDI2884]
		Weiterbildung und Schulung	25	Erlernen des Umgangs mit neuen Maschinen und Software-Lösungen	[VDI2884], [Def19-ol]
	Weiteres	Kapitalbeschaffung	26	Kosten für die Beschaffung von Eigen- und Fremdkapital	[VDI2884]
		Zusätzliche Garantien	27	Kosten für zusätzliche Garantien	[VDI2884]
Einführung	Hardware	Umbaumaßnahmen	28	Anpassungen im gegebenen Produktionssystem	[VDI2884]
		Aufbau und Einbau	29	Montieren der neuen Fertigungsressource	[VDI2884]
		Inbetriebnahme	30	Erstmalige Nutzung und Erprobung der Maschine	[VDI2884]
	Software	Installation	31	Einrichten der Software	[AAA+09]
		Software Tests	32	Erproben der einzusetzenden Software durch Mitarbeiter	[NP18], [Rei16]
		Dokumentation	33	Erfassen notwendiger Vorgehen zur Einrichtung bzw. zur Nutzung und Beschreibung relevanter Elemente der Software	[NP18]
	Daten	Datenerfassung	34	Erfassen von notwendigen Daten für die einzusetzende Software	[Rei16]
		Datenmigration	35	Überführung notwendiger Daten für die einzusetzende Software	[Rei16]
		Datenaufbereitung	36	Aufbereiten notwendiger Daten für die einzusetzende Software	[Rei16]
	Personal	Interne Mitarbeiter für die Einführung	37	Löhne, Gehälter und Sozialversicherungsbeiträge	[VDI2884]
		Externe Mitarbeiter für die Einführung	38	Externe unterstützende Unternehmen (z.B. Beratungsunternehmen)	[VDI2884]
		Reise	39	Kosten die auf Grund von Reisen beteiligter Mitarbeiter anfallen	[VDI2884]
		Weiterbildung und Schulung	40	Erlernen des Umgangs mit neuen Maschinen und Software-Lösungen	[VDI2884], [Def19-ol]
		Zusätzliche Prozesse	41	Ggf. anfallende Aufwände für zusätzliche Prozesse auf Grund der neuen Fertigungsressource oder Software	[JKD+18]


Tabelle A-6: *Kostenkatalog (3/4)*

	Produktivitäts- einbußen im Betrieb	Verlangsamte Prozesse	42	Produktivitätsverluste auf Grund verlangsamter Arbeitstätigkeiten von Mitarbeitern durch neue Arbeitsabläufe und bzw. oder neue Ressourcen	[JKD+18]
		Effizienzeinbu- ßen in der Auf- tragsabwicklung	43	Mehraufwände oder Verzögerungen im Auftragsabwicklungsprozess durch investitionsobjektbedingte Beeinträchtigungen (z.B. auf Grund von Softwaremängeln)	[AAA+09], [NP18]
		Produktions- ausfall	44	Reduktion der Produktionsleistung durch investitionsobjektbedingte Beeinträchtigungen	[AAA+09]
Wachstum bzw. Produktivbetrieb bis Reife	Hardware	Ersatzteile	45	Beschaffung von notwendigen Bauteilen zur Ersetzung alter Bauteile	[HMR10], [VDI2884]
		Reinigungs- aufwand	46	Säubern der Maschine bzw. der Anlage zur Sicherung des Produktivbetriebs	[HMR10], [VDI2884]
		Wartung der Hardware	47	Alle Maßnahmen der vorbeugenden Instandhaltung wie bspw. Justieren, Nachfüllen von Betriebsstoffen etc. zur Verminderung bzw. Verhinderung von Verschleißerscheinungen	[MBS+19], [HMR10], [VDI2884]
		Wartung der Software	48	Maßnahmen zur Sicherstellung der Verfügbarkeit und Nutzbarkeit. Dazu gehören sowohl funktionserhaltende als auch funktionserweiternde und perfektionierende Maßnahmen	[Leh19-ol], [MBS+19]
		Inspektion	49	Maßnahmen der vorbeugenden Instandhaltung zur frühzeitigen Erkennung von möglichen oder vorhersehbaren Störungen	[HMR10], [VDI2884]
		Instandsetzung	50	Maßnahmen zur Beseitigung von funktionsrelevanten Schäden an Produktionsanlagen.	[HMR10], [VDI2884]
		General- überholung	51	Beseitigen von sämtlichen vorhandenen Mängeln	[HMR10], [VDI2884]
		Sonder- werkzeuge	52	Beschaffung von Sonderwerkzeugen, z.B. Hebezeugen	[VDI2884]
		Service	53	Immaterielle Leistungen von Dritten	[Lie19-ol], [VDI2884]
		Garantie- leistungen	54	Das rechtliche Entstehen für Mängel durch denjenigen, der die Garantie zusichert	[Lie19-ol], [Ber19a-ol]
		Reinigung und Entsorgung	55	Reinigung von Emissionen und Entsorgung von Hilfs- und Betriebsstoffen durch Säubern der Maschine bzw. der Anlage	[VDI2884]
		Änderungen	56	Aufwände für Anpassungen am System	[VDI2884]
		Erneuerung von Hardware	57	Ersetzen von Bauteilen und Infrastruktur	[JKD+18]
	Software	Lizenzgebühren	58	Kosten vom Softwareanbieter zum Betrieb und Wartung der Software	[FKL+13]
		Service	59	Nutzung der vom Anbieter angebotenen Dienste bzw. Leistungen	[Lie19-ol]
		Ggf. ergänzende, neue Software	60	Kosten für ggf. ergänzende Software	[JKD+18]
	Daten	Stamm- datenpflege	61	Kontinuierliche Pflege von relevanten Daten für die effiziente Nutzung der betrachteten Software	[Bec19-ol]
	Personal	So	62	So	

Tabelle A-7: *Kostenkatalog (4/4)*

Sättigung	Hardware	Entsorgung von Betriebsstoffen	63	Beseitigen und Abtransportieren von Betriebsstoffen	[Dud17], [VDI 2884]
		Demontage	64	Abbauen bzw. Zerlegen der Maschine bzw. der Anlage	[Dud17], [VDI 2884]
		Rückbau	65	Baumaßnahmen um etwas in einen früheren Zustand zu bringen	[Dud17], [VDI 2884]
		Rekultivierung	66	Maßnahmen um einen unfruchtbar gewordenen Boden wieder fruchtbar zu machen	[Dud17], [VDI 2884]
		Sanierung	67	Renovieren, Modernisieren zur Wiederherstellung des Gebäudes	[Dud17], [VDI 2884]
		Kosten für notw. Gutachten	68	Beurteilung durch einen Sachverständigen	[Dud17], [VDI 2884]
		Endlagerungskosten	69	Endgültige Lagerung von Teilen	[Dud17], [VDI 2884]
		Verkauf	70	Veräußern von Teilen des Systems	[VDI2884]
		Recyclingkosten	71	Rückführen von Abfällen um diese erneut zu nutzen	[FG19-ol], [VDI2884]
		Wiederverwendung	72	Erneute Verwendung von Teilen des betrachteten Systems in anderen Systemen	[VDI2884]
		Verschrottung	73	Betrachteten Gegenstand zu Schrott verarbeiten	[Dud17], [VDI 2884]
		Auflösung des Lagerbestands	74	Aufwand zur Organisation der Auflösung des Lagerbestands und Verwertung der Ersatzteile	[VDI2884]
	Software	Herstellen von IT-Schnittstellen zu neuem System	75	Programmierung und Installation von IT-Schnittstellen zu neuen IT-Systemen	[JEK+18], [KJR+18]
	Daten	Datenmigration in neues System	76	Überführung notwendiger Daten für die folgende Software-Lösung	[Rei16]

A3.5 Workshopkarte für Annahmen und Rahmenbedingungen

Annahmen und Rahmenbedingungen		
Beschreibung der Investition		
<p>Prägnante Beschreibung der Investition für ein einheitliches Verständnis →</p> <hr/> <hr/> <hr/> <p>Lebens- / Einsatzdauer der Investition: _____ [Jahre]</p>		
Ziele der Investition		
<input type="checkbox"/> Inputminimierung <input type="checkbox"/> Reduktion Fixkosten <input type="checkbox"/> Reduktion Mat.-einsatz <input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> Outputmaximierung <input type="checkbox"/> Absatzsteigerung <input type="checkbox"/> Qualitätssteigerung <input type="checkbox"/> _____	<p>Definition und Beschreibung der Ziele der Investition ←</p>
Erläuterung:		
<hr/> <hr/>		
Berechnungsgrundlage		
<p>Arbeitstage pro Jahr: _____ [Tage]</p> <p>Plan Arbeitsstunden (sofern für alle gleich) _____ [Std / Woche]</p> <p>Kapitalkosten _____ [%]</p> <p>Liquide Mittel für Invest. _____ [€]</p> <p>Weiteres _____</p>		

Grundlegende, übergreifende Annahmen für die Berechnung →

Bild A-12: Workshopkarte für die Erfassung von Annahmen und Rahmenbedingungen nach [JKH+18, S. 470]

A3.6 Steckbriefe zu Berechnungsmethoden

Im Folgenden werden zwölf Steckbriefe zu ausgewählten Berechnungsmethoden vorgestellt. Eine Übersicht der beschriebenen Methoden liefert Tabelle 5-4.

Berechnungsmethode: Kostenvergleichsrechnung	
<p>Beschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> Ansatz der statischen Investitionsrechnung, bei dem ausschließlich die Kosten von alternativen Investitionen verglichen werden Bei einem Vergleich von Alternativen wird die mit den geringeren Kosten bevorzugt, es kann eine Unterlassungsalternative eingesetzt werden Es kommt ein Periodenkosten- oder ein Stückkostenvergleich zum Einsatz <p>Zentrale Annahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> Annahmen der statischen Investitionsrechnung (es wird ausschließlich ein repräsentat. Zeitabschnitt berücksichtigt) Erlöse der Alternativen sind identisch, d.h. Investition mit den geringsten Kosten ist am vorteilhaftesten 	<p>Berechnung</p> $\text{Gesamtkosten} = \text{variable Kosten} + \text{fixe Kosten pro Jahr} + \text{Abschreibungen} + \text{Kapitalkosten}$ $\text{Durchschnittliche Abschreibung} = \frac{\text{Anschaffungskosten} - \text{Liquidationserlös}}{\text{Nutzungsdauer}}$ $\text{Durchschnittliche Kapitalkosten} = \frac{\text{Anschaffungskosten} + \text{Liquidationserlös}}{2} \cdot \text{Kalkulationszinssatz}$
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Es werden ausschließlich die Kosten von Investitionsobjekten benötigt ➔ Einfache Anwendbarkeit der Methode 	<p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Keine Berücksichtigung des Nutzens einer Investition ➔ Methode der statischen Investitionsrechnung, d.h. keine Berücksichtigung des Zeitwerts des Geldes
<p>Berechnungsbeispiel</p> <p>Vergleich von zwei Investitionsalternativen</p> <p>Die Fertigung eines neuen Produkts kann über zwei alternative Fertigungsverfahren umgesetzt werden. Es fallen entsprechend unterschiedliche Investitionskosten an.</p> <div> <p>Alternative A:</p> <p>Anschaffungskosten: 240.000 €</p> <p>Nutzungsdauer: 6 Jahre</p> <p>Liquidationserlös: 0 €</p> <p>Kapazität: 8.000 Maschineneinheiten / Jahr</p> <p>Gehälter: 50.000 € / Jahr</p> <p>Sonstige fixe Kosten: 40.000 € / Jahr</p> <p>Löhne: 220.000 € / Jahr</p> <p>Materialkosten: 400.000 € / Jahr</p> <p>Sonstige variable Kosten: 30.000 € / Jahr</p> <p>Kalkulationszinssatz: 8 %</p> </div> <div> <p>Durchschnittliche Abschreibung = 240.000 € / 6 Jahre = 40.000 € / Jahr</p> <p>Durchschnittliche Kapitalkosten = (240.000 € + 0 €) ÷ 2 * 0,08 = 9.600 € / Jahr</p> <p>Ges. durchschnittliche Fixkosten = 50.000 € + 40.000 € + 40.000 € + 9.600 € = 139.600 € / Jahr</p> <p>Gesamtkosten = 139.600 € / Jahr + 220.000 € / Jahr + 400.000 € / Jahr + 30.000 € / Jahr = 789.600 € / Jahr</p> </div> <div> <p>Alternative B:</p> <p>< Annahmen und Berechnung für Alternative B ></p> <p>Gesamtkosten = 774.400 € / Jahr</p> </div> <p>Alternative B weist geringere Kosten auf und ist somit relativ vorteilhaft.</p> <p>Quelle: GÖTZE, 2014; WELT-DER-BWL.DE, 2019</p>	

Bild A-13: Steckbrief einer Berechnungsmethode (1/12)

Berechnungsmethode: Gewinnvergleichsrechnung			
<p>Beschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ansatz der statischen Investitionsrechnung, bei dem die Gewinne von alternativen Investitionen bestimmt und verglichen werden ▪ Eine Investition ist absolut vorteilhaft, sofern der Gewinn größer als Null ist ▪ Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern ihr Gewinn größer als der der Alternativen ist <p>Zentrale Annahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Annahmen der statischen Investitionsrechnung (es wird ausschließlich ein repräsentativer Zeitabschnitt explizit berücksichtigt) 	<p>Berechnung</p> $\text{Gewinn} = \text{Umsatz} - \text{Kosten}$		
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Berücksichtigt Kosten und Erlöse und kann somit die Vorteilhaftigkeit einer Investition besser beurteilen als die Kostenvergleichsrechnung ➔ Einfache Anwendbarkeit der Methode 	<p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten ➔ Gewinne werden nicht in Relation zum Kapitaleinsatz gebracht, somit ist keine Aussage über Rentabilität des Kapitals möglich 		
<p>Berechnungsbeispiel Vergleich von zwei Investitionsalternativen</p> <table> <tr> <td> <p>Alternative A:</p> <p>Produktions- und Absatzmenge: 9.000 Stück / Jahr</p> <p>Verkaufspreis: 10 € / Stück</p> <p>Abschreibungen: 37.000€ / Jahr</p> <p>Zinsen: 6.270€ / Jahr</p> <p>Sonstige fixe Kosten: 4.000€ / Jahr</p> <p>Variable Kosten: 18.000€ / Jahr</p> <p>Gewinn = (9.000 Stück / Jahr * 10 € / Stk.) – (37.000 € + 6.270 € + 4.000 € + 18.000 €) = 24.730 € / Jahr</p> </td><td> <p>Alternative B:</p> <p>Produktions- und Absatzmenge: 12.000 Stück / Jahr</p> <p>Verkaufspreis: 10 € / Stück</p> <p>Abschreibungen: 42.000€ / Jahr</p> <p>Zinsen: 7.320€ / Jahr</p> <p>Sonstige fixe Kosten: 20.000€ / Jahr</p> <p>Variable Kosten: 22.800€ / Jahr</p> <p>Gewinn = (12.000 Stück / Jahr * 10 € / Stk.) – (42.000 € + 7.320 € + 20.000 € + 22.800 €) = 27.880 € / Jahr</p> </td></tr> </table> <p>Alternative B weist mit 27.880 € einen höheren Gewinn auf als Alternative A und ist somit relativ vorteilhaft. Quelle: GÖTZE, 2014; HEESSEN, 2016</p>		<p>Alternative A:</p> <p>Produktions- und Absatzmenge: 9.000 Stück / Jahr</p> <p>Verkaufspreis: 10 € / Stück</p> <p>Abschreibungen: 37.000€ / Jahr</p> <p>Zinsen: 6.270€ / Jahr</p> <p>Sonstige fixe Kosten: 4.000€ / Jahr</p> <p>Variable Kosten: 18.000€ / Jahr</p> <p>Gewinn = (9.000 Stück / Jahr * 10 € / Stk.) – (37.000 € + 6.270 € + 4.000 € + 18.000 €) = 24.730 € / Jahr</p>	<p>Alternative B:</p> <p>Produktions- und Absatzmenge: 12.000 Stück / Jahr</p> <p>Verkaufspreis: 10 € / Stück</p> <p>Abschreibungen: 42.000€ / Jahr</p> <p>Zinsen: 7.320€ / Jahr</p> <p>Sonstige fixe Kosten: 20.000€ / Jahr</p> <p>Variable Kosten: 22.800€ / Jahr</p> <p>Gewinn = (12.000 Stück / Jahr * 10 € / Stk.) – (42.000 € + 7.320 € + 20.000 € + 22.800 €) = 27.880 € / Jahr</p>
<p>Alternative A:</p> <p>Produktions- und Absatzmenge: 9.000 Stück / Jahr</p> <p>Verkaufspreis: 10 € / Stück</p> <p>Abschreibungen: 37.000€ / Jahr</p> <p>Zinsen: 6.270€ / Jahr</p> <p>Sonstige fixe Kosten: 4.000€ / Jahr</p> <p>Variable Kosten: 18.000€ / Jahr</p> <p>Gewinn = (9.000 Stück / Jahr * 10 € / Stk.) – (37.000 € + 6.270 € + 4.000 € + 18.000 €) = 24.730 € / Jahr</p>	<p>Alternative B:</p> <p>Produktions- und Absatzmenge: 12.000 Stück / Jahr</p> <p>Verkaufspreis: 10 € / Stück</p> <p>Abschreibungen: 42.000€ / Jahr</p> <p>Zinsen: 7.320€ / Jahr</p> <p>Sonstige fixe Kosten: 20.000€ / Jahr</p> <p>Variable Kosten: 22.800€ / Jahr</p> <p>Gewinn = (12.000 Stück / Jahr * 10 € / Stk.) – (42.000 € + 7.320 € + 20.000 € + 22.800 €) = 27.880 € / Jahr</p>		

Bild A-14: Steckbrief einer Berechnungsmethode (2/12)

Berechnungsmethode: Break-Even-Analyse	
<p>Beschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> Ansatz der statischen Investitionsrechnung zur Bestimmung der Absatzmenge ab der die fixen und variablen Kosten durch die Umsatzerlöse gedeckt werden Der Break Even Point beschreibt somit die „kritische Menge“ ab der die kumulierten Umsatzerlöse die kumulierten Kosten übersteigen <p>Zentrale Annahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> Annahmen der statischen Investitionsrechnung (es wird ausschließlich ein repräsentativer Zeitabschnitt explizit berücksichtigt) Variable und fixe Kosten werden voneinander getrennt erfasst 	<p>Berechnung</p> $\text{Gewinnschwellenmenge} = \frac{\text{Fixe Kosten}}{\text{Deckungsbeitrag pro Stück}}$ $\text{Break Even Umsatz} = \text{Break Even Menge} * \text{Listenverkaufspreis}$
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Einfache Anwendbarkeit der Methode ➤ Wenige benötigte Daten zur Anwendung der Methode ➤ Berücksichtigt Kosten und Erlöse 	<p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten ➤ Gewinne werden nicht in Relation zum Kapitaleinsatz gebracht, somit ist keine Aussage über Rentabilität des Kapitals möglich
<p>Berechnungsbeispiel</p> <p>Bestimmung der Gewinnschwellenmenge und des Gewinnschwellenumsatzes</p> <div> <div> <p>Die Rohstoffkosten eines Produktes wurden von 28 € pro Stück auf 24 € pro Stück gesenkt. In der betrachteten vorherigen Periode betrugen die fixen Kosten 24.000 €.</p> <p>Ab welcher Stückzahl wird die Gewinnschwelle bei einem Listenpreis von 36 € pro Stück erreicht?</p> <p>Listenpreis pro Stück: 36 € / Stück</p> <p>Variable Kosten pro Stück: 24 € / Stück</p> </div> <div> <p>Deckungsbeitrag</p> $= 36 \text{ € / Stück} - 24 \text{ € / Stück}$ $= 12 \text{ € / Stück}$ <p>Gewinnschwellenmenge</p> $= 24.000 \text{ €} \div 12 \text{ € / Stück}$ $= 2.000 \text{ Stück}$ <p>Gewinnschwellenumsatz</p> $= 2.000 \text{ Stück} * 36 \text{ €}$ $= 72.000 \text{ €}$ </div> </div> <p>Ab einer Menge von 2.000 Stück bzw. einem Umsatz von 72.000€ werden die Kosten gedeckt.</p> <p>Quellen: CONTROLLINGPORTAL.DE, 2019; GAUSEMEIER ET AL., 2019</p>	

Bild A-15: Steckbrief einer Berechnungsmethode (3/12)

Berechnungsmethode: Return on Investment / Rentabilitätsrechnung	
<p>Beschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ansatz der statischen Investitionsrechnung, bei der der Gewinn pro investiertem Kapital einer oder mehrerer zu vergleichenden Investitionen bestimmt und verglichen wird ▪ Eine einzelne Investition ist absolut vorteilhaft, sofern die Rentabilität einen definierten Grenzwert übersteigt ▪ Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern die Rentabilität höher ist als die der Alternativen <p>Zentrale Annahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Annahmen der statischen Investitionsrechnung (es wird ausschließlich ein repräsentativer Zeitabschnitt explizit berücksichtigt) 	<p>Berechnung</p> $\text{Return on Investment} = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Durchschnittlich gebundenes Kapital}}$
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Einfache Anwendbarkeit der Methode ➤ Wenige benötigte Daten zur Anwendung der Methode ➤ Berücksichtigung von Kosten, Erlösen und eingesetztem Kapital 	<p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten ➤ Methode der statischen Investitionsrechnung, d.h. keine Berücksichtigung des Zeitwerts des Geldes
<p>Berechnungsbeispiel</p> <p>Bestimmung des Return on Investments</p> <p>Ein Unternehmen investiert 50.000 € in eine Anlage. Es wird ein jährlicher Gewinn von 10.000 € erwartet.</p> <p>Return on Investment = $10.000 \text{ €} \div 50.000 \text{ €} = 20 \text{ \%}$.</p> <p>Der Gewinn pro investiertem Kapital, d.h. der Return on Investment bzw. die Rentabilität, beträgt 20 %.</p> <p style="text-align: right;">Quellen: GAUSEMEIER ET AL., 2019; WELT-DER-BWL.DE, 2019</p>	

Bild A-16: Steckbrief einer Berechnungsmethode (4/12)

Berechnungsmethode: Statische Amortisationsrechnung

Beschreibung

- Ansatz der statischen Investitionsrechnung, bei dem der Zeitraum bestimmt wird, in dem das eingesetzte Kapital durch die Investition wiedergewonnen wird
- Eine einzelne Investition ist absolut vorteilhaft, sofern die Amortisationszeit kleiner als ein definierter Grenzwert ist
- Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern die Amortisationszeit kleiner als die der Alternativen ist

Zentrale Annahmen

- Annahmen der statischen Investitionsrechnung (es wird ausschließlich ein repräsentativer Zeitabschnitt explizit berücksichtigt)

Berechnung

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{eingesetztes Kapital}}{\text{durchschnittliche Rückflüsse}}$$

$$\text{Durchschnittliche Rückflüsse} = \text{durchschnittlicher Gewinn} + \text{Abschreibungen}$$

Vorteile

- Einfache Anwendbarkeit der Methode
- Berücksichtigung von Kosten und Erlösen
- Ermöglichung einer Einschätzung des Risikos einer Investition

Nachteile

- Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten
- Methode der statischen Investitionsrechnung, d.h. keine Berücksichtigung des Zeitwerts des Geldes
- Keine Berücksichtigung der Liquidationserlöse in ursprünglicher Variante der Methode

Berechnungsbeispiel

Vergleich von zwei Investitionsalternativen

Alternative A:

Gewinn: 24.730 € / Jahr

Abschreibungen: 37.000 € / Jahr

Kapitaleinsatz: 197.000 €

Amortisationszeit

$$= 197.000 \text{ € / Jahr}$$

$$\div (24.730 \text{ € / Jahr}$$

$$+ 37.000 \text{ € / Jahr})$$

$$= 3,19 \text{ Jahre}$$

Alternative B:

Gewinn: 27.880 € / Jahr

Abschreibungen: 42.000 € / Jahr

Kapitaleinsatz: 227.000 €

Amortisationszeit

$$= 227.000 \text{ € / Jahr}$$

$$\div (27.880 \text{ € / Jahr}$$

$$+ 42.000 \text{ € / Jahr})$$

$$= 3,25 \text{ Jahre}$$

Alternative A weist einen kürzeren Zeitraum zur Wiedergewinnung des eingesetzten Kapitals, d.h. eine kürzere Amortisationszeit, auf und ist somit relativ vorteilhaft.

Quelle: GÖTZE, 2014

Bild A-17: Steckbrief einer Berechnungsmethode (5/12)

Berechnungsmethode: Kapitalwertmethode**Beschreibung**

- Ansatz der dynamischen Investitionsrechnung, bei dem alle Ein- und Auszahlungen auf einen Zeitpunkt ab- bzw. aufgezinst werden
- Das Ergebnis, der Nettobarwert, stellt den heutigen Wert der Investition dar
- Eine einzelne Investition ist absolut vorteilhaft, sofern der Kapitalwert größer als Null ist
- Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern der Kapitalwert größer als der der Alternativen ist

Zentrale Annahmen

- Annahmen der dynamischen Investitionsrechnung (d.h. der Wert der Zahlung hängt vom Zahlungszeitpunkt ab)
- Vollständiger Kapitalmarkt

Berechnung

$$KW = -A_0 + \sum_{t=0}^T \frac{(e_t - a_t)}{(1+i)^t} + \frac{L}{(1+i)^T}$$

Legende

KW : Kapitalwert

A_0 : Anschaffungsauszahlung

e_t : Einzahlungen im Zeitpunkt t

a_t : Auszahlungen im Zeitpunkt t

i : Kalkulationszinssatz

t : Zeitindex

T : letzter Zeitpunkt, in dem Zahlungen anfallen

L : Liquidationserlös

Vorteile

- ➔ Berücksichtigung der Zeitpunkte von Ein- und Auszahlungen
- ➔ Ermöglichung der Bestimmung des opt. Einsatzzeitpunktes einer Investition
- ➔ Einfache Anwendbarkeit der Methode

Nachteile

- ➔ Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten
- ➔ Hoher Datenbeschaffungsaufwand

Berechnungsbeispiel**Bestimmung des Kapitalwerts**

Kalkulationszinssatz = 8 %

Daten	Anschaffungsauszahlung	Rückflüsse				
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$
Objekt A	100.000 €	28.000 €	30.000 €	35.000 €	32.000 €	30.000 €

Kapitalwert

$$= -100.000 \text{ €} + 28.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-1} + 30.000 \cdot 1,08^{-2} + 35.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-3} \\ + 32.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-4} + 30.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-5} + 5.000 \text{ €} \cdot 1,08^{-5} = 26.771,59 \text{ €}$$

Die Investition weist einen positiven Kapitalwert von 26.771,59€ auf und ist somit absolut vorteilhaft.

Quelle: Götze, 2014; HEESSEN, 2016; KRUSCHWITZ, 2011

Bild A-18: Steckbrief einer Berechnungsmethode (6/12)

Berechnungsmethode: Annuitätenmethode	
<p>Beschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> Ansatz der dynamischen Investitionsrechnung zur Bestimmung einer Folge an gleich hohen Zahlungen für einen betrachteten Zeitraum Darstellung einer periodenbezogenen Größe, womit der jährliche Kapitalüberschuss einer Investition und nicht der Gesamterfolg beschrieben wird <p>Zentrale Annahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> Annahmen der dynamischen Investitionsrechnung (d.h. der Wert der Zahlung hängt vom Zahlungszeitpunkt ab) Annahme des vollständigen Kapitalmarkts 	<p>Berechnung</p> $Ann = KW * \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1}$ <p>Legende</p> <p>Ann : Annuität</p> <p>KW : Kapitalwert</p> <p>i : Kalkulationszinssatz</p> <p>T : Nutzungsdauer</p> <p>$\frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1}$: Wiedergewinnungsfaktor</p>
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Berücksichtigung der Zeitpunkte von Ein- und Auszahlungen ➤ Berücksichtigung von Kosten und Erlösen ➤ Einfache Interpretierbarkeit des Ergebnisses 	<p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten ➤ Erzeugt in ursprünglicher Form nicht zwingend die gleichen Ergebnissen wie die Kapitalwertmethode (bei ungleichen Nutzungsdauern) ➤ Hoher Datenbeschaffungsaufwand
<p>Berechnungsbeispiel</p> <p>Bestimmung der Annuität auf Basis des Kapitalwerts</p> <p>Kapitalwert: 26.771,59 €</p> <p>Kalkulationszinssatz: 8 %</p> <p>Nutzungsdauer: 5 Jahre</p> $Ann = 26.771,59 * \frac{1,08^5 * 0,08}{1,08^5 - 1} = 6.705,12 \text{ €}$ <p>Die Investition weist eine Annuität bzw. eine gleichbleibende, jährliche Zahlung von 6.705,12 € auf.</p> <p style="text-align: right;">Quelle: GÖTZE, 2014; KRUSCHWITZ, 2011</p>	

Bild A-19: Steckbrief einer Berechnungsmethode (7/12)

Berechnungsmethode: Vermögensendwert- bzw. Horizontwertmethode

Beschreibung

- Ansatz der dynamischen Investitionsrechnung zur Bestimmung des Geldvermögenszuwachses der durch ein Investitionsobjekt entsteht
- Eine Investition ist absolut vorteilhaft, sofern der Vermögensendwert größer als Null ist
- Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern der Vermögensendwert größer als der der Alternativen ist

Zentrale Annahmen

- Annahmen der dynamischen Investitionsrechnung (d.h. der Wert der Zahlung hängt vom Zahlungszeitpunkt ab)

Berechnung

$$VE = N_T + \begin{cases} V_{T-1} * (1 + h), & \text{für } V_{T-1} \geq 0 \\ V_{T-1} * (1 + s), & \text{für } V_{T-1} < 0 \end{cases}$$

Legende

VE : Vermögensendwert

N : Nettozahlung

V : Geldvermögen

h : Habenzinssatz

s : Sollzinssatz

t : Zeitpunkt t

T : letzter betrachtete Zeitpunkt

Vorteile

- ➔ Berücksichtigung der Zeitpunkte von Ein- und Auszahlungen
- ➔ Berücksichtigung von Kosten und Erlösen
- ➔ Keine Annahme bzgl. des vollkommenen Kapitalmarktes

Nachteile

- ➔ Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten
- ➔ Hoher Datenbeschaffungsaufwand
- ➔ Methode führt in ursprünglicher Form nicht zwingend zu gleichen Ergebnissen wie Kapitalwertmethode

Berechnungsbeispiel

Bestimmung des Vermögensendwertes

Zeitpunkt t	Nettozahlung N_t
0	-100.000 €
1	28.000 €
2	30.000 €
3	35.000 €
4	32.000 €
5	30.000 €
Liquidations- erlös	5.000 €

Sollzinssatz: 6 %

Habenzinssatz: 10 %

$$V_{\text{Vermögenskonto}} = 28.000€ * 1,06^4 + 30.000€ * 1,06^3 + 35.000€ * 1,06^2 + 32.000€ * 1,06 + 30.000€ + 5.000€ = 179.325,83€$$

$$V_{\text{Verbindlichkeitskonto}} = -100.000 * 1,10^5 = -161.051€$$

$$VE = 179.325,83€ - 161.051€ = 18.274,83€$$

Der Geldvermögenszuwachs, d.h. der Vermögensendwert, durch die Investition beträgt 18.274,83€.

Quelle: GÖTZE, 2014; POGGENSEE, 2015

Bild A-20: Steckbrief einer Berechnungsmethode (8/12)

Berechnungsmethode: Methode der vollständigen Finanzpläne

Beschreibung

- Ansatz in dem alle originären und dispositiven Zahlungen die einer Investition zuzuordnen sind in einer tabellarischen Form dargestellt werden
- Als Zielgröße können der (Vermögens-) Endwert, der Anfangswert, Zwischenwerte, Entnahmen oder spezifische Rentabilitäten genutzt werden
- Eine Investition ist absolut vorteilhaft, wenn bspw. der Endwert größer ist als der der Opportunität
- Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern bspw. der Endwert größer als der der Alternativen ist

Vorteile

- Transparente Darstellung aller Zahlungen
- Keine Annahme des vollständigen Kapitalmarktes
- Berücksichtigung der Herkunft des Kapitals

Nachteile

- Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten
- Hoher Datenbeschaffungsaufwand

Beispiel eines vollständigen Finanzplans

	Zeitperiode					
	t = 0	t = 1	t = 2	t = 3	Originäre Zahlungsreihe	
Zahlungsreihe	-100.000 €	28.000 €	30.000 €	35.000 €	32.000 €	30.000 €
Eigenkapital						
- Entnahme						
+ Einlage	20.000					
Kredit mit Ratentilg.						
+ Aufnahme	25.000					0
- Tilgung		-6.250	-6.250	-6.250	-6.250	0
- Sollzinsen		-2.250	-1.687,5	-1.1250	-562,50	0
Kredit mit Annuitätentilgung						
+ Aufnahme	25.000					0
- Tilgung		-2.250	-2.250	-2.250	-25.000	0
- Sollzinsen					-2.250	0
Kontokorrentkredit						
+ Aufnahme	30.000					
- Tilgung		-13.950	-16.050	0	0	0
- Sollzinsen		-3.300	-1.765,50	0	0	0
Geldanlage pauschal						
- Geldanlage			-1.997	-25.494,82		-36.624,73
+ Auflösung					412,99	
+ Habenzinsen				119,82	1.649,51	1.624,73
Finanzierungssaldo	0	0	0	0	0	0
Bestandsgrößen						
Kreditbestand						
Ratentilgung	25.000	18.750	12.500	6.250	0	0
Endtilgung	25.000	25.000	25.000	25.000	0	0
Annuitätentilgung						
Kontokorrent	30.000	16.050	0	0	0	0
Guthabenb. pauschal			1.997	27.491,82	27.078,83	63.703,56
Bestandssaldo	-80.000	-59.800	-35.503	-3.758,18	27.078,83	63.703,56

Quelle: GÖTZE, 2014; KRUSCHWITZ, 2011

Bild A-21: Steckbrief einer Berechnungsmethode (9/12)

Berechnungsmethode: Interne Zinssatz-Methode**Beschreibung**

- Ansatz der dynamischen Investitionsrechnung zur Bestimmung der Verzinsung eines Investitionsobjekts für einen betrachteten Zeitraum
- Eine Investition ist absolut vorteilhaft, sofern der interne Zinssatz größer als der Kalkulationszinssatz ist
- Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern der interne Zinssatz größer als der der Alternativen ist

Zentrale Annahmen

- Annahmen der dynamischen Investitionsrechnung (d.h. der Wert der Zahlung hängt vom Zahlungszeitpunkt ab)
- Vollständiger Kapitalmarkt

Berechnung

$$KW = -A_0 + \sum_{t=0}^T \frac{(e_t - a_t)}{(1+r)^t} + \frac{L}{(1+r)^T} = 0$$

Legende

KW : Kapitalwert

A_0 : Anschaffungsauszahlung

e_t : Einzahlungen im Zeitpunkt t

a_t : Auszahlungen im Zeitpunkt t

r : Interner Zinssatz

t : Zeitindex

T : Letzter Zeitpunkt, in dem Zahlungen anfallen

L : Liquidationserlös

Vorteile

- Berücksichtigung der Zeitpunkte von Ein- und Auszahlungen
- Berücksichtigung von Kosten und Erlösen
- Einfache Interpretierbarkeit des Ergebnisses

Nachteile

- Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten
- Hoher Datenbeschaffungsaufwand
- Möglichkeit der Existenz mehrerer interner Zinssätze bei zusammengesetzten Investitionen, welche ökonomisch nicht sinnvoll sind

Berechnungsbeispiel**Bestimmung des internen Zinssatzes**

Zinssatz I	Kapitalwert KW	Anmerkung
8 %	26.771,59 €	Zuvor bestimmter Kapitalwert des Beispiels im Steckbrief „Kapitalwertmethode“
18 %	-1.619,51 €	Annahme eines neuen Zinssatzes zur Bestimmung des internen Zinssatzes
17 %	740,69 €	Erneute Annahme eines neuen Zinssatzes zur Bestimmung des internen Zinssatzes

$$r \cong 0,17 + \frac{740,69 \text{ €}}{740,69 \text{ €} - (-1.619,51 \text{ €})} * (0,18 - 0,17) \cong 0,1731 = 17,31 \%$$

Der interne Zinssatz bzw. die Verzinsung der Investition beträgt 17,31 %.

Quellen: GÖTZE, 2014; SCHENTLER ET AL., 2016

Bild A-22: Steckbrief einer Berechnungsmethode (10/12)

Berechnungsmethode: Sollzinssatzmethode

Beschreibung

- Ansatz der dynamischen Investitionsrechnung zur Bestimmung des Zinssatzes bei dem der Vermögensendwert Null wird
- Eine Investition ist absolut vorteilhaft, sofern der kritische Sollzinssatz größer als der Sollzinssatz ist

Zentrale Annahmen

- Annahmen der dynamischen Investitionsrechnung (d.h. der Wert der Zahlung hängt vom Zahlungszeitpunkt ab)

Berechnung

$$s_k \cong s_1 + \frac{VE_1}{VE_1 - VE_2} * (s_2 - s_1)$$

Legende

s_k : Kritischer Sollzinssatz

s_i : Sollzinssatz zum Vermögensendwert i

VE_i : Vermögensendwert i

Vorteile

- Berücksichtigung der Zeitpunkte von Ein- und Auszahlungen
- Berücksichtigung von Kosten und Erlösen
- Einfache Interpretierbarkeit des Ergebnisses

Nachteile

- Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten
- Keine Bewertung der relativen Vorteilhaftigkeit, da der Vergleich von kritischen Soll-Zinssätzen i.d.R. nicht sinnvoll ist

Berechnungsbeispiel

Vergleich von zwei Investitionsalternativen

Zeitpunkt t	Nettozahlung N_t	
0	-100.000 €	Sollzinssatz: 6 %
1	28.000 €	$V_{\text{Vermögenskonto}}$
2	30.000 €	$= 28.000\text{€} * 1,06^4 + 30.000\text{€} * 1,06^3 + 35.000\text{€} * 1,06^2$
3	35.000 €	$+ 32.000\text{€} * 1,06 + 30.000\text{€} + 5.000\text{€} = 179.325,83\text{€}$
4	32.000 €	$V_{\text{Verbindlichkeitskonto}} = -100.000 * (1 + s_k)^5$
5	30.000 €	$= -179.325,83\text{€}$
Liquidations- erlös	5.000 €	$s_k = 0,1239 = 12,39\%$

Der Sollzinssatz des Investitionsobjekts ist mit 6 % geringer als der kritische Sollzinssatz mit 12,39 %. Somit ist die Investition absolut vorteilhaft.

Quelle: GÖTZE, 2014

Bild A-23: Steckbrief einer Berechnungsmethode (11/12)

Berechnungsmethode: Dynamische Amortisationsrechnung

Beschreibung

- Ansatz der dynamischen Investitionsrechnung, bei dem der Zeitraum best. wird, in dem das einges. Kapital durch die Investition wiedergewonnen wird
- Der kumulierte Barwert der Nettozahlungen entspricht dem Kapitalwert in abh. der Nutzungszeit; so lange dieser negativ ist, ist die Amortisationszeit nicht erreicht
- Eine Investition ist absolut vorteilhaft, sofern die Amortisationszeit kleiner als ein definierter Grenzwert ist
- Eine Investition ist relativ vorteilhaft, sofern die Amortisationszeit kleiner als die der Alternativen ist

Zentrale Annahmen

- Annahmen der dynamischen Investitionsrechnung (d.h. der Wert der Zahlung hängt vom Zahlungszeitpunkt ab)
- Vollständiger Kapitalmarkt

Berechnung

$$AZ \cong \frac{KW_{t^*}}{KW_{t^*} - KW_{t^*+1}}$$

Legende

AZ : Amortisationszeit

KW : Kapitalwert

t : Zeitpunkt bzw. Periode

t^* : Periode in der letztmalig ein negativer kumulierter Barwert (bzw. nutzungszeitabhängiger Kapitalwert) auftritt

Vorteile

- ➔ Berücksichtigung der Zeitpunkte von Ein- und Auszahlungen
- ➔ Berücksichtigung von Kosten und Erlösen
- ➔ Ermöglichung das Risiko einer Investition abzuschätzen

Nachteile

- ➔ Problematik der Zuordnung von Umsätzen zu Investitionsobjekten
- ➔ Erzeugt nicht zwingend gleiches Ergebnis wie die Kapitalwertmethode
- ➔ Keine Berücksichtigung der Liquidationserlöse in ursprüngl. Variante

Berechnungsbeispiel

Bestimmung der Amortisationszeit

Zeitpunkt t	Nettozahlung N_t	Barwert der Nettozahlung	Kumulierter Barwert der Nettozahlung
0	-100.000 €	-100.000 €	-100.000 €
1	28.000 €	25.925,93 €	-74.074,07 €
2	30.000 €	25.720,17 €	-48.353,90 €
3	35.000 €	27.784,13 €	-20.569,77 €
4	32.000 €	23.520,96 €	2.951,19 €

$$AZ \cong \frac{-20.569,77}{-20.569,77 - 2.951,19} \cong 3,87 \text{ Jahre}$$

Der Zeitraum zur Wiedergewinnung des eingesetzten Kapitals, d.h. die Amortisationszeit, beträgt 3,87 Jahre.

Quelle: GÖTZE, 2014; HEESSEN, 2016

Bild A-24: Steckbrief einer Berechnungsmethode (12/12)

Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind keine Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Paderborn, im Oktober 2021

Robert Joppen

