



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

DISSERTATION

Phasenmodell zur Entwicklung einer
werkzeug- und maschinenzustandsbedingten
Produktionsreihenfolgeoptimierung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der technischen Wissenschaften

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihm

(Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

unter Begutachtung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Hubert Biedermann

(Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl und Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften)

und

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Peter Plapper

(Universität Luxemburg, Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. Matthias Karner

1127551

Ogugasse 5, 1220 Wien

Wien, im Dezember 2019

Matthias Karner



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Dissertation nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Dissertationsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der von den Begutachtern beurteilten Arbeit inhaltlich übereinstimmt.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Fraunhofer Austria Research GmbH (FhA) im Rahmen eines industriefinanzierten Forschungsprojektes bei der voestalpine Böhler Bleche GmbH (BBG) entstanden. Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, um all jenen Danke zu sagen, die mich im Laufe meiner akademischen Laufbahn an der Technischen Universität Wien (TUW) unterstützt haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Sihn, Geschäftsführer von FhA sowie Leiter des Bereichs Betriebstechnik und Systemplanung am Institut für Managementwissenschaften der TUW für die Betreuung dieser Dissertation bedanken. Seine kritischen Betrachtungen und Denkanstöße haben erheblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Auch möchte ich mich bei den Gutachtern Univ.-Prof. Dr. mont. Hubert Biedermann und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper für das wertvolle Feedback bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich herzlichst beim gesamten Team der BBG, allen voran Dipl.-Ing. Horst Saiger und Dipl.-Ing. (FH) Michael Lackner, für die zeitliche, inhaltliche und finanzielle Unterstützung bedanken, ohne die die Durchführung der vorliegenden Dissertation nicht möglich gewesen wäre. Es war eine außerordentliche Bereicherung für mich, ein Forschungsthema in Praxisnähe mit euch gemeinsam zu bearbeiten. Durch die enge Vernetzung der wissenschaftlichen und praxisbezogenen Betrachtungsweise können beide Bereiche enorm profitieren. Vielen Dank!

Bei Dr. Fazel Ansari, Leiter der Forschungsgruppe Smart and Knowledge-Based Maintenance an der TUW, möchte ich mich für die fachlichen Diskussionen und Denkanstöße bedanken, die mich wesentlich bei meiner Dissertation unterstützt haben. Weiterer Dank gilt auch meinen Kollegen bei FhA für die interessante Zusammenarbeit in zahlreichen Forschungsprojekten in Österreich und der Europäischen Union.

Meinen Eltern Erika Karner und Ing. Andreas Karner, sowie meiner Partnerin Denise Hüttenbrenner, MSc (WU) gilt ein besonderer Dank. Ihr habt mich stets unterstützt und motiviert. Danke, dass ihr immer für mich da seid, ich bin sehr froh, so eine tolle Familie zu haben!

Wien, im Dezember 2019



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die Digitalisierung erobert die Industrie – es entstehen neue Datenquellen, die für Predictive Maintenance, Materialtracking, oder andere Funktionen genutzt werden können. Inwiefern verändern diese Daten aber die Paradigmen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS)? Basierend auf dieser Fragestellung widmet sich die vorliegende Dissertation dem Thema der Nutzung von Sensordaten in der PPS.

Im Speziellen sind es dabei Daten über die Zustände von Produktionswerkzeugen und -maschinen, die für die PPS relevant sind: In Branchen, wie beispielsweise der metallverarbeitenden Industrie, aber auch in der Halbleiter- und Lebensmittelindustrie, spielt der Zustand eines Produktionsmittels eine entscheidende Rolle in der Frage, ob ein Produkt an einem Produktionsmittel gefertigt werden kann oder nicht. Ist der Zustand nicht ausreichend, muss entweder (i) das Produktionsmittel durch Rüsten, Reinigen oder Instandsetzen in den gewünschten Zustand versetzt oder (ii) der Produktionsplan angepasst werden. Kombiniert man die Zustandsabhängigkeiten von Produkten mit dem Megatrend der Produktindividualisierung und dem damit gepaarten Anstieg an Produktvarianten (vgl. Schuh et al., 2018b), entstehen in der PPS Nebenbedingungen, die durch gängige Methoden nicht mehr zu bewältigen sind (vgl. Kao et al., 2018; Karner und Sihm, 2018). Dynamische Zustandsänderungen der Produktionsmittel verkomplizieren zudem eine adäquate Abbildung in der kurzfristigen Produktionsreihenfolgeplanung; zur realitätsnahen Abbildung eines Produktionssystems muss daher der Zustand einer Anlage in objektiver Form erfasst und in die Planung integriert werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, eine Möglichkeit zu schaffen, um Werkzeug- und Maschinenzustandsinformationen in die Produktionsplanung zu integrieren. Um das definierte Ziel zu erreichen, wird als Ergebnis der vorliegenden Dissertation eine Methode entwickelt, die eine werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMB-PRO) ermöglicht. Dazu werden wissenschaftliche Erkenntnisse aus den Bereichen der Ingenieur-, Management- und Informationswissenschaften synthetisiert und in den Kontext der zustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung gebracht. Die Methode kann im Rahmen von Instanziierungen dazu genutzt werden, um für spezifische Anwendungsfälle Produktionsreihenfolgeoptimierungsmodelle zu entwickeln, die Zustandsabhängigkeiten zwischen Produktionsmitteln und Produkten berücksichtigen. Die praktische Anwendbarkeit der Methode wird im Rahmen von zwei Fallstudien in der metallverarbeitenden Industrie demonstriert.

Schlüsselwörter: Condition Monitoring, Produktionsplanung und -steuerung, Produktionsreihenfolgeplanung, Optimierung, metallverarbeitende Industrie;



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Digitalization is gradually conquering the industrial sector; new data sources are created which can be used for predictive maintenance, material tracking and various others. To what extent does this data change the paradigms of production planning and control (PPC)? Based on this question, this dissertation elaborates on the use of sensor data in PPC.

In particular, it is the data on the condition of production tools and machines which is relevant for PPC: In industries such as the metalforming industry, but also in the semiconductor and food industries, the condition of production equipment plays a decisive role in the question of whether a product can be manufactured or not. If the condition is not sufficient, the equipment must (i) either be maintained (to achieve the desired condition) by setting up, cleaning or repairing it or (ii) the production plan must be adapted. If condition dependencies are combined with the megatrend of product individualization and the associated increase in product variants (vgl. Schuh et al., 2018b), ancillary conditions arise that can no longer be modelled by existing methods (vgl. Kao et al., 2018; Karner und Sihm, 2018). Dynamic changes in the condition of production equipment also complicate adequate short-term production sequence planning. In order to realistically model a production system, the condition has to be assessed objectively and integrated into PPC.

The aim of this dissertation is to create a method for integrating tool and machine condition information into production planning. Therefore, a method is developed which allows a tool and machine condition dependent production sequence optimization (WMBPRO). For this purpose, scientific findings from the fields of engineering, management and information sciences are synthesized and contextualized within the topic condition-related production sequence optimization. The method can be instantiated to develop production sequence optimization models for specific applications that take into account condition dependencies between production equipment and products. The practical applicability of the method is demonstrated in two case studies in the metalforming industry.

Keywords: Condition Monitoring, Production Planning and Control, Scheduling and Sequencing, Optimization, Metalforming Industry;

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ausgangssituation	1
1.2	Forschungsleitende Hypothese	3
1.3	Aufbau und Struktur der Arbeit	3
1.4	Wissenschaftstheoretische Grundpositionen	5
1.4.1	Wissenschaftsverständnis der Arbeit	6
1.4.2	Forschungsmethodologie: Überblick und Auswahl	7
1.4.3	Forschungsdesign	12
1.4.4	Forschungsfragen	15
2	Theoretische Grundlagen und Eingrenzung des Untersuchungsbereiches	17
2.1	Planungsmethoden der Produktion	17
2.1.1	Historischer Überblick der Produktionsplanung	17
2.1.2	Definition Produktionsplanung und -steuerung	18
2.1.3	Planungsprobleme in der Produktionsplanung und Steuerung	19
2.1.4	Scheduling und Sequencing	21
2.2	Optimierungsmethoden im Scheduling und Sequencing	21
2.2.1	Taxonomie der Optimierungsalgorithmen	22
2.2.2	Kombinatorische Optimierung	23
2.3	Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen	24
2.3.1	Entwicklung der Instandhaltung	24
2.3.2	Narrativer Literaturüberblick: Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen	26
2.4	Einsatz von Algorithmen des maschinellen Lernens im Kontext der Produktion	29
2.4.1	Methoden des maschinellen Lernens	29
2.4.2	Anwendungsbeispiele aus dem Bereich Produktion	30
2.5	Eingrenzung des Untersuchungsbereiches	31
2.5.1	Einsatz von Algorithmen des maschinellen Lernens zum Ableiten und Prognostizieren von Werkzeug- und Maschinenzuständen	31
2.5.2	Einsatz von Optimierungsalgorithmen in der Produktionsplanung	32
2.5.3	Integrierte Betrachtung von Condition Monitoring und Produktionsplanung	33
2.5.4	Integration von (1), (2) und (3)	33

3	Stand der Forschung	35
3.1	Methodologie der Literaturanalyse	35
3.2	Systematische Literaturanalyse	36
3.2.1	Schlüsselwörter und Suchterme	36
3.2.2	Klassifizierung der Publikationen	37
3.2.3	Systematische Literaturrecherche	39
3.3	Diskussion der Literaturanalyse	39
3.3.1	Zusammenfassung des analysierten Forschungsfeldes	39
3.3.2	Narrative Literaturanalyse	41
3.3.3	Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse	44
4	Spezifische Problemstellung und Zielsetzung	47
4.1	Spezifische Problemstellung	47
4.2	Spezifische Zielsetzung	49
4.3	Anforderungen an eine werkzeug- und maschinenzustandsbedingte Produktionsreihenfolgeoptimierung	49
5	Phasenmodell zur Entwicklung einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMBPRO)	52
5.1	Überblicksdarstellung: Phasenmodell	52
5.2	Phase 1: Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen	55
5.2.1	Anforderungen an das Condition Monitoring System	57
5.2.2	Auswahl eines Condition Monitoring Systems	57
5.2.3	Modellierung des Zustandes: Healthpoints	61
5.2.4	Ergebnisse	63
5.3	Phase 2: Modellierung von Zustandsabhängigkeiten	63
5.3.1	Modellierung einer eindimensionalen Zustandsabhängigkeit	66
5.3.2	Modellierung einer mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeit	68
5.3.3	Ergebnisse	70
5.4	Phase 3: Modellierung der WMBPRO	71
5.4.1	Formulierung des Optimierungsproblems	71
5.4.2	Formulierung der Optimierungszielfunktion	72

5.4.3	Abbildung des Produktionsprozesses	75
5.4.4	Ergebnisse	78
5.5	Phase 4: Formulierung des Optimierungsalgorithmus	79
5.5.1	Formulierung mittels Metaheuristiken	80
5.5.2	Formulierung einer Multi-Level-Optimierungsheuristik	86
5.5.3	Ergebnisse	89
5.6	Zusammenfassung	89
6	Anwendung und Validierung des Phasenmodells	92
6.1	Rahmenbedingungen der Fallstudien	92
6.2	Fallstudie 1: WMBPRO an einer Tafelblechscherer	92
6.2.1	Ausgangssituation und Rahmenbedingungen	92
6.2.2	Aufgabenstellung der Fallstudie	93
6.2.3	Entwicklung einer WMBPRO an einer Tafelblechscherer: Phase 1	93
6.2.4	Entwicklung einer WMBPRO an einer Tafelblechscherer: Phase 2	97
6.2.5	Entwicklung einer WMBPRO an einer Tafelblechscherer: Phase 3	101
6.2.6	Entwicklung einer WMBPRO an einer Tafelblechscherer: Phase 4	106
6.2.7	Nutzenquantifizierung	109
6.2.8	Conclusio der Fallstudie	111
6.3	Fallstudie 2: WMBPRO an einem Walzgerüst	112
6.3.1	Ausgangssituation und Rahmenbedingungen	112
6.3.2	Aufgabenstellung der Fallstudie	113
6.3.3	Entwicklung einer WMBPRO an einem Walzgerüst: Phase 1	113
6.3.4	Entwicklung einer WMBPRO an einem Walzgerüst: Phase 2	114
6.3.5	Entwicklung einer WMBPRO an einem Walzgerüst: Phase 3	117
6.3.6	Entwicklung einer WMBPRO an einem Walzgerüst: Phase 4	121
6.3.7	Nutzenquantifizierung	124
6.3.8	Conclusio der Fallstudie	126
6.4	Vergleichsbetrachtung der Fallstudien	127

7	Resümee und Ausblick	129
7.1	Diskussion der Forschungsergebnisse	129
7.1.1	Abgleich mit den Anforderungen	129
7.1.2	Diskussion der Forschungsfragen	131
7.2	Weiterer Forschungsbedarf	133
8	Literaturverzeichnis	135
9	Nomenklatur	156
10	Tabellenverzeichnis	157
11	Abbildungsverzeichnis	158
12	Formel- und Gleichungsverzeichnis	160
13	Algorithmenverzeichnis	161
14	Sourcecodeverzeichnis	161
A	Appendix	163
A.1	Detailausführungen zur Durchführung der systematischen Literaturanalyse	163
A.1.1	Diskussion und Auswahl vorhandener Recherchemethodologien	163
A.1.2	Detailübersicht der Kategorien	165
A.1.3	Durchführung Systematische Literaturrecherche	168
A.1.4	Morphologische Literaturkategorisierung	171
A.1.5	Morphologische Analyse der Rechercheergebnisse	177
A.2	Detailausführungen zum Phasenmodell	186
A.2.1	Flussdiagramm Legende	186
A.2.2	Metaheuristiken Pseudocodes	186
A.2.3	C++ Implementierung Lösungsnummerierung für die MLO	189
A.3	Detailausführungen zu den Fallstudien	191
A.3.1	Normierte Fitnessfunktion	191
A.3.2	Fallstudie 1: Regressionsmodell	191
A.3.3	Fallstudie 1: Produktionsprozess	191

A.3.4 Fallstudie 1: Nutzenbewertung	193
A.4 Verzeichnis betreuter Studentarbeiten	194
A.5 Änderungslog	195

Es sei darauf hingewiesen, dass, um den Lesefluss nicht durch genderspezifische Formulierungen zu stören, sämtliche personenbezogenen Bezeichnungen geschlechtsneutral zu verstehen sind. Die vorliegende Arbeit verwendet dazu das generische Maskulinum (z.B. Mitarbeiter), wobei dies keinerlei Auskunft über das Geschlecht geben und keine Diskriminierung des weiblichen Geschlechts darstellen soll. Dahingehend mögen sich Frauen und Männer gleichermaßen angesprochen fühlen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ausgangssituation

„Der Transistor wird die Welt erobern.“ Dessen war man sich schon im Jahr 1965 bewusst, als Gordon Moore mit seinem Jahrbuchaufsatz einen exponentiellen Anstieg der Prozessorleistungen prophezeite.¹ Dieser Anstieg war der zentrale Befähiger für den technologischen Fortschritt und die Computerisierung des letzten halben Jahrhunderts. Waren die ersten Rechenmaschinen noch wahre Giganten mit dennoch begrenzten Prozessorleistungen, so entstanden Mitte der 2000er Jahre mobile Kleinstrechenmaschinen mit herausragenden Leistungswerten – das Smartphone war geboren.² Das Präfix „Smart“ blieb längst nicht nur dem Sektor der mobilen Telekommunikation vorbehalten, sondern wurde auch in andere Bereiche übernommen. Heute, Ende der 2010er und Anfang der 2020er Jahre, hat der Begriff „Smart“ eine gewisse Omnipräsenz erreicht und gilt als zentraler Schlüsselbegriff für den digitalen Wandel. Smarte Systeme generieren und verarbeiten Daten, verfügen über eigene Rechenleistung, sind miteinander vernetzt (kommunizieren über das Internet) und vereinfachen bzw. automatisieren Tätigkeiten für ihre Nutzer. Seien es Staubsaugerroboter, die sich über Sprachbefehle dirigieren lassen, automatisierte Heizsysteme, die auf das Wetter reagieren, oder Assistenzsysteme, die zur schnellen Informationsbereitstellung beitragen – längst haben derartige Systeme Einzug in unseren Alltag gehalten und helfen uns dabei Zeit einzusparen, um uns auf andere Dinge konzentrieren zu können.

Lange Zeit waren es Industrie und Militär, die den technologischen Fortschritt vorantrieben und dessen Errungenschaften erst nach und nach in Endverbrauchermärkte übertragen wurden. Im Zuge des digitalen Wandels sind es aber die Endkonsumenten, für die explizit smarte Systeme entwickelt werden. Der industrielle Sektor hat das Potential dieser Systeme aber mittlerweile für sich erkannt und so hat der digitale Wandel auch Einzug in die Industrie gehalten. Im Rahmen der Digitalisierung der Industrie wurden zahlreiche Technologien, Methoden und Lösungen entwickelt. Ohne an dieser Stelle im Detail auf diese Digitalisierungsparadigmen einzugehen, zielen sie summa summarum darauf ab, die Effektivität und Effizienz der industriellen Produktion durch den Einsatz von Digitalisierungstechnologien zu steigern. Ausgangsbasis bilden dabei Daten, die über Sensoren an den Anlagen generiert werden, wobei die Datengenerierung jedoch nur die Basis bildet, da Daten ohne Kontext noch keinen Mehrwert liefern. Erst durch das Einbeziehen von weiterem Kontextwissen können aus den generierten Daten nützliche Informationen extrahiert werden. Führt man sich hierzu ein Beispiel aus dem Bereich der Endverbraucher vor Augen, so sind es beim Smartphone Apps, die beispielsweise GPS-Signale in eine visualisierte Laufstrecke umwandeln und somit dem Nutzer wertvolle Informationen liefern. In der Industrie sind es Maschinensteuerungssignale, Sensordaten und Qualitätsmessungen, die die Rohdaten in der untersten Ebene bilden. Im Hinblick auf die klassische Automatisierungspyramide bedarf es zahlreicher weiterer Ebenen von Datenverarbeitung und -aggregation, ehe in den oberen Ebenen konkrete

¹Konkret bezieht sich das Moore'sche Gesetz auf die Verdoppelung der Integrationsdichte (Anzahl der Transistoren pro Flächeneinheit) alle 12 bis 24 Monate.

²Z.B. Vorstellung des iPhone 1 im Jahr 2007

Informationen generiert werden können.

Ein Anwendungsgebiet in der Industrie ist hierbei die Maschinenzustandsüberwachung – das Condition Monitoring. Maschinendaten werden miteinander kombiniert und unter der Berücksichtigung von Verschleißmodellen werden Maschinenzustände abgeleitet. So entsteht aus rohen Maschinendaten die Information des Maschinenzustandes. Lässt man zudem weitere Informationen wie z.B. das Produktionsprogramm einfließen, so lassen sich zukünftige Maschinenzustandsänderungen prognostizieren. So sehen Lee et al. (2014) das Hauptziel dieser Prognostik darin, Events (z.B. Maschinenausfälle) vorherzusagen, bevor sie auftreten.

Wie bereits angesprochen, liefert das Vorhandensein von Informationen selbst noch keinen Mehrwert. Der eingangs erwähnte Smartphonennutzer, beispielsweise, blickt auf die aus den GPS-Daten generierte Laufstrecke und nutzt die Informationen dazu, über seinen Trainingsplan zu reflektieren und sich neue Ziele zu setzen. Im Kontext des Condition Monitoring können die Maschinenzustandsinformationen dazu genutzt werden, um notwendige Instandhaltungstätigkeiten zu planen und vor einem Maschinenausfall reagieren zu können – eine vorausschauende bzw. antizipative Instandhaltung wird damit ermöglicht.³ In den letzten Jahren hat diese antizipative Instandhaltung in Wissenschaft und Praxis stark an Bedeutung gewonnen – nicht zuletzt auch gefördert durch den digitalen Wandel der Industrie. Während der Maschinenzustand für die Instandhaltung eine zentrale Rolle innerhalb der aktuellen Paradigmen der Instandhaltungsplanung einnimmt, so bleiben diese Zustandsinformationen innerhalb der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) weitestgehend ungenutzt.

In einigen Industrien, wie beispielsweise der metallverarbeitenden Industrie, aber auch in der Lebensmittelindustrie, ist der Maschinen- bzw. Werkzeugzustand eines Produktionsmittels entscheidend für die Frage, ob ein Produktionsauftrag gefertigt werden kann oder nicht. Sind die Zustände nicht ausreichend, muss entweder (i) das Produktionsmittel durch Rüsten, Reinigen, oder Reparieren in den geeigneten Zustand versetzt werden, oder (ii) die Produktionsreihenfolge derart verändert werden, dass ein weiterer (anderer) Produktionsauftrag gefertigt werden kann.⁴ Bei wenigen verschiedenen Produkten im Portfolio ist dieser Zusammenhang noch einfach zu modellieren, wird aber zunehmend komplexer, je mehr Produktvarianten berücksichtigt werden müssen. Dabei stellt die Produktindividualisierung einen Megatrend dar, der bereits seit einiger Zeit entlang gesamter Wertschöpfungsketten zu beobachten ist (vgl. Schuh et al., 2018b; Taphorn, 2014; Mehrsai et al., 2013). Selbst Hersteller am Beginn der Wertschöpfungskette, wie die metallverarbeitende Industrie, verzeichnen einen Anstieg an Produktvarianten. Eine Vielzahl an Varianten bedeutet eine Vielzahl an verschiedenen Anforderungsprofilen an die Produktionsmittel, bei Betrachtung einer Werkzeug- und Maschinenzustandsabhängigkeit der Produkte. Während gewisse Produkte hohe Anforderungen (geringes Toleranzniveau, gereinigte Anlage) an die Werkzeug- bzw. Maschi-

³Der Mehrwert einer vorausschauenden Instandhaltung liegt in der Reduktion der Instandhaltungs- und Fehlerfolge- bzw. Ausfallkosten (Instandhaltungstätigkeiten werden zustandsabhängig nur dann durchgeführt, wenn sie wirklich notwendig sind).

⁴In der metallverarbeitenden Industrie lässt sich dieser Zusammenhang, zum Beispiel auf den Werkzeugzustand eines Schneidmittels zurückführen. In der Lebensmittelindustrie kann die Kontamination eines Fertigungsmittels mit kritischen Allergenen herangezogen werden.

nenzustände ihrer Produktionsmittel bedingen (daher einen Mindestzustand aufweisen, vgl. Hao et al., 2017; Doleschal und Klemmt, 2015; Ghosh et al., 2007), sind andere unkritischer. Der Zusammenhang ist aber nicht nur unidirektional (Produkt abhängig vom Maschinenzustand), sondern bidirektional (Maschinenzustand abhängig vom Produkt bzw. von dessen Materialeigenschaften, wie z.B. dargestellt von den Autoren Arrazola et al., 2013, S. 702 sowie Zhai und Reinhart, 2018, S. 301). Denn der Verschleiß bzw. eine Kontamination einer Anlage variiert je nach Produktionsprogramm (z.B. erhöhter Verschleiß durch zähe Werkstoffe). (vgl. Karner und Sihm, 2018) Eine Berücksichtigung dieser zusätzlichen Nebenbedingungen neben den klassischen Zielgrößen der Feinplanung führt zu einer erhöhten Planungskomplexität (vgl. Tomislav, 2017; Brecher et al., 2012).

Um dieses Problem zu adressieren, wird in der vorliegenden Arbeit eine Methode entwickelt, die die Produktionsplanung (im Speziellen die Produktionsreihenfolgeplanung) um Informationen über Werkzeug- und Maschinenzustände erweitert.

1.2 Forschungsleitende Hypothese

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es ein Unterstützungswerkzeug zu konzipieren, das Produktionsplaner bei der komplexen Tätigkeit der Produktionsreihenfolgeplanung unterstützt und die Effektivität und Effizienz der Produktionsplanung erhöht. Das Unterstützungswerkzeug soll dabei die Optimierung unterschiedlicher logistischer⁵ und produktionstechnischer⁶ Zielgrößen ermöglichen und dabei explizit Werkzeug- und Maschinenzustandsabhängigkeiten berücksichtigen. Die forschungsleitende Hypothese wird dabei auf den Nutzen des Unterstützungswerkzeuges ausgerichtet, und lässt sich folgendermaßen formulieren:

„Der Einsatz einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung führt zu einem signifikanten Nutzen in Bezug auf logistische und produktionstechnische Zielgrößen.“

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt. In der Einleitung erfolgt die Präsentation der Forschungsidee, sowie die Darlegung der wissenschaftstheoretischen Grundpositionen in Form von Ontologie, Epistemologie und Methodologie. Anschließend werden die theoretischen Grundlagen definiert und die Begriffsabgrenzungen durchgeführt. In Abschnitt 3 „Stand der Forschung“ wird der aktuelle Forschungsstand abgebildet. Anhand dieses Überblicks erfolgt im darauffolgenden Abschnitt die Konkretisierung von Problemstellung und Zielsetzung. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 5 „Entwicklung einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMBPRO)“ ein Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO präsentiert. Das Phasenmodell wird anschließend anhand von Fallstudien angewendet

⁵Termintreue, Auslastung, Bestand, Durchlaufzeit

⁶Energie- und Ressourceneffizienz

Einleitung	
<ul style="list-style-type: none"> • Motivation und Ausgangssituation • Ziele der Dissertation: forschungsleitende Hypothese • Aufbau und Struktur der Arbeit • Wissenschaftstheoretische Grundpositionen 	
Theoretischer Grundlagen	
<ul style="list-style-type: none"> • Planungsmethoden der Produktion • Optimierungsmethoden im Scheduling und Sequencing • Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen • Einsatz von Algorithmen des maschinellen Lernens im Kontext der Produktion 	
Stand der Forschung	
<ul style="list-style-type: none"> • Methodologie der Literaturrecherche • Systematische Literaturanalyse • Diskussion der Literaturanalyse 	
Spezifizierte Problemstellung und Zielsetzung	
<ul style="list-style-type: none"> • Spezifische Problemstellung und Zielsetzung • Anforderungen an eine WMBPRO 	
Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO	
<ul style="list-style-type: none"> • Phase 1: Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen • Phase 2: Modellierung von Zustandsabhängigkeiten • Phase 3: Modellierung der WMBPRO • Phase 4: Formulieren des Optimierungsalgorithmus • Zusammenfassung 	
Anwendung und Validierung des Phasenmodells	
<ul style="list-style-type: none"> • Rahmenbedingungen der Fallstudien • Fallstudie 1: Tafelblechschere • Fallstudie 2: Duo Walzgerüst • Vergleichsbetrachtung der Fallstudien 	
Resümee und Ausblick	
<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion der Forschungsergebnisse • Weiterer Forschungsbedarf 	

Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau der Dissertation

und validiert. Abschließend werden die Forschungsfragen diskutiert, Restriktionen gebildet und weiterer Forschungsbedarf abgeleitet.

1.4 Wissenschaftstheoretische Grundpositionen

Die vorliegende Arbeit lässt sich thematisch im interdisziplinären Querschnittsbereich von Produktions- und Informationswissenschaften (im Grunde genommen der Informatik) einordnen. Während sich die letztere Disziplin vorwiegend durch formalwissenschaftliche Ansätze zur Schaffung informationstechnischer Systeme kennzeichnen lässt, so kann erstere als eine technisierte Form der Betriebswirtschaftslehre beschrieben werden, wofür sich speziell sozialwissenschaftliche und empirische Forschungsmethoden eignen. Somit steht grundsätzlich eine Vielzahl an möglichen Forschungsmethoden zur Verfügung. Um aus der Fülle an Möglichkeiten das konkrete Forschungsdesign der Dissertation abzuleiten, ist demnach zunächst eine Eingrenzung der wissenschaftstheoretischen Grundpositionen gemäß Ontologie und Epistemologie notwendig, die an dieser Stelle in Anlehnung an Becker et al. (2003) getroffen wird.

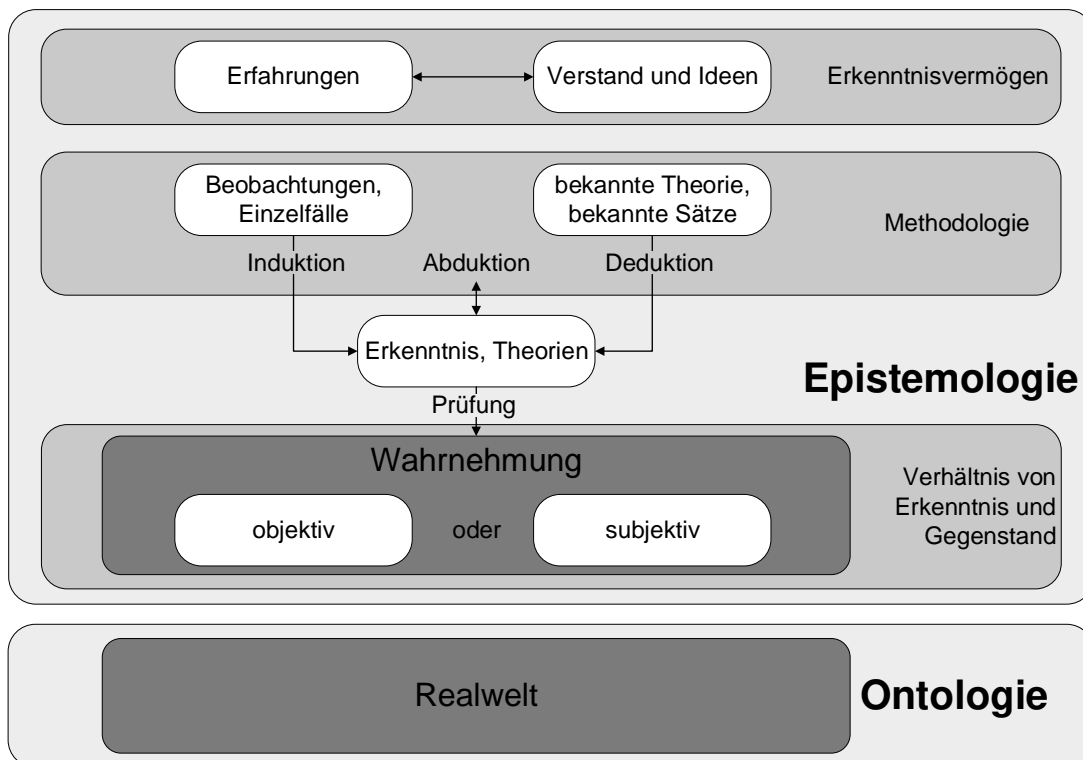


Abbildung 1.2: Ordnungsrahmen der Wissenschaftstheorie (in Anlehnung an Becker et al., 2003, S. 6)

Die Ontologie beschreibt metaphysische Annahmen, sowie die Logik des Seins und der Realität; die Frage „was ist?“ wird dabei gestellt. Dazu ist die Definition eines Kausalitätsverständnisses notwendig, die an dieser Stelle an jene von David Hume (2016) angelehnt wird:

- (1) Die Ursache U geht der Wirkung W chronologisch voraus.
- (2) Wenn die Ursache U auftritt, wird auch die Wirkung W auftreten.

(3) Die Ursache U und die Wirkung W treten innerhalb eines zeitlich begrenzten Intervalls auf.

Neben der Ontologie, die die Realwelt beschreibt, versucht die Epistemologie laut Becker et al. (2003, S. 6) „... zu klären, wie wahre Erkenntnisse über Erkenntnisobjekte und die dazu passenden Veränderungen von Vorstellungswelten erlangt werden können.“ Die Epistemologie ist somit die theoretische Basis, die beschreibt, wie man innerhalb der durch die Ontologie bestimmten Realität zu Verständnis und Wissen gelangt. Wie schon John Locke (2016) in seinem Werk darlegt, fußt die Erkenntnis dabei vorwiegend auf naturwissenschaftlicher Theorie und Empirie. Demgegenüber kann, wie René Descartes (1996) beschreibt und Becker et al. (2003) unterstreichen, Erkenntnis auch aus dem Verstand selbst hervorgehen. Neben der Erkenntnis ist auch deren Erlangen Teil der Epistemologie, worunter die Auswahl der methodologischen Position zu verstehen ist; diese kann induktiv, deduktiv, oder abduktiv sein. Während die Induktion einen Schluss aus der Empirie (Beobachtungen, Einzelfälle) in das Allgemeine, die Theorie, zieht, wird beim deduktiven Schluss eine spezifische Aussage aus anderen Aussagen abgeleitet, wobei der Schluss vom Allgemeinen zum Speziellen hin erfolgt (vgl. Becker et al., 2003, S. 6). Die Abduktion, die wesentlich von Peirce geprägt wurde, steht den beiden antonymen Schlussprinzipien der Induktion und Deduktion gegenüber und beschreibt das Schaffen einer erklärenden Hypothese – mit den Worten von Peirce (1974, CP 5.171) „... *Abduction merely suggests that something may be.*“ Ein weiterer Teil der Epistemologie ist die Wahrnehmung, die ihrerseits als objektiv, oder subjektiv klassifiziert werden kann.

1.4.1 Wissenschaftsverständnis der Arbeit

Das der Dissertation zu Grunde liegende Forschungsvorhaben beinhaltet die aus den beiden Komponenten Konzipierung und Evaluierung bestehende iterative Entwicklung von Algorithmen. Somit handelt es sich vielmehr um einen konstruktiven, entwerfenden Prozess, als um die Erklärung eines vorhandenen Phänomens und fokussiert sich demnach stärker auf das „wie“ als auf das „was“. Daher steht die Epistemologie stärker im Vordergrund als die Ontologie. Um dies innerhalb des Wissenschaftsverständnisses widerzuspiegeln, ist somit eine Distanzierung zum ontologischen Realismus notwendig.

Überblick wissenschaftstheoretischer Denkweisen: Im Realismus, der im weitesten Sinne auf Platon zurückgeht, wird die Existenz einer objektiven Realität propagiert, die gänzlich unabhängig von konzeptuellen Schemata ist. Die Autoren Hevner et al. (2004, S. 77), zum Beispiel, sehen Forschung im Kontext von Informationssystemen distanziert von diesem Konzept des Realismus und ordnen sie dem Wissenschaftsverständnis des Pragmatismus zu (vgl. auch van Aken, 2005; Hevner, 2007). Während pragmatisches Handeln in der Umgangssprache soviel bedeutet wie ein nach praktischen Gegebenheiten orientiertes Handeln, also in Wahrheit einen Praktizismus beschreibt, so steht Pragmatismus für eine philosophische Denkrichtung, die in ihren Ursprüngen auf Peirce (1974) zurückgeht. Um sich vom umgangssprachlichen Begriff zu distanzieren, verwendet Peirce vorwiegend den Begriff Pragmatizismus und beschreibt damit ein Konstrukt bzw.

ein Wissenschaftsverständnis, indem nur jenes Wissen akzeptiert wird, das empirisch über Experimente und Beobachtungen nachprüfbar ist (1974, vgl. CP 5.407). Im Pragmatizismus wird also jenes Wissen als wahr betrachtet, das sich auch aus praktischer Perspektive bewahrheitet. Einen Schritt weiter geht die wissenschaftstheoretische Position des Instrumentalismus, die die Wissenschaft und ihre Theorien schlichtweg als Werkzeuge ansieht. Beide wissenschaftstheoretischen Denkrichtungen distanzieren sich inhärent vom ontologischen Realismus. Wie Becker et al. (2003, S. 18) hervorheben, steht die „... konsensorientierte Informationsmodellierung [...] in der Tradition des (methodischen) Konstruktivismus.“ Der methodische Konstruktivismus, oder Erlanger Konstruktivismus, geht dabei auf Kamlah und Lorenzen zurück und stellt eine weitere, sich vom ontologischen Realismus distanzierende, wissenschaftstheoretische Denkrichtung dar (vgl. Kamlah und Lorenzen, 1996; Lorenzen, 2000). Die Essenz des Konstruktivismus liegt im Prinzip darin, dass sich jedes Individuum innerhalb einer eigenen, subjektiven Realität bewegt. Wissenschaftliche Erkenntnisse können in diesem Kontext nur dann vollständig beschrieben werden, wenn auch die subjektive Realität des Forschenden mittransportiert wird. Dies kann beispielsweise erzielt werden, indem der Erzeugungsprozess selbst beschrieben wird (vgl. Lorenzen, 2000). Der Konstruktivismus zeichnet sich im Speziellen dadurch aus, als das Ziel einer wissenschaftlichen Tätigkeit angesehen zu werden und die Entwicklung und den Transfer einer Lösung in die Gesellschaft zu ermöglichen, wie Lorenzen (2000, S. 9 f.) beschreibt. Im Konstruktivismus hat die Forschungstätigkeit also einen Bezug zur Lebenspraxis.

Festlegung des Wissenschaftsverständnisses der Dissertation: Ausgehend von diesem kurzen Überblick wird, in Anlehnung an den Strukturierungsansatz von Becker et al. (2003), die wissenschaftstheoretische Grundposition der vorliegenden Dissertation (vgl. Ordnungsrahmen in Abbildung 1.2) dargelegt, wobei die Grundkonzepte des methodischen Konstruktivismus übernommen werden. Das Erkenntnisvermögen wird dabei als erfahrungs-, aber auch ideen- und verstandsbaasiert klassifiziert, wobei ein stärkerer Fokus auf dem konstruktiven Ast liegt. Das Schlussprinzip kann als großteils abduktiv charakterisiert werden, da eine vollkommen objektive Induktion aufgrund von Randbedingungen innerhalb der anwendungsorientierten Entwicklung erschwert wird. Durch die Abduktion wird somit der Schluss von einem Einzelfall auf eine Regelmäßigkeit beschrieben. Darüber hinaus wird der deduktive Schluss dazu eingesetzt, um bekannte Theorien und Sätze in den Entwicklungsprozess miteinzubeziehen. Die Wahrnehmung ist als vornehmlich subjektiv und kontextabhängig zu klassifizieren, wodurch eine detaillierte Beschreibung des „wie“ zu einem zentralen Inhaltspunkt der Forschungsarbeit wird, wie es auch innerhalb des Paradigmas des Konstruktivismus beschrieben wird. Zudem lässt sich daraus eine Ablehnung gegenüber eines ontologischen Realismus ableiten.

1.4.2 Forschungsmethodologie: Überblick und Auswahl

Schlüsselkriterium für die Qualität einer wissenschaftlichen Arbeit ist laut Peirce (1974), dass ihre Validität durch empirische Argumente unterstrichen und auch von der wissenschaftlichen Gemeinschaft als valide bewertet wird. Im Kontext des Konstruktivismus bedeutet dies eine Kommunikati-

on des „wie“, also des Prozesses wie man zu Wissen gelangt. Aber nicht nur die wissenschaftliche Qualität bzw. Relevanz einer Forschungsleistung ist entscheidend, sondern speziell in der anwendungsorientierten Forschung ist, wie van Aken (2005, S. 19 f.) für die Fachdisziplin Management und Business hervorhebt, auch ein positiver Nutzen der Forschungsergebnisse außerhalb des wissenschaftlichen Kontextes erforderlich (Mehrwert für die Menschheit). Forschungsergebnisse müssen also auch in der realen Welt anwendbar sein. Eine Forschungsmethode, die sich dem Paradigma des methodischen Konstruktivismus zuordnen lässt und die in der anwendungsorientierten Forschung, speziell bei der Entwicklung von Vorgehensmodellen, Informationssystemen und Methoden eingesetzt wird, ist Design Science Research. Dabei werden in der Fachliteratur grundsätzlich die beiden Strömungen von (i) Alan R. Hevner und (ii) Joan E. van Aken unterschieden. Während van Aken das Thema seitens der Managementwissenschaften aus einer Metaperspektive beschreibt, betrachtet Hevner Design Science im Kontext der Informationswissenschaften. Aufgrund der Interdisziplinarität der vorliegenden Arbeit, die beide dieser Fachbereiche umfasst, werden im Folgenden beide Strömungen kurz skizziert.

Grundsätzlich können laut van Aken (2004; 2005), die erklärenden Wissenschaften (z.B. Physik, Soziologie) und die entwerfenden Wissenschaften (Medizin, Ingenieurwesen etc.) unterschieden werden. Für letztere verwendet van Aken die Bezeichnung „Design Science“. Mit dieser Bezeichnung distanziert sich van Aken von der Bezeichnung „angewandte Wissenschaften“, da diese aus seiner Sicht negativ behaftet ist und sich der „wahren“ Grundlagenforschung unterordnet. (van Aken, 2005, S. 22) Innerhalb von Design Science sind, im Gegensatz zu den erklärenden Wissenschaften, die Forschungsziele pragmatischer und zielen darauf ab, menschliche Leistungen zu verstehen und zu verbessern. Dabei ist Design Science lösungsorientiert mit dem Ziel Wissen darüber zu generieren, wie Lösungen für Anwendungsprobleme entworfen (designed) werden können. Forschungsergebnisse sind demnach vielmehr technische Regeln als ein kausales Modell. Diese technischen Regeln unterstützen Anwender dabei eine Lösung zu implementieren, ohne diese von Grund auf neu entwickeln zu müssen. (van Aken, 2005, S. 22 f.) Als Forschungsstrategie zur Entwicklung dieser technischen Regeln stellt van Aken den „Reflective Cycle“ vor, der aus den folgenden Phasen besteht (2005, S. 229):

- (1) Auswahl einer Fallstudie
- (2) Planen und Implementieren von Maßnahmen (Anwenden von Wissen aus der Domäne im Rahmen einer Fallstudie)
- (3) Reflexion und Weiterentwicklung des Wissens (Durchführen weiterer Studien)

In seinen Ausführungen vergleicht van Aken den dreistufigen Prozess mit der α -Test-Phase aus dem Bereich der Softwareentwicklung, wobei die Effektivität der entwickelten technischen Regeln im Originalkontext (der Fallstudie) überprüft wird. Zusätzlich zum dreistufigen Prozess schlägt van Aken vor, einen β -Test durchzuführen, indem die technischen Regeln in einem alternativen Kontext (zusätzliche Fallstudie, anderer Anwender etc.) angewendet werden. (van Aken, 2004, S. 232)

Hevner et al. (2004) betrachten Design Science im Kontext von Informationssystemen (IS). Dabei sehen die Autoren Forschung im Bereich IS als interdisziplinäres Zusammenspiel aus Business und IT-Strategien, sowie aus organisationaler und informationstechnischer Infrastruktur, fokussieren Design Science jedoch speziell auf den letzteren Punkt.

		Forschungsaktivitäten			
		Entwickeln	Evaluieren	Theoretisieren	Begründen
Forschungsergebnisse	Konstrukt				
	Modell				
	Methode				
	Instanziierung				

Abbildung 1.3: Forschungsrahmenwerk nach March und Smith (in Anlehnung an March und Smith, 1995, S. 255)

Dabei greifen Hevner et al. (2004) die von March und Smith (1995) propagierte Strukturierung von Design Science in zwei Design Prozesse und vier Design Artefakte auf. Grundsätzlich gehen March und Smith von den vier Prozessen Entwickeln, Evaluieren, Theoretisieren und Begründen aus, wobei sie die ersten beiden Forschungsaktivitäten der Design Science zusprechen und die letzteren beiden im Bereich der Naturwissenschaften sehen. Die Artefakte sind Konstrukte, Modelle, Methoden und Instanziierungen, die in Kombination mit den Prozessen in einer Matrixform angeordnet werden (vgl. Abbildung 1.3). Innerhalb dieses Rahmenwerkes entstehen sechzehn Zellen, die jeweils durchführbare Forschungsaktivitäten beschreiben. Forschung ermöglicht damit das Entwickeln, Evaluieren, Theoretisieren und Begründen von Konstrukten, Modellen, Methoden, oder Instanziierungen. Dabei haben unterschiedliche Zellen innerhalb des Rahmenwerkes unterschiedliche Ziele und Methoden, ein Forschungsvorhaben erfordert aber meist die Berücksichtigung mehrerer Zellen innerhalb des Rahmenwerkes. (March und Smith, 1995, S. 260)

Hevner et al. (2004) fassen Konstrukte als Sprache auf, in der Probleme und Lösungen definiert und kommuniziert werden. Modelle wiederum nutzen Konstrukte, um reale Situationen (z.B. ein Design Problem und dessen Lösungsraum) zu repräsentieren. Modelle beschreiben dabei die Zusammenhänge zwischen Problem- und Lösungskomponenten und ermöglichen die Exploration der Effekte von Designentscheidungen und Änderungen in der Realität. Methoden werden verkörpert durch formale oder mathematische Algorithmen, informelle Beschreibungen von „Best Practices“, oder Kombinationen daraus. Instanziierungen zeigen, dass Konstrukte, Modelle, oder Methoden in einer bestimmten Umgebung implementiert werden können. Dabei demonstrieren Instanziierungen die Durchführbarkeit und können zur Beurteilung der Eignung eines Artefaktes innerhalb eines konkreten Anwendungsfalles genutzt werden. Ausgehend von dieser Interpretation der Ar-

tefakte, konzipieren Hevner et al. ein Rahmenwerk zum Verstehen, Umsetzen und Evaluieren von Forschungsvorhaben im Kontext von IS durch eine Kombination von „... *behavioral-science and design-science paradigms*.“ (Hevner et al., 2004, S. 78 f.)

Für die vorliegende Arbeit wird auf das renommierte Rahmenwerk von Hevner et al. (2004) zurückgegriffen (vgl. Abbildung 1.4), da es (i) von der wissenschaftlichen Gemeinschaft als renommierte Forschungsmethodologie akzeptiert wird und (ii) laut Hevner et al. speziell auf die Anwendung aus Sicht der Wissenschaftler und Anwender im Bereich der Informationssysteme fokussiert, oder im Originaltext „*The primary goal [...] is to inform the community of IS researchers and practitioners of how to conduct, evaluate, and present design science research.*“ (Hevner et al., 2004, S. 77)

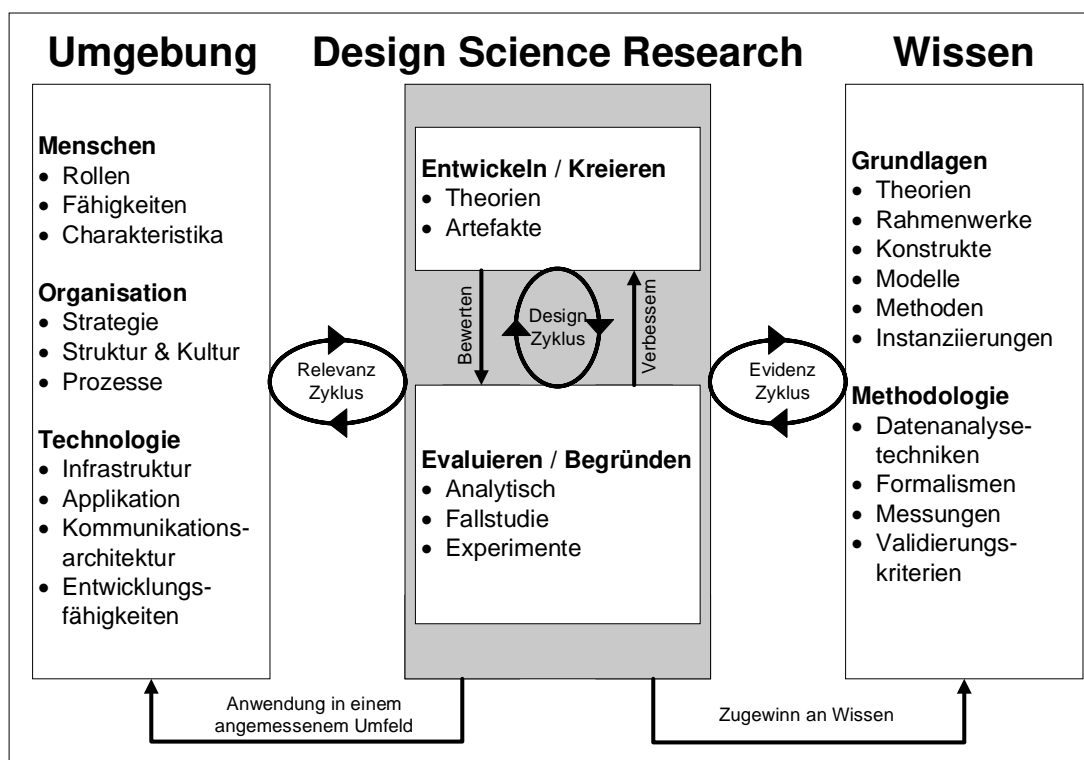


Abbildung 1.4: Forschungsrahmenwerk in Anlehnung an Hevner et al. (2004) und Hevner (2007)

Innerhalb des Rahmenwerks repräsentiert die Umgebung den Problemraum, in dem das untersuchte Phänomen abläuft. Es besteht aus Menschen, Organisationen und deren bereits existierenden, oder geplanten Technologien, die gemeinsam Anforderungen („*Business Needs*“) definieren, die es zu lösen gilt. Ausgehend von diesen artikulierten Anforderungen wird Forschung in zwei komplementären Phasen durchgeführt. Behavioristische Forschung wird dabei durch Entwicklung und Begründung von Theorien, die ein Phänomen beschreiben oder prognostizieren, umgesetzt. Design Science hingegen adressiert die Forschung durch das Kreieren und Evaluieren von Artefakten, die dazu ausgelegt sind, die definierten „*Business Needs*“ zu befriedigen. Dabei ist das Ziel der behavioristischen Forschung die „Wahrheit“ und das Ziel der Design Science der „Nutzen“.

Hevner et al. (2004, S. 80) heben hervor, dass Wahrheit und Nutzen dennoch nicht getrennt voneinander betrachtet werden können und verweisen darauf, dass eine Theorie auch soweit ausgebaut sein kann, dass ihre Wahrheit in ein Design umgesetzt werden kann. Das Rahmenwerk beschreibt zudem einen Iterationszyklus aus Bewerten und Verbessern. Letztlich wird innerhalb des Rahmenwerkes auch Wissen angeführt, das die Rohmaterialien liefert, durch die Forschung durchgeführt werden kann. Dieses Wissen kann ihrerseits aus Grundlagen, wie Theorien oder Modellen, und Methodologien, wie Formalismen oder Validierungskriterien, bestehen. Während in der behavioristischen Forschung vorwiegend Methodologien zur Datensammlung und empiristischen Analyse angewendet werden, so finden sich in der Design Science speziell algorithmische und mathematische Methoden zur Evaluierung der Qualität und Effektivität der Artefakte, aber auch empirische Techniken können in Design Science angewendet werden. Forschung innerhalb des Rahmenwerkes resultiert einerseits in einem Zugewinn an Wissen und andererseits in der Anwendung der Forschungsmethoden innerhalb eines angemessenen Umfeldes.⁷ (Hevner et al., 2004, S. 79 ff.) In einer späteren Arbeit ergänzt Hevner das Rahmenwerk, indem eine dreizyklische Betrachtung von Design Science propagiert wird: (i) der Relevanz Zyklus, (ii) der Evidenz Zyklus und (iii) der Design Zyklus. (Hevner, 2007)

(i) Relevanz Zyklus: Dieser Zyklus beschreibt die Identifikation und Repräsentation von Gelegenheiten und Problemen innerhalb einer Anwendungsumgebung. Somit initiiert der Relevanz Zyklus den Design Science Prozess indem neben den Anforderungen für die Forschung auch die Akzeptanzkriterien bzw. die Anforderungen hinsichtlich der Evaluation abgeleitet werden. (vgl. Hevner, 2007, S. 89)

(ii) Evidenz Zyklus: Design Science wird gespeist von wissenschaftlichen Theorien und ingenieurwissenschaftlichen Methoden, die die Basis für den Evidenz Zyklus legen. Zudem beinhaltet das Wissen zwei weitere Typen: (a) die Erfahrungen und Expertisen, die den Stand der Forschung repräsentieren und (b) bereits existierende Artefakte und Prozesse innerhalb der Anwendungsdomäne. Somit stellt der Evidenz Zyklus einem Forschungsvorhaben bereits vorhandenes Wissen zur Verfügung, um Innovation zu gewährleisten. Durch das Forschungsvorhaben neu generiertes, oder erweitertes Wissen führt wiederum zu einer Erweiterung der Wissensbasis innerhalb des Rahmenwerkes. (vgl. Hevner, 2007, S. 89 f.)

(iii) Design Zyklus: Der Design Zyklus stellt den Kern des Design Science dar und besteht aus einer, im Vergleich zu den anderen Zyklen, höherfrequenten Iteration zwischen Konstruktion und Evaluation von Artefakten. (vgl. Simon, 1996) Dabei werden Designalternativen geschaffen, die miteinander verglichen, evaluiert und verbessert werden, bis ein zufriedenstellender Zustand im Kontext der Anforderungen erreicht ist. Die Anforderungen werden ihrerseits durch den Relevanz

⁷Neben der Präsentation ihres Regelwerkes, führen Hevner et al. (2004, S. 81 ff.) einige Richtlinien zur Anwendung des Rahmenwerkes für konkrete Forschungsvorhaben im IS Kontext an.

Zyklus und die Design und Evaluationsmethoden aus dem Evidenz Zyklus festgelegt. (vgl. Hevner, 2007, S. 90 f.) Der Design Zyklus weist dabei inhärente Parallelen zum „Reflective Cycle“ von van Aken (2004) auf.

Zusammenfassung: Die drei Zyklen des Forschungsrahmenwerkes (vgl. Abbildung 1.4) beschreiben den Forschungsprozess selbst. Vor dem Beginn des Forschungsvorhabens ist es zunächst notwendig dessen wissenschaftliche und praktische Relevanz zu begründen. Speziell in der Design Science steht dabei auch die praktische Relevanz im Vordergrund, da die Forschungsergebnisse in der realen Welt anwendbar sein und einen Mehrwert liefern müssen. Nach der Begründung der Relevanz gilt es zu beweisen, dass noch keine hinreichenden Lösungen des beschriebenen Problems existieren. Somit wird innerhalb des Evidenz Zyklus die Forschungslücke aufgedeckt und jene Forschungsergebnisse identifiziert, die aufgegriffen und zum Schließen der Forschungslücke herangezogen werden können. Daraus werden Anforderungen an die Lösung abgeleitet, die zum Adressieren der Forschungslücke notwendig sind. Im Rahmen des Design Zyklus wird dann in iterativer Weise eine Lösung entwickelt, die zum Schließen der Forschungslücke beiträgt und mit den definierten Anforderungen abgeglichen wird.

1.4.3 Forschungsdesign

Basierend auf der drei-zyklischen Betrachtung nach Hevner (Hevner et al., 2004; Hevner, 2007) wird das Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit abgeleitet – es ist in Abbildung 1.5 als Prozessdarstellung visualisiert. Dabei werden die zeitlich-kausalen Zusammenhänge von Tätigkeiten und (Zwischen-) Ergebnissen dargestellt, wobei die Zugehörigkeit zu den Zyklen durch eine Kategorisierung der Pfeile visualisiert wird. In der Darstellung werden Haupttätigkeiten (korrespondieren mit einem Kapitel der vorliegenden Dissertation) und Subprozesse (für diese Tätigkeiten existieren keine expliziten Kapitel) unterschieden.

Den Ausgangspunkt bildet die Forschungsidee, die in Abschnitt 1.2 präsentiert wird und die einen wesentlichen Einfluss auf die Auswahl der Forschungsmethodologie hat (vgl. aktueller Abschnitt 1.4, vgl. auch Abbildung 1.6). Zur Begründung der Relevanz des Forschungsvorhabens wird eine Literaturanalyse durchgeführt, die den Stand der Forschung darlegt (vgl. Abschnitt 3.2.3). Durch eine Analyse des aktuellen Forschungsstandes und einem Vergleich mit der Forschungsidee, kann die antizipierte Forschungslücke im Relevanz Zyklus entweder (i) bestätigt, oder (ii) nicht bestätigt werden. Der Relevanz Zyklus stellt somit, die wissenschaftliche Relevanz des Forschungsvorhabens sicher. Zur eindeutigen Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zum vorhandenen Stand der Forschung im analysierten Kontext, wird die Problemstellung abgegrenzt (vgl. Abschnitt 4) und es werden Anforderungen an die zu entwickelnde Lösung formuliert.⁸

Dem Wissenschaftsverständnis des Konstruktivismus folgend, müssen entwickelte Lösungen laut Lorenzen (2000, S. 9 f.) in die Gesellschaft transferierbar sein. Daher wird im folgenden Schritt

⁸Der Relevanz Zyklus der vorliegenden Dissertation erfolgt zwischen der Forschungsidee in Abschnitt 1.2, dem Stand der Forschung in Abschnitt 3.2.3 und der Spezifizierung der Problemstellung in Abschnitt 4. In der vorliegenden Arbeit wird der finale Stand des Relevanz-Zyklus präsentiert.

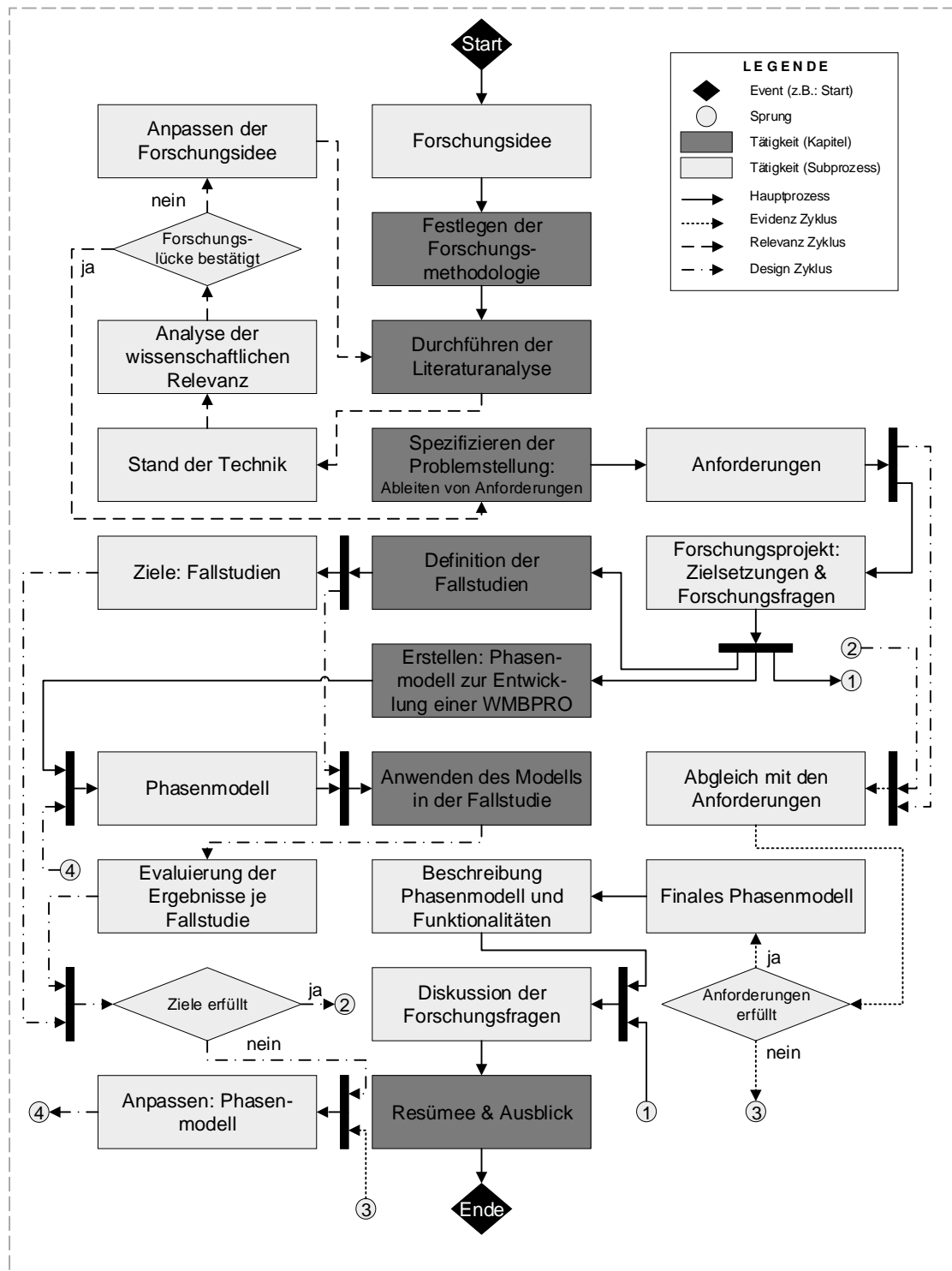


Abbildung 1.5: Forschungsdesign: Prozessdarstellung, Primärprozess

ein Forschungsprojekt entworfen, in dessen Rahmen der Design Zyklus durchgeführt wird. Dazu werden Fallstudien aufgesetzt (vgl. 6 und deren Ziele definiert (der Bezug zur Realität hergestellt). Innerhalb der Realität der definierten Fallstudien wird das Phasenmodell entwickelt:

- (1) Erstellen des Phasenmodells
- (2) Anwendung im Rahmen der Fallstudien
- (3) Evaluierung der Ergebnisse und Abgleich der Ziele
- (4) Anpassen des Phasenmodells, weiter mit Schritt (2)

Der Design Zyklus wird solange durchlaufen, bis ein Artefakt entstanden ist, das die definierten Ziele der Fallstudien erfüllt und somit eine Lösung entstanden ist, die das definierte Problem in der durch die Fallstudien definierten Realität löst. Das Phasenmodell ist in Abschnitt 5 dargestellt und dessen Anwendung wird in Abschnitt 6 vorgestellt.⁹

Sind die definierten Ziele im Design Zyklus erfüllt, wird selbiger abgeschlossen und die finale Version der Lösung kann hinsichtlich der Anforderungen analysiert werden. Bestehen Abweichungen zu den Anforderungen (die Anforderungen beschreiben und instrumentalisieren die identifizierte Forschungslücke), ist ein Anpassen der Lösung notwendig. Der dadurch entstehende Zyklus ist der Evidenz Zyklus, dargestellt in Hevner (2007). Durch diesen Zyklus wird sichergestellt, dass die entwickelte Lösung im Sinne des Standes der Forschung innovativ ist. Bestehen Abweichungen zu den definierten Anforderungen, ist es notwendig die Lösung (das Phasenmodell) entsprechend anzupassen und einen erneuten Design Zyklus anzustoßen. Werden die definierten Anforderungen erfüllt, kann die finale Lösung bestätigt und dokumentiert werden. Bestehend auf der Lösung können nun die definierten Forschungsfragen diskutiert werden (vgl. Abschnitt 7.1), was gemeinsam mit dem Ausblick das Ende des Forschungsvorhabens darstellt.

Der Subprozess „Forschungsmethodologie“ ist in Abbildung 1.6 dargestellt und beschreibt in Form einer unidirektionalen Prozessdarstellung die Auswahl und Formulierung der wissenschaftstheoretischen Grundpositionen und des aktuellen Abschnittes der Dissertation. Ausgehend von der allgemeinen Zielsetzung des Forschungsvorhabens, der forschungsleitenden Hypothese, wird eine Literaturanalyse bezüglich möglicher Forschungsmethoden durchgeführt. Dabei wird die Notwendigkeit der Definition der der Methodologie übergeordneten Paradigmen der Ontologie und Epistemologie erkannt und mittels einer Literaturrecherche ein geeignetes Forschungsrahmenwerk ausgewählt.

Für den Hauptprozess der Literaturanalyse in Abbildung 1.5 wurden weitere Subprozesse definiert, die in Abbildung 1.7 dargestellt sind. Die Literaturanalyse untergliedert sich in zwei Recherchetätigkeiten, wobei die erste eine selektive Darstellung der Grundlagen ist. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit, werden die grundlegenden Themen dargestellt und abgegrenzt.¹⁰ Der zweite Rechercheteil basiert auf einer Methodologie zur systematischen, repräsentativen Literaturanalyse.¹¹ Die Rechercheergebnisse werden qualitativ und quantitativ analysiert und dienen der Formulierung des Standes der Forschung und dem Spezifizieren der Problemstellung.

⁹Im Rahmen des Design Zyklus wird die Lösung in einem iterativen Prozess zwischen ihrer Beschreibung und ihrer Anwendung im Rahmen der Fallstudien entwickelt. Die in Abschnitt 5präsentierte Version der entwickelten Lösung entspricht der finalen Version (Ziele der Fallstudien werden erfüllt). Die Anwendung der finalen Version der Lösung wird in Abschnitt 6 präsentiert.

¹⁰Die Ergebnisse der selektiven Literaturrecherche werden in Abschnitt 2 präsentiert.

¹¹Die systematische Literaturanalyse ist in Abschnitt 3 dargestellt.

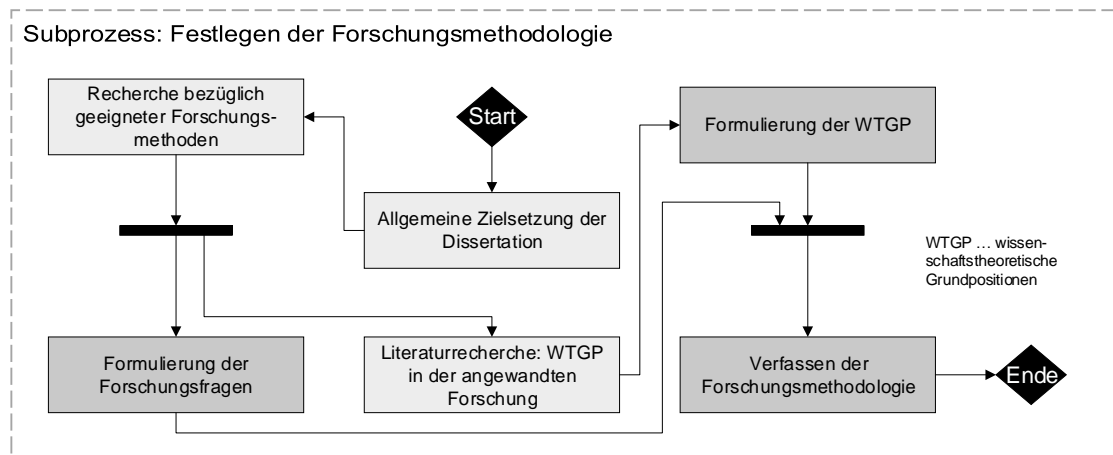


Abbildung 1.6: Forschungsdesign: Prozessdarstellung, Forschungsmethodologie

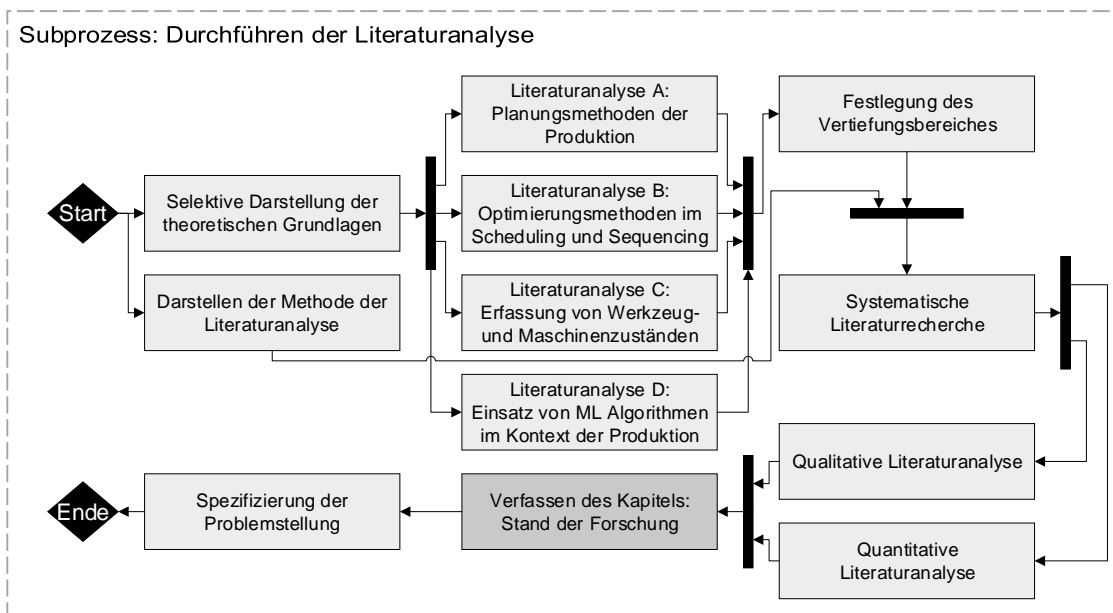


Abbildung 1.7: Forschungsdesign: Prozessdarstellung, Literaturanalyse

1.4.4 Forschungsfragen

Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, ist das Ziel des Forschungsvorhabens, die Effektivität und Effizienz der Produktionsreihenfolgeplanung durch eine werkzeug- und maschinenzustandsabhängige Produktionsreihenfolgeoptimierung zu erhöhen. Dazu wird ein Unterstützungswerkzeug für die Produktionsplanung entwickelt, das diese Informationen integriert. Dem Paradigma des Konstruktivismus folgend, wird das Unterstützungswerkzeug anhand eines generischen Entwicklungsprozesses in der Form eines Phasenmodells präsentiert. Für das Forschungsvorhaben ergeben sich daraus, unter Berücksichtigung des abgeleiteten Forschungsdesigns (vgl. Abschnitte 1.4.2 und

1.4.3), die folgenden Forschungsfragen:¹²

- **Forschungsfrage 1:** Welche Ansätze zur Integration von Werkzeug- und Maschinenzuständen und der Produktionsfeinplanung gibt es in der Literatur?
 - Subforschungsfrage 1.1: Wie lässt sich der aktuelle Stand der Forschung beschreiben?
 - Subforschungsfrage 1.2: Welche Forschungslücken bestehen im Hinblick auf die Instanziierung der Ansätze in der Praxis?
 - Subforschungsfrage 1.3: Wie wird der Zustand von Werkzeugen und Maschinen im Kontext der Produktionsfeinplanung in der vorhandenen Literatur modelliert?
- **Forschungsfrage 2:** Wie können Werkzeug- und Maschinenzustandsinformationen in die Produktionsfeinplanung integriert werden?
 - Subforschungsfrage 2.1: Welche Funktionalitäten sind für diese Integration erforderlich?
 - Subforschungsfrage 2.2: Wie können diese Funktionalitäten abgebildet werden?
- **Forschungsfrage 3:** Welcher Nutzen resultiert aus einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung?

Forschungsfrage 1 bezieht sich auf die Begründung der Relevanz des Forschungsvorhabens, wie sie im Paradigma Design Science nach Hevner (2007) den ersten Zyklus innerhalb des Rahmens darstellt. Dabei soll nicht nur die Relevanz des Themas nachgewiesen werden, sondern auch begründet werden, welche Eigenschaften aktuell fehlen, d.h. welche Anforderungen an das zu entwickelnde Artefakt gestellt werden. Zur Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt in Abschnitt 3 eine systematische Literaturanalyse mit dem Ziel den aktuellen Stand der Forschung abzubilden, sowie die antizipierte Forschungslücke zu begründen. Forschungsfrage 1 wird im Zuge der Spezifizierung von Problem- und Zielsetzung (vgl. Abschnitt 4) beantwortet.

Abschnitt 5 der vorliegenden Arbeit ist auf die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage ausgerichtet. Dabei steht, wie es im Rahmen des Design Science üblich ist, die Frage nach dem „wie“ im Vordergrund. Somit wird die Frage durch die Darlegung eines Artefaktes beantwortet – es wird ein Phasenmodell vorgestellt, das beschreibt, wie ein Algorithmus zur werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMBPRO) entwickelt wird. Während die erste Subforschungsfrage (2.1) direkt auf das Phasenmodell gerichtet ist, wird in der zweiten Subforschungsfrage (2.2) die Implementierung der Funktionalitäten thematisiert.

Forschungsfrage 3 fokussiert den Nutzen des im Rahmen der Dissertation entwickelten Artefaktes. Wie van Aken (2005, S. 19 f.) hervorhebt, ist es im Kontext Design Science notwendig, dass Forschungsergebnisse auch einen positiven Nutzen außerhalb des wissenschaftlichen Kontextes bringen. Diese dritte Forschungsfrage wird im Rahmen der Anwendung in Abschnitt 6 thematisiert.

¹²Es sei erwähnt, dass die Forschungsfragen an dieser Stelle der Arbeit präsentiert werden, um einen besseren Lesefluss zu gewährleisten. Zeitlich-kausal ist die finale Form der Forschungsfragen 2 und 3 ex post zu den Literaturanalysen entstanden. Sie adressieren dabei die in Abschnitt 3 identifizierte Forschungslücke.

2 Theoretische Grundlagen und Eingrenzung des Untersuchungsbereiches

Die vorliegende Dissertation lässt sich im interdisziplinären Querschnittsbereich von Produktions- und Informationswissenschaften (im Grunde genommen der Informatik) einordnen, wobei die Produktionswissenschaften als eine Kombination von Management- und Ingenieurwissenschaften aufgefasst werden können. Während im Themenfeld der Informatik speziell Teilgebiete wie die Optimierung (u.a. Metaheuristiken) und Algorithmen des maschinellen Lernens von Interesse für das Forschungsvorhaben sind, so stehen in den Ingenieurwissenschaften Sensorik sowie Condition Monitoring und im Bereich der Managementwissenschaften die Produktionsplanung im Fokus. Von besonderem Interesse sind dabei die folgenden Themenbereiche, die in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt werden:¹³

- Planungsmethoden der Produktion: Abschnitt 2.1
- Optimierungsmethoden im Scheduling und Sequencing: Abschnitt 2.2
- Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen: Abschnitt 2.3
- Algorithmen des maschinellen Lernens im Kontext der Produktion: 2.4

Nach der inhaltlichen Zusammenfassung der relevanten Themengebiete, erfolgt in Abschnitt 2.5 die Eingrenzung des Untersuchungsbereiches der vorliegenden Dissertation.

2.1 Planungsmethoden der Produktion

2.1.1 Historischer Überblick der Produktionsplanung

Schon die frühen Hochkulturen vor mehr als 4000 Jahren nutzten Planungskonzepte zur Strukturierung von Arbeitsinhalten, wie beispielsweise beim Bau der Pyramiden von Gizeh. Wenngleich es sich bei diesem Weltwunder um ein Bauprojekt handelte, und somit nicht der geläufigen Definition von „Produktion“ entspricht, gibt es doch einige inhärente Parallelen. Wird der Begriff „Produktion“ als die Fertigung von Gegenständen aufgefasst, so fällt das berühmte Zitat aus der Spätantike von Augustinus von Hippo (354-430 n. Chr.) auf, der eine frühe Form der Arbeitsteilung beschreibt:

„Ein kleines Gefäß geht, um fertig zu werden, durch die Hände vieler Arbeiter, obwohl es von einem, der seine Kunst vollkommen versteht, hergestellt werden könnte. Aber man glaubt, der Menge der Arbeiter sei am besten gedient, wenn jeder einzelne einen besonderen

¹³Der Literaturüberblick erfolgt dabei in narrativer Form, basierend auf selektiven Literaturrecherchen. Dieser hat dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, jedoch soll die ausgewählte Literatur einen kompakten und dennoch repräsentativen Einblick in die Themengebiete der vorliegenden Dissertation bieten.

Teil der Fabrikation schnell und leicht erlernt, damit nicht alle genötigt würden, sich in langer Zeit und viel Mühe im ganzen Gebiet des betreffenden Handwerks auszubilden.“

Die verschiedenen Arbeiter, von denen im Zitat die Rede ist, sind dabei unterschiedlichen Berufsständen zuzuordnen (Töpfer, Goldschlager, Weber, Färber, Tuchbereiter etc.), die die frühen Handwerksbetriebe prägten. Zur Herstellung von Gütern entstanden Zwischenerzeugnisse, die zwischen den einzelnen Handwerksbetrieben gehandelt wurden. Mit der frühen Neuzeit wurden unterschiedliche Berufsstände unter den Dächern von Manufakturen zusammengefasst, die hochspezialisierte Produkte herstellten (Porzellan, Uhren, Papier etc.). Die vorwiegend durch manuelle Arbeit charakterisierten Manufakturen wurden im Rahmen der Industrialisierung (erste industrielle Revolution, Mitte des 18. Jahrhunderts) mechanisiert und durch Fabriken abgelöst. Arbeits- und Kraftmaschinen substituierten manuelle Arbeit und die Produktion höherer Mengen wurde möglich, womit auch die Anforderungen an die Planung stiegen – die teuren Kraftmaschinen mussten effizient eingesetzt werden und deren begrenzten Kapazitäten mussten rigoros geplant werden. Die zweite industrielle Revolution, Ende des 19. Jahrhunderts, wurde technologisch von der Elektrotechnik getrieben, die zu deutlichen Produktivitätssteigerungen führte. Dadurch stieg auch die Komplexität und neue Formen der Produktionsplanung wurden notwendig. Der aufkommende „Taylorismus“ (nach Frederick Winslow Taylor) initiierte die Trennung von geistiger und physischer Arbeit, wobei letztere in kleinste Arbeitspakete unterteilt wurde – die Geburtsstunde des Scientific Managements. Aufgrund der Monotonie der Tätigkeiten und der hohen körperlichen Anforderung an die Arbeiter der damaligen Zeit, wird der Taylorismus heute oft als Ausbeutung der Arbeiterschaft stereotypisiert. Die als dritte industrielle Revolution bezeichnete Automatisierung der Industrie führte zum Wegfall von Routinetätigkeiten – die Arbeitsinhalte, die für die Menschen blieben, wurden komplexer. Mit der zunehmenden Komplexität wurde eine Weiterentwicklung der Produktionsplanungskonzepte notwendig. Es entstanden Konzepte wie das Toyota Produktionssystem (Kanban und Pull-Prinzip), „Just-In-Time“ sowie „Just-In-Sequence“ und später das ganzheitliche Achner PPS-Modell (vgl. Schuh und Stich, 2012a).¹⁴

2.1.2 Definition Produktionsplanung und -steuerung

In der vorliegenden Arbeit wird das Verständnis der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), wie im Achner PPS-Modell (Schuh und Stich, 2012a sowie Schuh und Stich, 2012b) festgeschrieben, übernommen. Aus Prozesssicht werden dabei vier idealtypische Auftragsabwicklungsstrukturen unterschieden (Schuh und Stich, 2012a, S. 110):

- **Auftragsfertiger:** Aufträge werden kundenindividuell gefertigt. Aufgrund der ausgeprägten Unterschiede zwischen verschiedenen Produkten und stochastischem Einfluss, ist oft eine Unterteilung in langfristige und kurzfristige Planung notwendig. (Schuh und Stich, 2012a, S. 137 f., S. 150 ff.)

¹⁴Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf das Werk (Schuh und Stich, 2012a, S. 3-5) verwiesen. In der Einleitung behandeln die Autoren die historische Entwicklung der PPS des letzten Jahrhunderts in detaillierter Form.

- **Rahmenauftragsfertiger:** Bedarfe werden in der Form von Rahmenverträgen mit den Kunden festgelegt, aus denen die Kunden konkrete Aufträge abrufen. In der Regel ist eine deterministische Feinplanung möglich, da sich die Fertigungsabläufe kurzfristig nicht mehr grundlegend ändern. (Schuh und Stich, 2012a, S. 154 f., S. 164 ff.)
- **Variantenfertiger:** Aufträge bestehen aus einem kundenanonymen Vorprodukt, das nach dem Kundenentkopplungspunkt kundenspezifisch wird. Für die Fertigung nach dem Kundenentkopplungspunkt ist eine kurzfristige Planung erforderlich. (Schuh und Stich, 2012a, S. 168 ff., S. 178 f.)
- **Lagerfertiger:** Aufträge werden kundenanonym auf Lager gefertigt. Aufgrund der vollständigen Kundenentkopplung ist eine deterministische Feinplanung möglich, da der Durchlauf im Allgemeinen schon zum Planungszeitpunkt bekannt ist. (Schuh und Stich, 2012a, S. 181 ff., S. 188 ff.)

Das Aachner PPS Modell unterteilt sich in Produktionsplanung und Produktionssteuerung:

- Die Inhalte der **Produktionsplanung** sind die „[...] *Arbeitsvorbereitung, Fertigungsauftragsterminierung, Losgrößenrechnung und Kapazitätsplanung* [...]“ (Schuh und Stich, 2012a, S. 208).
- Die **Produktionssteuerung** hingegen erfolgt im kurzfristigen Zeithorizont, „[...] *für unterschiedlich abgegrenzte Fertigungsbereiche, für Inseln, Gruppen oder Einzelarbeitsplätze* [...]“ (ibid. S. 219). Dabei wird das abgegrenzte Planungsproblem in detaillierter Form betrachtet.

Aus Planungsperspektive kann die Produktionsplanung somit als mittel- bis langfristige Produktionsgrobplanung¹⁵ aufgefasst werden. Die Produktionssteuerung hingegen beinhaltet neben der unmittelbaren Steuerung auch die kurzfristige Planung (Belegungsplanung und Fertigungsauftragsfreigabe), wie Schuh und Stich (2012a, S. 220 ff.) hervorheben und kann als Produktionsfeinplanung interpretiert werden. Betrachtet man die Auftragsabwicklungsstrukturen, so wird ersichtlich, dass in einer kundenanonymen Fertigung (z.B. bei einem Lagerfertiger) die Bereiche Produktionsgrobplanung und -feinplanung verschmelzen (ibid. S. 188 f.). Demgegenüber ist eine geteilte Betrachtung in der kundenindividuellen Fertigung aufgrund stochastischer, zum Planungszeitpunkt unbekannter Einflussgrößen notwendig (ibid. 178 f.).

2.1.3 Planungsprobleme in der Produktionsplanung und Steuerung

Die Probleme der PPS reichen von der strategischen Ebene (Absatz- und Produktionsprogrammplanung, Schuh und Stich, 2012a, S. 200 ff.) über die mittelfristige Produktionsgrobplanung (Fertigungsauftragsterminierung, Losgrößenrechnung und Kapazitätsplanung, ibid. S. 212 ff.) bis hin

¹⁵Der Begriff „Produktionsgrobplanung“ hebt dabei hervor, dass das Planungsproblem in aggregierter Form betrachtet wird und Details, wie zum Beispiel die Produktionsreihenfolgeplanung, vernachlässigt werden.

zur kurzfristigen, operativen Ebene der Produktionsfeinplanung (Belegungs- und Reihenfolgeplanung, *ibid.* S. 220 ff.). Die Ebenen der PPS verhalten sich dabei ähnlich zu der Automatisierungspyramide (vgl. *ibid.* S. 195, S. 198), je kleiner der Betrachtungszeitraum wird (Boden der Pyramide), desto feingranularer wird die Auflösung der Daten. Vice versa liegen die Daten in den oberen Ebenen in aggregierter Form vor und der Betrachtungszeitraum ist größer. Dadurch bleibt die Komplexität in den Ebenen bewältigbar, bringt jedoch den Nachteil, dass in den jeweiligen Ebenen Synergien zum Teil nicht vollends ausgeschöpft werden können. Erfolgsfaktor bleibt in der variantenreichen Fertigung die Abgrenzung der Zielsetzungen zwischen Grob- und Feinplanung (vgl. *ibid.* S. 178 f.).¹⁶

In der Literatur ist zunehmend der Einsatz computergestützter Planungsalgorithmen zu beobachten. Befähigt wird das durch leistungsstarke Rechner, die auch komplexere Probleme bewältigen können, wobei methodisch zunehmend auf Simulationen zurückgegriffen wird (vgl. Jeon und Kim, 2016 sowie Sinha und Chandel, 2015, S. 757). Auch der Einsatz von Algorithmen aus den Bereichen der künstlichen Intelligenz ist vermehrt zu beobachten, wie beispielsweise die Arbeiten von Lin und Gen (2017), Lingitz et al. (2018) sowie Schuh et al. (2018a) unter Beweis stellen. Dennoch finden auch Prioritätsregeln noch praktische Anwendung in der Produktionssteuerung, wie beispielsweise die Arbeiten von Chaudhry und Khan (2016) sowie Zhang et al. (2017) bestätigen.

Prioritätsregeln: Eine einfache Form der Produktionsplanung (im Speziellen der Feinplanung), die keine hohen Anforderungen an die Berechnungskapazitäten haben und als einfache Heuristiken interpretiert werden können, bilden Prioritätsregeln (engl. „dispatching rules“). Panwalkar und Iskander betrachten in ihrer renommierten Arbeit mehr als 110 verschiedene Prioritätsregeln, die zum Teil auch heute noch Anwendung finden (Panwalkar und Iskander, 1977). Einige populäre Beispiele sind:

- **Ankunftszeitorientierung:** Eine bekannte Prioritätsregel ist dabei First-In-First-Out (FIFO). Dabei werden die Aufträge in derselben Reihenfolge abgearbeitet, in der sie an einer Anlage ankommen. Eine weitere Regel, die auf der Ankunftsreihenfolge basiert, ist Last-In-First-Out (LIFO). Im Gegensatz zu FIFO werden die Aufträge in invertierter Ankunftsreihenfolge abgearbeitet. LIFO wird oft dann eingesetzt, wenn der Lagerplatz der Anlage sehr klein ist und sich Aufträge physisch gegenseitig blockieren.
- **Terminorientierung:** Bei der Prioritätsregel FLT (Frühester-Liefertermin) werden jene Aufträge an einer Anlage nach vorne gereiht, die den frühesten Liefertermin aufweisen. Eine Verbesserung dazu stellt SLACK dar, das die Aufträge anhand der Schlupfzeit priorisiert – Aufträge mit niedrigerem Schlupf werden zuerst eingeplant.¹⁷

¹⁶In der kundenspezifischen Fertigung (vgl. Auftragsfertiger und Variantenfertiger) ist es das Ziel der Grobplanung, die Termine möglichst nahe am Wunschliefertermin zu halten. Die Feinplanung fokussiert demgegenüber häufig die Erhöhung der Auslastung. Um in keinen Zielkonflikt zu kommen, müssen in oberer Ebene Randbedingungen festgelegt werden, anhand derer sich die lokale Feinplanung orientieren kann. Zum Beispiel wird in der Grobplanung die Fertigungswoche festgelegt – die Fixierung des exakten Fertigzeitpunktes erfolgt lokal in der Feinplanung.

¹⁷Die Schlupfzeit ist ein Maß für die noch verbleibende Bearbeitungszeit aller Folgeprozesse eines Auftrages.

- **Bearbeitungszeitorientierung:** Dabei werden speziell KOZ (Kürzeste-Operationszeit) und LOZ (Längste-Operationszeit) unterschieden, wobei Aufträge mit der geringsten bzw. längsten Maschinenbelegungszeit priorisiert werden.

2.1.4 Scheduling und Sequencing

Unter der englischen Bezeichnung „Scheduling“ (die auch in der deutschen Literatur zu Operations Research zu finden ist), wird die Termin- und Ablaufplanung verstanden. Sie liefert Antworten auf die Frage: „Wann wird ein Auftrag A an Maschine M bearbeitet?“. Pinedo (2016, S. 15) verwendet das Triplet α, β, γ , um die unterschiedlichen Problemtypen zu klassifizieren. Während α die Maschinen-Umgebung beschreibt (einzelne Maschine, parallele Maschinen), dient β der Beschreibung des Flusssprinzips und der Nebenbedingungen. Die Kategorie γ beschreibt die Art der Zielfunktion (strafbasiert, durchlaufzeitbasiert, multikriteriell). Die am weitesten verbreiteten Flusstypen in Kategorie β sind dabei (vgl. Pinedo, 2016, S. 15):¹⁸

- **Flow-Shop:** Jeder Auftrag wird an m Maschinen in derselben Reihenfolge bearbeitet. In den meisten Fällen gilt striktes FIFO (die Aufträge dürfen sich nicht überholen).
- **Job-Shop:** Dabei variieren die Fertigungsrouten zwischen den Aufträgen, nicht jeder Auftrag benötigt jede Maschine in derselben Reihenfolge.

Die Bezeichnung „Sequencing“ bedeutet übersetzt Reihenfolgebildung und kann als Subproblem des Scheduling betrachtet werden. Im Kontext der Produktionsplanung wird darunter die Produktionsreihenfolgebildung an einer Produktionsanlage verstanden (vgl. Herrmann, 2006; Pinedo, 2016).

2.2 Optimierungsmethoden im Scheduling und Sequencing

Im Kontext der Produktionsplanung gibt es Probleme, die eine sehr hohe Komplexität aufweisen und zu deren Lösung Computerunterstützung unumgänglich ist. Speziell bei ganzzahligen Problemen, wie zum Beispiel beim Scheduling und Sequencing, können auch die rechenstärksten Computer die Probleme nicht mehr lösen. In diesem Fall spricht man von NP-vollständigen bzw. NP-harten Problemen (NP steht für Non-Deterministic Polynomial-Time). Für diese Probleme sind keine effizienten Algorithmen bekannt, die innerhalb von Polynominalzeit exakte Lösungen liefern. Diese Komplexität in der Sequenzierung (im Scheduling) wurde bereits Ende der 1960er und Anfang der 1970er von Koryphäen wie Graham (1966) und Liu und Layland (1973) untersucht. NP-vollständige Probleme können nur näherungsweise effizient gelöst werden, wozu eine Vielzahl an Methoden (einfache Heuristiken und generische Metaheuristiken) existieren. Um an dieser Stelle einen qualitativen Einblick in das umfangreiche Forschungsgebiet zu geben, wird auf

¹⁸Daneben gibt es noch Spezialformen wie Flexible-Flow-Shop, Flexible-Job-Shop und Open-Shop.

die tertiäre Arbeit von Abedinnia et al. zurückgegriffen, die die vorhandene Literatur¹⁹ anhand von den Dimensionen Flussprinzip, Job- bzw. Anlagencharakteristika, Optimierungsziel­funktion und Optimierungs­algorithmen einteilt (vgl. Abedinnia et al., 2017, S. 284 ff.). Die Ergebnisse der tertiären Literaturanalyse zeigen, dass die Mehrheit (75 %) der Publikationen auf Heuristiken (darunter einfache und Metaheuristiken) zur Lösung der Optimierungsprobleme zurückgreift. Die Zielfunktionen werden dabei dominiert von strafbasierten (Verspätung, Pönale, 43 %), durchlaufzeitbasierten (32 %) sowie kostenbasierten Zielen (15 %), wogegen multikriterielle Zielfunktionen unterrepräsentiert sind (10 %). Konak et al. unterteilen dabei Zielfunktionen, die aus mehreren Subzielen bestehen, in jene, die (i) mit Gewichten zu einer Hauptziel­funktion addiert werden („virtuelle Kostenfunktion“), oder die (ii) durch die Verwendung von Pareto-Optimierung kombiniert werden. Im Falle der Pareto-Optimierung wird die Verschlechterung einzelner Subziele bis zu einem gewissen Grad akzeptiert, wenn die Optimierung einen positiven Effekt auf andere Zielgrößen hat (vgl. Konak et al., 2006, S. 992).

2.2.1 Taxonomie der Optimierungs­algorithmen

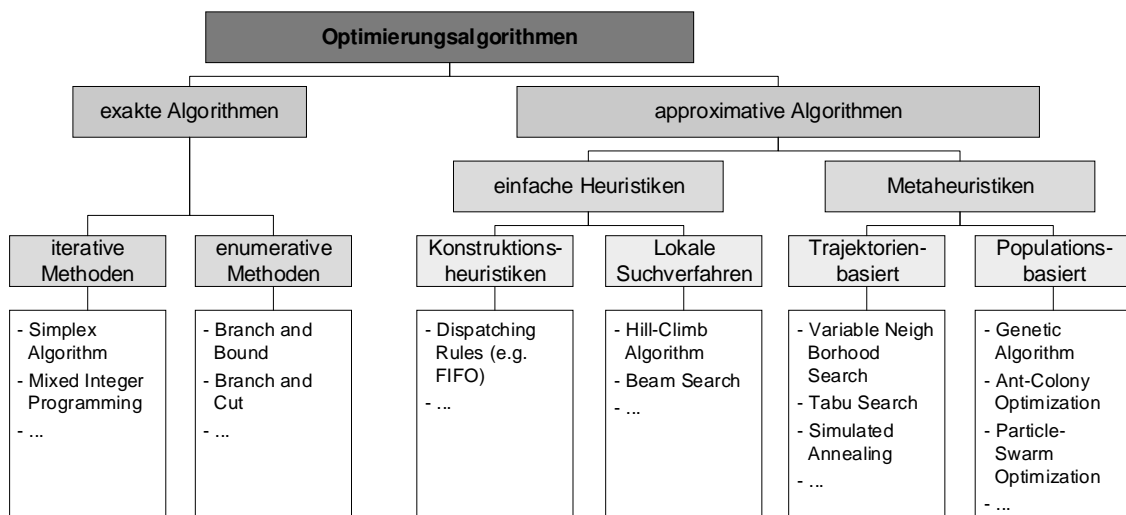


Abbildung 2.1: Einteilung der Optimierungs­algorithmen in Anlehnung an Suroliya et al. (2014), vgl. auch Talbi (2009) und Blum und Roli (2003)

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, werden grundsätzlich exakte und approximative Optimierungsmethoden unterschieden. Die dargestellte Untergliederung findet sich in zahlreichen Arbeiten wieder, wie beispielsweise in Suroliya et al. (2014, S. 354), Talbi (2009) und Blum und Roli (2003).

Während exakte Algorithmen den inhärenten Vorteil aufweisen, tatsächlich das Optimum zu finden (Suroliya et al., 2014, S. 354), haben diese (abhängig vom Problemtyp) lange Rechenzeiten. Approximative Algorithmen können hingegen sehr effizient sein und in kürzester Zeit Lösungen finden, die nahe am Optimum liegen – das tatsächliche Finden des Optimums kann jedoch nicht

¹⁹Die Arbeit stellt eine Inhaltsanalyse (Content Analysis, CA) von Reviewpapern dar (die Arbeit ist daher ein Review von Reviews) und präsentiert den aktuellen Stand der Forschung in komprimierter Form.

garantiert werden (ibid. S. 354). Innerhalb der exakten Algorithmen sind iterative Methoden, wie zum Beispiel der Simplex-Algorithmus und enumerative Algorithmen, wie beispielsweise Branch and Bound Ansätze, zu unterscheiden (vgl. Blum und Roli, 2003). Die approximativen Algorithmen bestehen aus den beiden Subkategorien der einfachen Heuristiken (auch ad-hoc Heuristiken genannt) und Metaheuristiken (auch moderne Heuristiken bezeichnet). Einfache Heuristiken können ihrerseits in Konstruktionsheuristiken und lokale Suchverfahren eingeteilt werden. Konstruktionsheuristiken sind in den meisten Fällen problemspezifisch und schwer zu generalisieren (darunter fallen auch die in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten Prioritätsregeln); lokale Suchverfahren unterstützen beim Finden lokaler Optima. Für die Vielzahl an Algorithmen, die als Metaheuristiken bezeichnet werden, gibt es unterschiedlichste Arten der Klassifizierung (einige Beispiele listen die Autoren Suroliya et al., 2014 auf), wobei die Algorithmen häufig in trajektorienbasierte bzw. punktbasierte Methoden und in populationsbasierte Methoden unterteilt werden.

2.2.2 Kombinatorische Optimierung

Korte und Vygen (2018) eröffnen ihr Werk zur kombinatorischen Optimierung mit dem „Traveling Salesman Problem“ (TSP), transferiert auf die optimale Route für einen Bohrkopf. Das TSP ist eines der bekanntesten Probleme der kombinatorischen Optimierung. Das Problem ist folgendes: Ein Handlungsreisender muss n Städte jeweils genau einmal besuchen und dabei die Gesamtstrecke minimieren. Um das Optimum für dieses Problem zu finden, müssen alle Kombinationsmöglichkeiten enumeriert werden, für eine Anzahl an n Städten ergeben sich so $n!$ Möglichkeiten. (vgl. Korte und Vygen, 2018, S. 1 f.)

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung unterschiedlicher Zeitkomplexitäten in Anlehnung an Korte und Vygen (2018, S. 7)

n	$100n \cdot \log(n)$	$10n^2$	$n^{3,5}$	$n^{\log(n)}$	2^n	$n!$
10	3 μs	1 μs	3 μs	2 μs	1 μs	4 ms
20	9 μs	4 μs	36 μs	420 μs	1 ms	76 <i>Jahre</i>
50	28 μs	25 μs	884 μs	4 s	13 <i>Tage</i>	10^{48} <i>J.</i>
100	66 μs	100 μs	10 ms	5 h	$4 \cdot 10^7$ <i>J.</i>	
10^3	1 ms	10 ms	32 s	$3 \cdot 10^{13}$ <i>J.</i>		
10^4	13 ms	1 s	28 h			
10^6	2 s	3 h	3169 <i>J.</i>			
10^8	266 s	3 <i>J.</i>	$3 \cdot 10^{10}$ <i>J.</i>			
10^{12}	46 <i>Tage</i>	$3 \cdot 10^8$ <i>J.</i>				

Dieses Problem zählt, wie viele andere Probleme der kombinatorischen Optimierung, zur Klasse der NP-vollständigen Probleme und ist somit nicht exakt in Polynomialzeit lösbar. Zur Verdeutlichung der Komplexität dieser Probleme sind in Tabelle 2.1 die Zeitkomplexitäten unterschiedlicher Probleme gegenübergestellt.²⁰ Während die Rechenzeit für ein Problem der Komplexität $O(10n^2)$ lediglich quadratisch anwächst und daher auch für größere n in praktisch sinnvoller Zeit

²⁰Die Zeitwerte basieren auf der Annahme, dass jeder elementare Schritt eine Nanosekunde dauert.

gelöst werden kann, ist dies für Problem der Komplexität $O(n!)$ nicht mehr der Fall. Die Rechen-dauer wächst sehr schnell an, wodurch Probleme in praktisch sinnvoller Zeit nur für kleine n exakt gelöst werden können. (vgl. Korte und Vygen, 2018, S. 7)

2.3 Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen

Die Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen, im Englischen Condition Monitoring genannt, ist ein Kernkonzept der zustandsbasierten Instandhaltung. Die Zustandsinformation bildet die Basis für die aktuellen Entwicklungen in der Instandhaltung im Kontext der Digitalisierung (vgl. acatech, 2015), wobei sich dieser Wandel der Instandhaltung auch im Bereich der Instandhaltungsstrategien (vgl. Biedermann, 2014) widerspiegelt.

In Abschnitt 2.3.1 wird zunächst die Entwicklung des Themas Instandhaltung der letzten Dekaden dargestellt und die daraus resultierende Notwendigkeit der Zustandserfassung abgeleitet. Anschließend folgt in Abschnitt 2.3.2 ein kurzer, narrativer Einblick in das Thema „Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen“.

2.3.1 Entwicklung der Instandhaltung

Die zunehmende Popularität von Sensorik zur Zustandserfassung von Werkzeugen und Maschinen wird getrieben durch den Wandel von Instandhaltungsstrategien. Um in das Thema Zustandserfassung einzuleiten, wird daher an dieser Stelle ein kurzer Überblick zum Thema Instandhaltung und Instandhaltungsstrategien präsentiert.

Begriffsdefinition Instandhaltung: Produktionsanlagen und -maschinen sind in der Realwelt ständigen Belastungen ausgesetzt, die zu einem Verschleiß von Komponenten führen. Instandhaltung ist dabei eine effiziente Möglichkeit, einen zufriedenstellenden Zustandslevel einer Maschine zu gewährleisten. In diesem Sinne wird die Instandhaltung laut DIN folgendermaßen definiert:

Instandhaltung ist die ... Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus [...] einer Einheit [...], die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion [...] erfüllen kann“. (DIN 31051:2012-09, S. 4)

Instandhaltung im Wandel:

Lange Zeit wurde der Instandhaltung wenig Priorität in Wissenschaft wie auch in Praxis eingeräumt – sie wurde eher als eine Art Feuerwehr betrachtet (acatech, 2015, S. 19). In den letzten Jahren hat sich die Instandhaltung aber gewandelt, wie auch Biedermann (2016a, S. 85 f.) unterstreicht. Sie wurde zunächst vorbeugend (präventiv) und soll heute vorausschauend (prädiktiv) sein.

Die Autoren Jardine et al. (2006, S. 1484), beispielsweise, untergliedern Instandhaltung in die folgenden drei Instandhaltungsstrategien:

- (i) **„Breakdown Maintenance“ oder korrektive Instandhaltung:** Instandhaltungstätigkeiten werden erst dann durchgeführt, wenn ein Fehler bereits aufgetreten ist, um diesen Fehler zu korrigieren.
- (ii) **„Preventive Maintenance“ oder präventive Instandhaltung:** Instandhaltungstätigkeiten werden gemäß Wartungsplänen in definierten Intervallen ausgetauscht, um Ausfälle weitestgehend zu vermeiden. Die Intervalle entstehen dabei meist zeitbasiert und sind statisch.
- (iii) **„Condition-based Maintenance“ (CBM) oder zustandsbasierte Instandhaltung:** Auslöser für Instandhaltungstätigkeiten in CBM ist der Zustand einer Komponente (vgl. auch Gouriveau et al., 2016, S. 4).

Basierend auf den technologischen Weiterentwicklungen, hat sich in den vergangenen Jahren eine weitere Instandhaltungsstrategie entwickelt (bzw. ist praktisch relevant geworden), die in Jardine et al. (2006) noch nicht berücksichtigt wurde:

- (iv) **„Predictive Maintenance“ oder prädiktive Instandhaltung:** Instandhaltungstätigkeiten werden basierend auf Prognosemodellen eingeplant, die beispielsweise den RUL (Remaining Useful Life) einer Komponente prognostizieren (vgl. Lee et al., 2014, S. 315). Die Autoren Gouriveau et al. definieren prädiktive Instandhaltung dabei als Weiterentwicklung von CBM, bzw. im englischen Original als „[...] a condition based maintenance carried out following a forecast derived from the analysis and evaluation of the significant parameters of the degradation of the item.“ (Gouriveau et al., 2016, S. 4)

Betrachtet man die Instandhaltungsstrategien von einem wissensbasierten Ansatz aus, so kann zudem eine weitere Entwicklungsstufe unterschieden werden:

- (v) **„Prescriptive Maintenance“ oder präskriptive Instandhaltung:** Die auf die prädiktive Instandhaltung aufbauende Strategie beschreibt nicht nur den RUL, sondern antizipiert auch die durchzuführende Instandhaltungstätigkeit (Ansari et al., 2017).

Die dargestellten Instandhaltungsstrategien bauen im Wesentlichen aufeinander auf. Um eine prädiktive Instandhaltung umsetzen zu können, ist die Aufnahme von Daten notwendig, die eine valide Prognose von, beispielsweise, der RUL ermöglichen und selbiges gilt für präskriptive Instandhaltung. In den meisten Fällen sind Zustandsdaten die für Prognosemodell relevantesten Daten, wie Lee et al. (2014) in ihrer Arbeit hervorheben und auch Gouriveau et al. (2016, S. 19 f.) unterstreichen.

Trotz der technologischen Möglichkeiten, die heute theoretisch prädiktive und präskriptive Instandhaltung in den meisten Bereichen ermöglichen würden, ist es in vielen Fällen nicht die wirtschaftlichste Strategie. Die passende Strategiewahl ist somit ein entscheidender Erfolgsfaktor für eine effiziente Instandhaltung (vgl. Biedermann und Kinz, 2019). Eine Methode zur dynamischen Anpassung der Instandhaltungsstrategie präsentieren, beispielsweise, die Autoren Passath

und Huber (2019). Die Methode basiert auf den Ansätzen der Lean Smart Maintenance, oder kurz LSM (vgl. Biedermann, 2016b,a; Biedermann und Kinz, 2019). Lean Smart Maintenance baut auf das Fundament der klassischen Instandhaltungsstrategien auf (Biedermann und Kinz, 2019, S. 14) und integriert Lean Methoden und Denkweisen in die intelligente Instandhaltung anhand eines lernenden und wissensbasierten Ansatzes (ibid. S.18).

2.3.2 Narrativer Literaturüberblick: Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen

Um Werkzeug- und Maschinenzustände ermitteln zu können, sind Messungen durch den Einsatz von Sensoren in Kombination mit einer geeigneten Signalverarbeitung notwendig. Die exaktesten Messungen sind dabei unter Laborbedingungen möglich, indem eine Komponente aus der Anlage ausgebaut und in einer Messapparatur vermessen wird. Diese Form der Zustandserfassung ist sehr aufwändig und resultiert in einer stillstehenden Maschine. Bei Produktionsmaschinen ist dies wirtschaftlich in den meisten Fällen nicht sinnvoll und der Komponentenzustand muss stattdessen näherungsweise direkt an der Anlage erfasst werden. Wird der Zustand einer Komponente direkt an einer Anlage erfasst, verwendet man (auch im Deutschen) die Bezeichnung Condition Monitoring (CM). Werkzeug- und Maschinenzustände können dabei kontinuierlich („online“ Condition Monitoring), oder auch nur zu diskreten Zeitpunkten („offline“ Condition Monitoring) erfasst werden (vgl. z.B. Jardine et al., 2006, S. 1498). Während ein „offline“ Condition Monitoring bei einer meist stillstehenden Maschine und nur zu vordefinierten Terminen durchgeführt wird, können „online“ CM Systeme kontinuierlich Zustandsdaten erfassen. Aufgrund hoher Anschaffungspreise für Sensorik war „online“ CM lange Zeit wirtschaftlich nicht sinnvoll (vgl. Martin, 1994). Stattdessen wurde in kritischen Bereichen ein „offline“ basiertes Condition Monitoring eingesetzt (vgl. Lee et al., 2014), da dadurch dieselben Sensoren und Messaufbauten für mehrere Anlagen eingesetzt werden konnten. Der Preisverfall von Sensorik der letzten Jahre (Honrubia, 2017; Miller, 2015) ermöglicht aber mittlerweile auch den wirtschaftlichen Einsatz von „online“ Condition Monitoring in vielen Bereichen.

Ein Condition Monitoring System (CMS) beinhaltet im Allgemeinen die folgenden drei Teile:

- (i) **Datenakquise:** Sammeln von zustandsrelevanten Signalen,
- (ii) **Datenverarbeitung:** Analyse der akquirierten Signale und Daten
- (iii) **Datennutzung:** Nutzengenerierung aus den akquirierten Informationen

Diese dreistufige Untergliederung von CM bzw. CMS taucht in ähnlicher Form in vielen themenspezifischen Arbeiten auf (u.a. vgl. Gouriveau et al., 2016; Ambhore et al., 2015; Bhuiyan und Choudhury, 2014; Jardine et al., 2006). Die Autoren Jardine et al. (2006, S. 1484), beispielsweise, verstehen die Datennutzung dabei als die „Nutzung der Informationen zur Entscheidungsunterstützung für die Instandhaltungsplanung“. Gouriveau et al. verwenden zur Beschreibung des Prozesses in ihrer aus dem Bereich „Prognostics and Health Management“ stammenden Arbeit eine

ähnliche Untergliederung. Neben der Datenakquise unterteilen sie die Datenverarbeitung in zwei Subschritte (vgl. Gouriveau et al., 2016):

- (a) **Processing:** Extraktion von Features aus den rohen Messdaten, Bilden von Zustandsindikatoren
- (b) **Health Assessment und Prognose:** Analyse der Zustandsindikatoren, RUL Prognose

Im Folgendem werden die drei Prozessschritte anhand einer selektiven Literaturanalyse kurz zusammengefasst

Datenakquise: Datenakquise ist der Prozess des Sammelns und Speicherns von nutzenstiftenden Daten einer physischen Anlage. Die Daten können dabei in die Kategorien „*Eventdaten*“ und „*Condition Monitoring Daten*“ eingeteilt werden. Während Eventdaten Metainformationen darstellen, die beinhalten (i) was passiert ist (Installation, Ausfall etc.) und (ii) was durchgeführt wurde (präventive Instandhaltungstätigkeit, Ölwechsel etc.), so bestehen die CM-Daten aus Messungen von Signalen, die Informationen über den Zustand einer Komponente bereitstellen. Ohne die Datenakquise zu fokussieren, nennen Jardine et al. eine Reihe an möglichen Systemen zur Erfassung von CM-Daten: Vibrationen, akustische Aufnahmen, Ölanalyse, Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, Wetter- und Umweltdaten. (vgl. Jardine et al., 2006, S. 1485). Einen vollständigeren Überblick über für die Aufnahme von zustandsrelevanten Signalen geeignete Sensoren bieten die Bücher von Tränkler und Reindl (2015), Bernstein (2014) sowie Hering und Schönfelder (2012).

Ambhore et al. klassifizieren die Messprinzipien (im Kontext des Tool Condition Monitoring) zudem in direkte Methoden (optische oder radioaktive Messung, elektrischer Widerstand etc.) und indirekte Methoden (Kraft, Vibration, Temperatur etc.) (vgl. Ambhore et al., 2015, S. 3420). In vielen Fällen sind es Schwingungsdaten wie Vibrationen (indirekte Methode der Zustandsbestimmung), die als Mittel der Wahl zur Datenakquise in Condition Monitoring Systemen eingesetzt werden, wie auch Nandi et al. (2005, S. 719) hervorheben, wenngleich die Autoren in ihrem Literaturüberblick die Motorstromanalyse (engl. Motor-Current-Signature-Analysis, MCSA) fokussieren. Auch in aktuelleren Arbeiten wird hervorgehoben, dass die Analyse von Vibrationsdaten eine hervorragende Möglichkeit des Condition Monitoring ist (vgl. z.B. Goyal und Pabla, 2016).

Datenverarbeitung: Ein essentieller Schritt in der Datenverarbeitung ist das Preprocessing, bei dem die Daten (generiert in der Datenakquise) vorverarbeitet werden. Eventdaten basieren häufig auf manuellen Buchungen – durch den menschlichen Faktor sind Fehlbuchungen möglich und müssen in Betracht gezogen werden (vgl. Jardine et al., 2006, S. 1485). Aber auch automatisch generierte Daten, wie zum Beispiel CM-Daten, können, ausgelöst durch Messfehler, fehlerbehaftet sein. Condition Monitoring Daten können, laut Jardine et al. den drei Typen (i) „*value type*“ (Einzelmesswerte für den betrachteten Zeitbereich, z.B. Ölanalyse), (ii) „*waveform type*“ (Messwerte in Form von Zeitreihen, z.B. Vibrationen) und (iii) „*multidimensional type*“ (z.B. Bildaufnahmen)

zugeordnet werden (ibid. S. 1486). Dabei ist die Analyse von Einzelmesswerten noch vergleichsweise einfach und intuitiv möglich. Das können beispielsweise statistische Vergleiche, wie zum Beispiel die Analyse der Erhöhung der gemessenen Schmutzpartikel im Öl, sein. Bei mehreren Messwerten eignen sich zudem PCAs (principal component analysis) (ibid. S. 1489 f.).

Für die Analyse von Zeitreihen („waveform type“) werden Analysen im Zeitbereich und Analysen im Frequenzbereich unterschieden (vgl. Jardine et al., 2006, S. 1487-1491). Zudem wird, speziell bei nicht-stationären Bedingungen, eine kombinierte Zeit-Frequenzanalyse durchgeführt.

- **Zeitdomänenanalysen** basieren direkt auf dem erfassten Signal. Dabei wird traditionell deskriptive Statistik betrieben und es werden Werte wie Mittelwert, Maximalwert, Intervall, Standardabweichung, Crest-Faktor, RMS (Root Mean Square), Skeweness, Kurtosis, höhere Statistik etc. berechnet. Eine häufig angewendete Form der Zeitdomänenanalyse ist die Berechnung des TSA (time synchronous average) zur Reduktionen des Rauschens im Messsignal. Eine komplexere Form der Zeitdomänenanalyse ist der ARMA (autoregressive moving average). (vgl. Jardine et al., 2006, S. 1487)
- Die **Frequenzdomänenanalyse** basiert auf einer Transformation des Messsignals in den Frequenzbereich, wobei in den meisten Fällen eine FFT (Fast Fourier Transformation) Anwendung findet. Der große Vorteil gegenüber Analysen in der Zeitdomäne ist die Möglichkeit einzelne Frequenzbereiche zu isolieren und im Detail zu betrachten. Am häufigsten verbreitet ist dabei die Analyse des Energiespektrums – durch die Frequenzanalyse können somit jene Frequenzbänder identifiziert werden, die besonders hohe Energieanteile aufweisen. Neben den Resonanzfrequenzen können weitere Spitzen auf Beschädigung und Verschleiß hindeuten. (vgl. Jardine et al., 2006, S. 1487 f.)

Es existieren zahlreiche Arbeiten in der Literatur, die die Feature Extraktion, Selektion und Reduktion sowie die Konstruktion von Zustandsindikatoren thematisieren, wie Gouriveau et al. (2016, S. 34) hervorheben. Einen anschaulichen Überblick über Datenverarbeitungsalgorithmen bieten beispielsweise die Autoren Lee et al. (2014, S. 322 ff.), die in ihrem Literaturüberblick über erfolgreiche Lösungen reflektieren. In der Arbeit von Gouriveau et al. (2016, S. 33-67) wird eine detaillierte Übersicht über Möglichkeiten zur Datenverarbeitung von Condition Monitoring Daten sowie über die Extraktion von „Health Indicators“ präsentiert. Auch die Arbeiten von Javed bieten einen guten Einblick in die Konstruktion von Spitzenkennzahlen (Javed et al., 2012, 2013b,a).

Datennutzung: Für die Nutzung der Daten kann grundsätzlich zwischen Diagnostik und Prognostik unterschieden werden. Unter ersterem wird die Fehlererkennung und -isolierung unmittelbar nach dem Auftreten eines Fehlers, sowie das Erkennen der Ursache (Root-Cause-Analysis) verstanden. Prognostik umfasst demgegenüber die Vorhersage von Fehlern noch bevor diese auftreten, wobei antizipiert wird welcher Fehler wann auftreten wird. (Jardine et al., 2006; Lee et al., 2014)

Innerhalb von Prognostik ist eine häufig verwendete Metrik der RUL (Remaining Useful Life), der beschreibt wie lange eine Komponente noch verwendet werden kann, ehe ein Fehler auftritt (Lee et al., 2014, S. 315). Die Schlüsselschritte Datenakquise und Datenverarbeitung können dabei dem Condition Monitoring (CM) im engeren Sinne zugeordnet werden. Die Datennutzung geht darüber hinaus und erfolgt, beispielsweise, zur Entscheidungsunterstützung im Kontext der zustandsbasierten Instandhaltungsstrategie, wie die Autoren Jardine et al. (2006) hervorheben. Die Zustandsinformation aus CMS kann aber auch in anderen Bereichen, wie beispielsweise in der Produktionsplanung spannend sein. Das wird durch Arbeiten wie von Yugma et al. (2015) sowie Doleschal und Klemmt (2015) unterstrichen, die den Maschinenzustand als wichtiges Entscheidungskriterium im Scheduling in der Halbleiterindustrie sehen.

2.4 Einsatz von Algorithmen des maschinellen Lernens im Kontext der Produktion

Im Forschungsfeld der künstlichen Intelligenz (KI) ist man sich darüber einig, dass der Transistor die Welt bereits erobert hat. Durch den technologischen Fortschritt in der Computertechnologie der letzten Jahrzehnte ist der Einsatz von Algorithmen aus den Bereichen der KI ökonomisch rentabel geworden (Ekkehard et al., 2018, S. 18; Ertel, 2016, S. 12). Leistungsstarke Rechner sind nicht mehr nur großen Forschungseinrichtungen vorbehalten, sondern können auch im privatwirtschaftlichen Bereich eingesetzt werden – so auch im Kontext der Produktion (vgl. Lingitz et al., 2018).

Das Themenfeld der KI ist ein sehr breites und hat seine Ursprünge bereits in den 1950er Jahren mit Koryphäen wie Turing, Newell und Simon sowie Rosenblatt, der das Perzeptron, den Grundstein der neuronalen Netzwerke, vorstellte (Turing, 1950; Newell und Simon, 1956; Rosenblatt, 1958). Nach über einem halben Jahrhundert Forschung ist ein breites Themenfeld entstanden. Ein Teilgebiet der KI, das besonders hohes Interesse genießt, ist das maschinelle Lernen (engl. Machine Learning, ML). Eine verbreitete Begriffsdefinition stammt von Mitchell: „*Machine Learning is the study of computer algorithms that improve automatically through experience.*„ (vgl. Mitchell, 1997)

Demnach werden dem ML jene Algorithmen bzw. Agenten zugeordnet, die nicht explizit programmiert werden, sondern dem menschlichen Lernprozess folgend aus Erfahrung (in der Form von Daten) lernen, wie auch Ertel in seinem Grundlagenwerk definiert (Ertel, 2016, S. 194).

2.4.1 Methoden des maschinellen Lernens

In den vergangenen Jahrzehnten ist bereits eine Vielzahl an Algorithmen entstanden und es kommen ständig neue hinzu. Eine grobe Einteilung der Methoden des maschinellen Lernens ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Strukturierung und die Bezeichnungen der Algorithmen basieren auf der Python Library Scikit-Learn (vgl. Pedregosa et al., 2011).²¹

²¹Es werden bewusst die englischsprachigen Bezeichnungen verwendet, da die Begriffe oft auch in deutschsprachigen Publikationen verwendet werden.

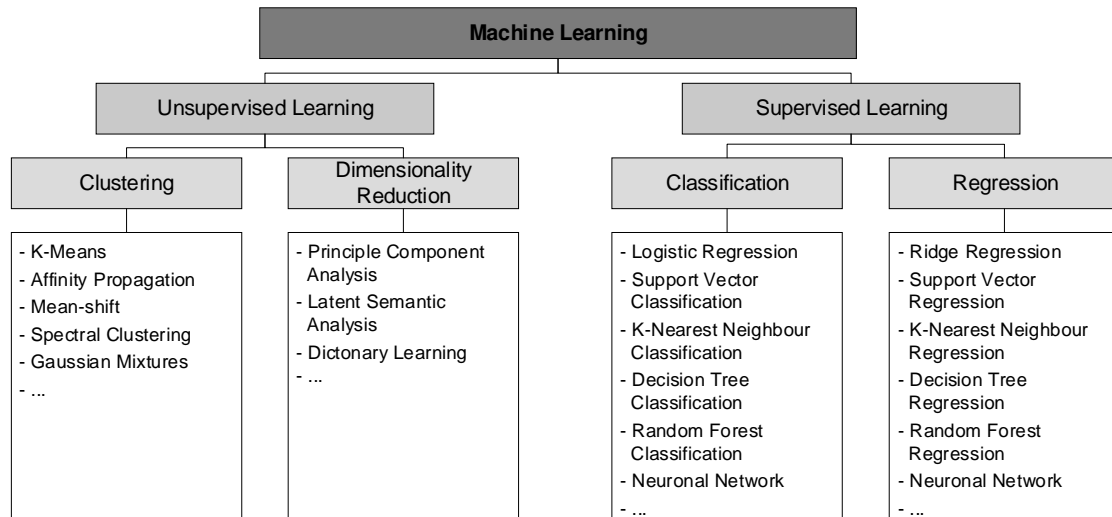


Abbildung 2.2: Einteilung der Algorithmen des maschinellen Lernens

Supervised Learning wird, zum Beispiel, eingesetzt, um Prognosemodelle zu erstellen und ist eine etablierte Ingenieursdisziplin, wie Ertel (2016, S. 257) hervorhebt. Dabei wird ein Modell trainiert, das basierend auf einer Reihe unabhängiger Variablen (diese werden auch als Features bezeichnet), einen Prognosewert einer abhängigen Variable (diese wird auch als Response bezeichnet) berechnet.²² Zum Lernen des Modells (das Lernen wird auch als Trainieren bezeichnet), wird eine Grundwahrheit benötigt, die gelabelte Daten beinhaltet. Das bedeutet, dass die Datensätze neben den Features auch Werte über die Response beinhalten müssen.²³ Demgegenüber sind beim Unsupervised Learning keine gelabelten Daten vorhanden. Ziel ist es hierbei, Cluster in den Daten zu erkennen und daraus mögliche Muster oder Kategorisierungen abzuleiten (ibid. S. 277, vgl. auch Pedregosa et al., 2011). Neben Supervised und Unsupervised Learning wird in manchen Quellen auch das Reinforcement Learning unterschieden. Darunter werden Algorithmen verstanden, die die Modellparameter während der Anwendung anpassen (Optimierung einer kumulativen Zielfunktion) und somit selbst „Hinzulernen“ (Ertel, 2016, S. 257 und 313 ff.).

2.4.2 Anwendungsbeispiele aus dem Bereich Produktion

An dieser Stelle soll dem interessierten Leser ein kurzer Überblick hinsichtlich möglicher Anwendungsfelder von maschinellem Lernen im Kontext der Produktion gegeben werden.

Prognosemodelle für produktionsrelevante Zeiten: Machine-Learning findet auch im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung Anwendung – im Speziellen zur Prognose von produktionsrelevanten Zeiten, wie beispielsweise Lingitz et al. (2018) und Gyulai et al. (2018) in ihren Arbeiten zur Prognose von Durchlaufzeiten in der Halbleiterindustrie unter Beweis stellen. Aber

²²Es gibt auch Modelle mit mehr als einem Response-Wert.

²³In den meisten Fällen werden dazu historische Daten herangezogen, wo die Response-Werte bereits bekannt sind (z.B. historische Absatzzahlen, Bearbeitungszeiten, Zustände etc.).

auch zur Prognose von Zykluszeiten eignet sich Machine-Learning, wie, beispielsweise Ringsquandl et al. (2015) in ihrer Arbeit zeigen.

Einsatz von maschinellem Lernen im Kontext von Condition Monitoring: Im Bereich des Condition Monitoring findet der Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens breite Anwendung. So verwendet beispielsweise Saglam (2011) neuronale Netze zur Prognose des Zustandes von Bandsägen. Da sich Zustände häufig auch in optisch messbarer Form widerspiegeln, kann auch die Bildverarbeitung eine wichtige Auswertungsmethode darstellen, wie D’Addona et al. (2017b) in Ihrer Arbeit durch den Einsatz von ANNs zur Bildauswertung unter Beweis stellen. Das der Einsatz von neuronalen Netzen kein Phänomen der letzten Jahre ist, zeigen die beiden Arbeiten von Dimla und Lister (2000a; 2000b), die bereits Anfang der 2000er Jahre Multi-Layer-Perzeptrons zur Zustandsprognose einsetzen.²⁴

Wie auch aus dem kurzen Literaturüberblick ersichtlich, werden vorwiegend Algorithmen aus dem Bereich des Supervised Learnings im Kontext der Produktion eingesetzt, da die Kernaufgabe der Algorithmen die Prognose von produktionsrelevanten Kennzahlen ist.

2.5 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches

Die in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Themenbereiche lassen sich nun in Form eines Venn-Diagramms anordnen (Abbildung 2.3). Dabei besteht das Venn-Diagramm aus den drei Forschungsdisziplinen Informatik, Ingenieurwissenschaften und Managementwissenschaften. Jede der Forschungsdisziplinen ist dem für das Dissertationsvorhaben relevanten Themenbereich zugeordnet, welche in den Abschnitten 2.1, 2.2, 2.3 und 2.4 vorgestellt wurden. Kombiniert man die Themenbereiche, so entstehen die folgenden Überlappungsbereiche:

- (1) Einsatz von Algorithmen des maschinellen Lernens zum Ableiten und Prognostizieren von Werkzeug- und Maschinenzuständen
- (2) Einsatz von Optimierungsalgorithmen in der Produktionsplanung
- (3) Integrierte Betrachtung von Condition Monitoring und Produktionsplanung
- (4) Integration von (1), (2) und (3)

2.5.1 Einsatz von Algorithmen des maschinellen Lernens zum Ableiten und Prognostizieren von Werkzeug- und Maschinenzuständen

Überlappungsbereich (1) in Abbildung 2.3 setzt sich aus den Forschungsdisziplinen Informatik und Ingenieurwissenschaften zusammen. In der Literatur existieren bereits einige Ansätze, die

²⁴Weitere Publikationen sind in Tabelle 5.1 dargestellt.



Abbildung 2.3: Venn-Diagramm: Forschungsbereiche

Algorithmen des maschinellen Lernens im Kontext des Condition Monitoring nutzen, wie in Abschnitt 2.4 dargestellt (z.B. D’Addona et al., 2017b; Saglam, 2011).

Da bereits viele Lösungen im Bereich Condition Monitoring existieren, wie die Autoren Bhuiyan und Choudhury (2014) sowie Jardine et al. (2006) unter Beweis stellen, und es umfangreiche Entwicklung im Kontext des maschinellen Lernens gibt (vgl. z.B. Pedregosa et al., 2011), werden in der vorliegenden Dissertation ...

- (i) keine neuen Condition Monitoring Konzepte und
- (ii) keine neuen Algorithmen des maschinellen Lernens entwickelt.

Stattdessen wird der Überlappungsbereich (1) adressiert, indem bereits vorhandene Condition Monitoring Lösungen in der wissenschaftlichen Fachliteratur recherchiert und in einer für Praktiker nutzbaren Form aufbereitet werden. Dabei werden im Speziellen jene Lösungen fokussiert, die im Bereich der Datenverarbeitung Methoden des maschinellen Lernens nutzen.

2.5.2 Einsatz von Optimierungsalgorithmen in der Produktionsplanung

Überlappungsbereich (2) in Abbildung 2.3 basiert auf der Integration der Forschungsdisziplinen Informatik und Managementwissenschaften. Dabei sind speziell für die Produktionsplanung bzw. das Scheduling und Sequencing einsetzbare Optimierungsalgorithmen für das Dissertationsvorhaben relevant. Bei einer Betrachtung der vorhandenen Literatur wird ersichtlich, dass bereits viele Lösungen existieren (vgl. Abschnitt 2.2, Abedinnia et al., 2017).

Die verfügbaren wissenschaftlichen Publikationen, die Überlappungsbereich (2) zugeordnet werden können, sind in vielen Fällen theoretisch und stellen die Entwicklung der Algorithmen in den Vordergrund (z.B. Desforges et al., 2017; Hu et al., 2017a,b). Für den Praxiseinsatz in industriellen Umgebungen eignen sich die hochspezialisierten Lösungen oft nicht. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden vorhandenen Optimierungsalgorithmen (im Speziellen Metaheuristiken) aus der Literatur aufgegriffen und die Beschreibung ihrer Integration in industriellen Umgebungen fokussiert. Somit steht in diesem Bereich die Anwendungsorientierung im Vordergrund.

2.5.3 Integrierte Betrachtung von Condition Monitoring und Produktionsplanung

Die beiden Themen Produktionsplanung und Condition Monitoring stellen isoliert betrachtet jeweils sehr große Forschungsbereiche dar. Eine Suche auf Scopus²⁵ mit dem Begriff „Condition Monitoring“²⁶ liefert 26.089 Treffer und mit dem Begriff „Production Planning“²⁷ können 10.453 Treffer erzielt werden. Kombiniert man die beiden Suchbegriffe mit einem logischen „Und“, so reduziert sich die Trefferanzahl auf 11 Publikationen, von denen bei genauerer Betrachtung (Analyse der Titel) 9 Publikationen²⁸ bleiben, die sich tatsächlich mit industrieller Produktion auseinandersetzen.

Die geringe Menge an Publikationen deutet auf potentielle Forschungslücken in diesem Bereich hin. Zur genaueren Analyse von Überlappungsbereich (3) wird in Abschnitt 3 eine systematische Literaturanalyse durchgeführt, die den Stand der Forschung mit einem möglichst vollständigen Abdeckungsgrad abbildet. Eine detaillierte Abgrenzung zu vorhandenen Arbeiten erfolgt ex post zur Literaturanalyse in Abschnitt 3.3.3.

2.5.4 Integration von (1), (2) und (3)

Überlappungsbereich (4) beinhaltet Lösungen, die Condition Monitoring in die Produktionsplanung integrieren (3), und dabei ...

- (i) Optimierungsmethoden für die Planung nutzen (2) und
- (ii) Algorithmen des maschinellen Lernens zur Erfassung der Werkzeug- und Maschinenzustände einsetzen (3).

Somit werden in (4) jene Lösungen eingeordnet, die gleichzeitig Teil der Überlappungsbereiche (1), (2) und (3) sind. Überlappungsbereich (4) beschreibt den fokussierten Bereich der vorliegenden Dissertation. Dabei dominiert Überlappungsbereich (3); (1) und (2) stellen komplementäre

²⁵<https://www.scopus.com/>

²⁶in den Feldern „Title“, „Abstract“ und „Keywords“; Suche limitiert auf Journal- und Konferenzpaper; Abfrage am 03.07.2019

²⁷in den Feldern „Title“, „Abstract“ und „Keywords“; Suche limitiert auf Journal- und Konferenzpaper; Abfrage am 03.07.2019

²⁸Karner et al. (2019); Al-Najjar (2016); Zheng et al. (2013); Aruveli et al. (2012a,b); Chantrapornchai und Sathapanawat (2011); Do et al. (2006); Cooper (1998); Tate (1986)

Methoden zur Verfügung, die zur Operationalisierung der Integration von Condition Monitoring und Produktionsplanung in Form eines „Phasenmodells zur Entwicklung einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung“ genutzt werden. Eine detaillierte Abgrenzung zur vorhandenen Literatur und die Ableitung von Anforderungen an die zu entwickelnde Lösung werden in Abschnitt 4 durchgeführt.

3 Stand der Forschung

Auf den Schultern von Riesen zu stehen, ermöglicht es einem weiter zu sehen als der Riese selbst. Dieses Zitat, das auf Sir Isaac Newton (vgl. Vom Brocke et al., 2009) zurückgeht, beschreibt das Ziel einer Literaturrecherche recht anschaulich. Der Riese repräsentiert dabei den aktuellen Stand der Forschung – erst durch das Aufgreifen des bereits Erforschten können Literaturlücken identifiziert und ausgeglichen werden.

In diesem Abschnitt der Dissertation wird eine systematische Literaturanalyse vorgestellt. Dabei wird der aktuelle Stand der Forschung hinsichtlich der Integration von Werkzeug- und Maschinenzustandserfassung (engl. Condition Monitoring) und der Produktionsplanung abgebildet. Dazu wird, wie im Forschungsdesign beschrieben (vgl. Abbildung 1.7), zunächst in Abschnitt 3.1 die Methodologie der Literaturanalyse dargelegt. Anschließend erfolgt die Anwendung der Analysemethodologie in Abschnitt 3.2 und die Diskussion der Ergebnisse in Abschnitt 3.3.

3.1 Methodologie der Literaturanalyse

Literaturanalysen dienen der stichhaltigen Informationsdarlegung in Wissenschaft und Praxis und sind eine Schlüsselmethode entlang aller Forschungsdisziplinen. In vielen Fällen ist die Literaturauswahl dabei nur selektiv und dient dazu, dem Leser einen kurzen, narrativen Überblick über aktuelle Forschungsthemen innerhalb des Fachgebietes zu geben. Der Anspruch an Repräsentativität oder Vollständigkeit fehlt dabei jedoch und die Literaturanalysen können demnach verzerrt sein. (vgl. Tranfield et al., 2003, S. 207)

Den Grundprinzipien des Konstruktivismus folgend (es gibt keine objektive Realität, vgl. Abschnitt 1.4), wird an dieser Stelle die Methodologie der systematischen Literaturanalyse dargelegt.

Die Recherchemethodologie wird nach dem Vorbild von Tranfield et al. (2003) konzipiert, indem ein dreistufiger Prozess zur Durchführung von systematischen Literaturanalysen abgebildet wird.²⁹ Initial erfolgt dazu die Erstellung eines Rechercheplans. Um dem Leser die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen der Literaturanalyse zu vermitteln, erfolgt eine Charakterisierung gemäß den fünf Klassen von Cooper (1988), erweitert um quantitative Klassen, die die Reproduzierbarkeit der Literaturanalyse gewährleisten:

- **Fokus:** Die Literaturrecherche soll den vorhandenen Forschungsstand abdecken – indem gleichermaßen Ansätze, Methoden, Modelle und Instanzierungen analysiert werden.
- **Ziel:** Durch das Analysieren und Synthetisieren der vorhandenen Literatur sollen Fragestellungen im Forschungskontext (Integration von Werkzeug- und Maschinenzustandserfassung und Produktionsplanung) identifiziert werden, die von aktuellen Arbeiten nicht abgedeckt werden (vgl. Forschungsfrage 1 in Abschnitt 1.4.4).
- **Perspektive:** Es wird versucht die Literatur neutral zu repräsentieren.

²⁹Ein detaillierterer Überblick über die Recherchemethodologien ist in Appendix A.1.1 zu finden.

- **Abdeckungsgrad:** Es wird ein vollständiger Abdeckungsgrad angestrebt.
- **Sprache:** Die Literaturanalyse wird in Englisch durchgeführt.
- **Organisation:** Die Literaturanalyse wird methodisch / konzeptionell strukturiert, mit dem Ziel den Stand der Forschung quantitativ (anhand von Klassifikationen der Publikationen) abzubilden.
- **Publikum:** Das angestrebte Publikum ist ein Fachpublikum im interdisziplinären Querschnittsbereich von Produktions- und Informationswissenschaften (vgl. wissenschaftstheoretische Grundpositionen in Abschnitt 1.4). Die Literaturanalyse soll den Lesern dieser Dissertation einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung vermitteln und Klarheit über vorherrschende Forschungslücken schaffen.

Die quantitativen Randbedingungen der Literaturanalyse lauten folgendermaßen:

- **Zeiträume:** Da es das Ziel der Literaturrecherche ist, den aktuellen Stand der Forschung abzubilden und Forschungslücken zu identifizieren, sind speziell aktuelle Publikationen relevant. Im Allgemeinen gilt ein Rückblick über die letzten fünf Jahre als hinreichend. Um einen möglichst vollständigen Abdeckungsgrad erzielen zu können, wird der Zeitbereich eingeschränkt auf 2000 bis 2018. Publikationen die vor 2000 erschienen sind, werden nicht berücksichtigt.³⁰
- **Publikationsarten:** Im Rahmen der Literaturrecherche werden Journalbeiträge und Konferenzbeiträge berücksichtigt.
- **Datenbanken:** Es werden die Literaturdatenbanken Scopus³¹ (als eine der weltweit größten Datenbanken für wissenschaftliche Publikationen) und Springer Link³² berücksichtigt.

3.2 Systematische Literaturanalyse

Ziel der systematischen Literaturrecherche ist es Forschungsfrage 1 (vgl. Abschnitt 1.4.4) der vorliegenden Dissertation zu beantworten und Forschungslücken im Bereich der integrativen Betrachtung von Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) und der PPS aufzudecken.

3.2.1 Schlüsselwörter und Suchterme

Aus selektiven Voranalysen (vgl. Abschnitt 2) erfolgt im ersten Schritt die Auswahl zentraler Schlüsselbegriffe, die kombiniert als Suchbegriffe verwendet werden. Da es das Ziel der Literaturrecherche ist, den Forschungsstand hinsichtlich der Integration von Werkzeug- und Maschinenzustandserfassung und Produktionsplanung abzubilden, stammen die Schlüsselbegriffe aus den

³⁰Die Literaturrecherche wurde in den Kalenderwochen 22, 23 und 29 des Kalenderjahres 2018 durchgeführt. Publikationen, die später erschienen sind, werden in der systematischen Literaturanalyse nicht berücksichtigt.

³¹Scopus ist die Literaturdatenbank des weltgrößten Verlages (Elsevier) für wissenschaftliche Publikationen.

³²Springer ist nach Elsevier der derzeit zweitgrößte Verlag für wissenschaftliche Veröffentlichungen.

Tabelle 3.1: Schlüsselbegriffe der systematischen Literaturanalyse

ID	Schlüsselwort
C1	„Process Condition“
C2	„Machine Condition“
C3	„Tool Condition“
C4	„Condition Monitoring“
C5	„Condition based Monitoring“ OR „Condition-based Monitoring“
C6	„Condition“ AND „Maintenance“
P1	„Production Planning and Control“ OR „PPC“
P2	„Production Planning“
P3	„Production Control“
P4	„Scheduling“
P5	„Production Scheduling“

beiden Kategorien Condition Monitoring (C) und PPS (P). Die Schlüsselwörter sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Die Suchbegriffe wurden in englischer Sprache formuliert und setzen sich aus einer Kombination aus je einem Schlüsselwort der Kategorie C und einem Schlüsselwort der Kategorie P zusammen. Dabei erfolgt die Kombination der Schlüsselwörter zu Suchtermen mit logischen Konnektoren (zum Beispiel: „AND“). Ein entscheidender Faktor in der Auswahl der Schlüsselwörter ist die Vollständigkeit in ihrer Bedeutung.³³

In Summe entstehen 30 mögliche Kombinationen, die auf 24 konkrete Suchterme reduziert werden.³⁴ Ein Beispiel für einen Suchterm ist: „*Machine Condition*“ AND „*Scheduling*“.

3.2.2 Klassifizierung der Publikationen

Für die Analyse der Publikationen werden, wie von Tranfield et al. (2003) vorgeschlagen, Features festgelegt, die der Klassifizierung der Publikationen dienen (Tabelle 3.2). Eine detaillierte Beschreibung der Bedeutung aller Features ist in Abschnitt A.1.2 zu finden. Grundsätzlich werden diskrete und kontinuierliche Klassen unterschieden:

³³Würde, zum Beispiel, nur der Term „*Condition*“ bzw. „*Zustand*“ verwendet werden, würden sehr viele nicht relevante Suchtreffer entstehen, da die Bezeichnung mehrere inhärente Bedeutungen hat. (Laut Duden hat der Begriff „*Zustand*“ folgende Bedeutungen: Befund, Beschaffenheit bzw. Gleichgewicht, Laune bzw. Gegebenheit, Sachlage). Insofern wird der Term nicht nur über einen logischen Operator mit einer weiteren Spezifikation verknüpft (z.B. „*Condition*“ AND „*Monitoring*“), sondern der Suchterm muss aus beiden Begriffen („*Condition Monitoring*“) bestehen. Grundsätzlich wird in der Literatur die Bezeichnung „*Condition Monitoring*“ zur Beschreibung von *Zustandsüberwachung* verwendet. Instandhaltungsstrategien, die darauf aufbauen, werden häufig als „*Condition based Maintenance*“ bezeichnet. Der Teilbegriff „*Condition based*“ bzw. „*Condition-based*“ wird teilweise auch in Kombination mit „*Monitoring*“ angewandt. Um auch diese Publikationen mit der systematischen Literaturrecherche abzudecken wird der Begriff als weiterer Suchbegriff (C5) angeführt.

³⁴Die durchgeführten Suchen sind in Tabelle A.1 dargestellt.

- Die **diskreten Klassen** bestehen aus vorab definierten Kategorien, wobei die Kategorien eindeutig sind. Ist keine Zuordnung zu einer Klasse möglich, wird die Publikation als nicht-relevant klassifiziert und ausgeschlossen.
- Die **kontinuierlichen Klassen** beschreiben Features, deren Inhalte vorab nicht festgelegt werden können, da sie publikationsspezifisch sind (z.B. Branche). Eine Diskussion der entstandenen kontinuierlichen Kategorien erfolgt ex post zur morphologischen Literaturrecherche (vgl. Abschnitt A.1.5).

Tabelle 3.2: Kategorien der systematischen Literaturrecherche

diskret	1	Art der Publikation	-) Literaturüberblick -) Konzipierung -) Fallstudie
	2	Art der Lösung	-) Ansatz -) Modell -) Methode -) Instanziierung
	3	Anwendungsbereich	-) spezifisch -) allgemein
	4	Fokus	-) Condition Monitoring -) Instandhaltung -) Produktionsplanung -) Integration Condition Monitoring und Produktionsplanung -) Integration Instandhaltung und Produktionsplanung
	5	Instandhaltungsstrategie	-) korrektiv -) präventiv -) prädiktiv -) präskriptiv
	6	Planungsbereich	-) Produktionsgrobplanung -) Produktionsfeinplanung -) Produktionssteuerung
	7	Condition Monitoring	-) kein -) offline -) online
	8	Evaluierung	-) keine -) theoretisch -) praktisch
kontinuierlich	A	Branche	z.B. "Metallverarbeitende Industrie"
	B	Messung	z.B. "Vibrationen"
	C	Datenauswertung	z.B. "Machine Learning"
	D	Optimierungsalgorithmus	z.B. "Genetischer Algorithmus"

3.2.3 Systematische Literaturrecherche

Die systematische Literaturrecherche wurde in den Datenbanken Scopus und Springer Link durchgeführt. Während in Scopus die Suche systematisch auf Abstract, Schlüsselwörter und Titel eingegrenzt werden konnte, erfolgte bei Springer Link eine Volltextsuche, da es zum Recherchezeitpunkt keine Möglichkeit zur Sucheinschränkung auf spezifische Textbereiche gab.³⁵ Zudem wurden jene Arbeiten ausgeschlossen, die zeitlich vor 2000 bzw. nach dem Suchzeitpunkt erschienen sind.³⁶ Eine weitere Einschränkung erfolgte gemäß Publikationstyp, da nach Journalbeiträgen und Konferenzbeiträgen gefiltert wurde.

Die systematische Literaturanalyse hat in Summe 5.335 Treffer (585 in Scopus und 4.750 in Springer Link) geliefert. Nach einer Analyse der Titel wurden die Treffer auf 406 (199 in Scopus und 207 in Springer Link) reduziert. Anschließend wurden Duplikate (Publikationen, die in beiden Datenbanken, bzw. durch mehrere Suchbegriffe gefunden wurden) aus dem Recherchedatenset entfernt, wodurch ein Datenset von 195 Publikationen entstanden ist.³⁷

Im Rahmen der morphologischen Literaturanalyse wurden die recherchierten Publikationen inhaltlich analysiert und in die in Abschnitt 3.2.2 vorgestellte Kategorisierung eingeordnet. Im Rahmen der inhaltlichen Analyse der Publikationen wurden einige weitere Arbeiten als nicht relevant identifiziert, wodurch 156 Publikationen im finalen Datenset verblieben, für die eine Einordnung in die definierten Kategorien möglich war. Die Ergebnisse sind in Tabelle A.2 dargestellt, die in Abschnitt A.1.5 detailliert analysiert wird.

3.3 Diskussion der Literaturanalyse

Dieser Abschnitt dient der Zusammenfassung der systematischen Literaturanalyse und aggregiert die Ergebnisse aus der morphologischen Literaturanalyse in Abschnitt A.1.5.

3.3.1 Zusammenfassung des analysierten Forschungsfeldes

Um das analysierte Forschungsfeld „Integration von Werkzeug- und Maschinenzustandserfassung und Produktionsplanung“ zusammenzufassen, werden die Dimensionen (i) Aktualität, (ii) Instandhaltung und Produktionsplanung sowie (iii) Eingesetzte Methoden kurz präsentiert.

Aktualität der Thematik: Die Anzahl an relevanten Publikationen hat in den letzten Jahren stark zugenommen (vgl. Abbildung A.3). Wie die Autoren Sinha und Chandel schon im Jahr 2015 hervorhoben, ermöglichen die Weiterentwicklungen der computergestützten Berechnungstechniken den Einsatz rechenintensiver Optimierungs- und Simulationsmethoden (vgl. Sinha und Chandel, 2015, S. 757). Wie Tomislav (2017) schreibt, ist der unterstützende Einsatz von Optimierungsmethoden auch erforderlich, um die gestiegene Komplexität in der Produktionsplanung

³⁵Somit stieg der Aufwand in der Voranalyse (Analyse der Titel) für den ersten Relevanzfilter..

³⁶Die Literaturrecherche wurde in den Kalenderwochen 22, 23 und 29 des Kalenderjahres 2018 durchgeführt.

³⁷Die Ergebnisse der Literaturrecherche sind im Detail in Abschnitt A.1.3 dargestellt.

bewältigen zu können. Dazu werden in der Literatur (vgl. Abbildung A.12) zum Großteil Metaheuristiken (vgl. auch Abschnitt 2.2, Abedinnia et al., 2017) eingesetzt, wobei diese häufig anwendungsfallspezifisch entwickelt werden, wie, zum Beispiel, die Arbeiten von Desforges et al. (2017), Hu et al. (2017a), Hu et al. (2017b) sowie Aalaei und Davoudpour (2016) zeigen. Jene Publikationen, die bestehende Algorithmen nutzen bzw. auf etablierte Methoden aufbauen, verwenden in vielen Fällen genetische Algorithmen (u.a. Jing et al., 2017; Beheshti-Fakher et al., 2016), aber auch Simulated Annealing findet sich in der analysierten Literatur wieder (vgl. La Fata und Passannanti, 2017; Tambe und Kulkarni, 2014). Zudem ist in der Analyse aufgefallen, dass Simulationen in vielen Publikationen eingesetzt werden. Ist die Fitnesslandschaft komplex oder müssen stochastische Einflüsse abgebildet werden, so kann Simulation zur Fitnessbewertung eingesetzt werden, wie z.B. die Autoren Amelian et al. (2018), die auf eine Simheuristik³⁸ setzen, zeigen. Weitere aktuelle Beispiele für den Einsatz von Simulationsmethoden im Kontext der Optimierung sind Kan et al. (2018), Rahmati et al. (2018) und Salmasnia et al. (2018).

Instandhaltung und Produktionsplanung: Wie in Abschnitt 2.3.1 präsentiert, liegt ein Wandel in der Instandhaltung vor: Aus einer korrektiven Instandhaltung ist zunächst eine präventive und mit der steigenden Popularität von Algorithmen des maschinellen Lernens eine prädiktive Instandhaltung entstanden (acatech, 2015, S. 19). Theoretische Ansätze hinsichtlich prädiktiver Instandhaltung behandelt dabei, zum Beispiel, März (2017), der das Instandhaltungsmanagement fokussiert. Die Autoren Ansari et al. (2017) thematisieren bereits den nächsten Entwicklungsschritt: die präskriptive Instandhaltung. In beiden Fällen liegt der Schlüssel in den Daten, wie Biedermann (2016b) unterstreicht, denn letztendlich ist eine prädiktive oder auch präskriptive Instandhaltungsstrategie in der Praxis nicht überall wirtschaftlich sinnvoll. Dort wo prädiktive Instandhaltung nutzenstiftend eingesetzt werden kann, wird aber ihre operative Einbettung zur zentralen Thematik. Die Autoren Zhai und Reinhart (2018) kritisieren in diesem Kontext, dass die Produktionsablaufplanung in der Praxis ungeachtet des Maschinenzustandes erfolgt und dabei Optimierungspotential ungenutzt bleibt. Jene Publikationen, die sich mit einer integrativen Betrachtung der Zustandserfassung und der Produktionsplanung befassen, modellieren vermehrt eine präventive Instandhaltungsstrategie (> 60 % der analysierten Publikationen), wie beispielsweise in Amelian et al. (2018), Díaz Ramírez und Huertas (2018), Rahmati et al. (2018), Abdelrahim und Vizvári (2017) sowie in Beheshti Fakher et al. (2017) ersichtlich. Dabei wird Condition Monitoring in der Form von Schwellwerten genutzt und bei einem Überschreiten eines Maximal- bzw. Minimalwertes wird ein Alarm ausgelöst, der in weiterer Folge zu einer präventiven Instandhaltungsmaßnahme führt. Demgegenüber sind prädiktive Instandhaltungsstrategien wie zum Beispiel Zhai und Reinhart (2018) beschreiben und Kan et al. (2018), Kao et al. (2018) sowie Sobaszek et al. (2018) anwenden, deutlich unterrepräsentiert. Condition Monitoring wird zwar zum Teil in diesen Arbeiten thematisiert, in vielen Fällen wird aber nicht beschrieben, wie ein planungsrelevanter Zustand erfasst werden kann (z.B. Amelian et al., 2018; Rødseth et al., 2018; Sobaszek et al., 2018). Der Zustand wird als bereits gegeben hingenommen oder modellbasiert abgebildet (vgl. Jacobs

³⁸Konkret wird ein kombinierter Ansatz aus einem NSGA-II Algorithmus mit einer Simulation zur multikriteriellen Optimierung eingesetzt.

et al., 2009; Kao et al., 2018). Betrachtet man den Planungsbereich (vgl. Abbildung A.7), so dominieren Produktionsfeinplanung und Produktionssteuerung, wobei grundsätzlich das Scheduling im Vordergrund steht, wie beispielsweise die Autoren Jacobs et al. (2009) und Kao et al. (2018) hervorheben. Dabei wird auch die integrative Betrachtung zwischen Produktionsfeinplanung und Instandhaltung sichtbar, wie z.B. die Arbeit von Kiangala und Wang (2018) unter Beweis stellt.

Eingesetzte Methoden: Hinsichtlich der Methoden ist auffallend, dass häufig MIP zur Modellierung der Probleme eingesetzt wird, wie die Arbeiten von Díaz Ramírez und Huertas (2018), Kao et al. (2018) sowie Kian et al. (2018) zeigen. Aber auch Simulationen werden eingesetzt: entweder ...

- (i) in Form einer Simheuristik (vgl. z.B. Amelian et al., 2018) oder
- (ii) zur Durchführung der Validierung (vgl. z.B. Kröning und Denkena, 2013).

Die Autoren Doleschal und Klemmt (2015) beispielsweise nutzen einen kombinierten Ansatz aus MIP und Simulation zur Modellierung der Optimierung. Betrachtet man die eingesetzten Optimierungsalgorithmen, so werden neben Eigenentwicklungen speziell Metaheuristiken eingesetzt, wobei genetische Algorithmen und Simulated Annealing zu den häufigeren zählen, wie auch die Autoren Abedinnia et al. (2017) in ihrer Arbeit unterstreichen. Betrachtet man die Datenerfassung zustandsrelevanter Signale (vgl. Abbildung A.10), so ist die Dominanz von Vibrationsdaten ersichtlich, wie auch die Autoren Nandi et al. (2005, S. 719) in ihrer renommierten Arbeit hervorheben. Die Auswertung der Daten (Abbildung A.11) erfolgt in den meisten Fällen im Zeitbereich (z.B. Al-Najjar, 2016; Husejnagić und Sluga, 2015), wogegen Ansätze, die auf maschinellem Lernen basieren, unterrepräsentiert sind (vgl. Feng et al., 2017).

3.3.2 Narrative Literaturanalyse

Anhand einer narrativen Literaturanalyse, sollen die relevantesten Publikationen³⁹ zusammengefasst, diskutiert und miteinander verglichen werden.

Jacobs et al. betrachteten schon 2009 die zustandsorientierte Maschinenzuordnungs- und Instandhaltungsplanung.⁴⁰ Dabei kritisieren die Autoren die lediglich binäre Berücksichtigung der Zustände (funktionsfähig, nicht funktionsfähig) von Maschinen in der Produktionsplanung. Die Autoren unterscheiden dabei die folgenden drei Auswirkungen einer Zustandsabhängigkeit (Jacobs et al., 2009, S. 1263):

- (i) Es ist ein Mindestzustand notwendig, um eine Produktionstätigkeit durchführen zu können (wird dieser unterschritten, ist zunächst Instandhaltung notwendig),

³⁹Das sind jene 7 Publikationen, die innerhalb der Kategorie (4) der Klasse d (Integration Condition Monitoring & Produktionsplanung) zugeordnet wurden. (vgl. Abschnitt A.1.5, S. 178 f. und Tabelle A.2)

⁴⁰Die Publikation ist in deutscher Sprache verfasst, wurde aber im Rahmen einer englischsprachigen Literatursuche gefunden (englischsprachiger Abstract vorhanden).

- (ii) Trotz Einhalten des Mindestzustandes, kann ein verringerter Zustand eine erhöhte Ausschussrate oder einen höheren Ressourceneinsatz hervorrufen,
- (iii) Durch gestiegenen Ressourcenverbrauch kommt es zu erhöhten Kosten bei gleichem Output.

Die Autoren entwickeln ein Optimierungsmodell, das den Zustand modellbasiert abbildet (lineare Abnutzungsfunktion) und testen es mit synthetischen Daten. In der Bildung des Modells berücksichtigen die Autoren den Mindestzustand der Maschine – eine Berücksichtigung von produktspezifischen Mindestzuständen erfolgt dabei nicht. Zudem definieren die Autoren: „*Der Einfachheit halber enthält dieses Modell weder Reihenfolgen bei der Auftragsbearbeitung noch bei Instandhaltungsmaßnahmen.*“ (Jacobs et al., 2009, S. 1271)

Die Autoren Yugma et al. (2015) präsentieren mit ihrer Publikation einen Literaturüberblick im Kontext Scheduling in der Halbleiterindustrie. Dabei fokussieren die Autoren auf die Berücksichtigung zustandsrelevanter Daten aus den Systemen APC (Advanced Process Control) und FDC (Fault Detection and Classification), wobei sie ihre narrative Literaturanalyse auf die Integration von Scheduling-Entscheidungen und APC-basierten Zustandsinformationen ausrichten. Wie auch Jacobs et al. (2009) hervorheben, kritisieren Yugma et al. (2015, S. 200), dass in vielen Fällen anstatt eines EHI (Equipment Health Indicator) nur eine binäre Unterscheidung des Zustandes in „up“ und „down“ erfolgt. Gründe sehen Yugma et al. speziell in Aufwand und Komplexität zur Datenerfassung und EHI-Berechnung. Basierend auf dem Literaturüberblick leiten die Autoren Forschungsbedarf hinsichtlich der Integration von APC Daten in das Scheduling ab.

Moench und Yugma (2015) widmen sich in ihrem Beitrag⁴¹ ebenfalls der Halbleiterindustrie und behandeln Scheduling für parallele Maschinen im Bereich der Mikrolithographie, motiviert durch Prozesszustände. Das Problem wird anhand eines MIP (Mixed Integer Programming) dargestellt und mit theoretischen Methoden evaluiert.

Eine weitere Publikation aus der Branche der Halbleiterfertigung stammt von Doleschal und Klemmt (2015), die in ihrer Arbeit das Thema Scheduling aus der Perspektive des Produktionsertrages behandeln und dieses in den Kontext der Zustandsüberwachung bringen. Dabei gehen die Autoren von einer Korrelation zwischen Maschinenzustand und Ausbringungsmenge aus. Maschinen unterscheiden sich in der Realität, obwohl sie sich theoretisch für dieselben Produkte eignen würden oder im Original „... *in reality machines are different even though they are allowed for the same products.*“ (Doleschal und Klemmt, 2015, S. 2953) Zur Beschreibung des Zustands verwenden die Autoren die Bezeichnung „*Health Parameter*“ – wobei ein guter Zustand mit einer reduzierten Fehlerwahrscheinlichkeit gleichzusetzen ist. Entsprechend leiten Doleschal und Klemmt ab, dass speziell große und komplexe Wafer jenen Maschinen zugeordnet werden sollten, die einen hohen „*Health Parameter*“ aufweisen. Ihr Modell formulieren die Autoren als MIP (Mixed Integer Programming), evaluieren es theoretisch mittels Simulation und stellen die Ergebnisse Planungsregeln (engl. Orig.: „*Dispatching Rules*“) gegenüber, wobei eine relative Qualitätsverbesserung von 20 % erzielt werden kann (Doleschal und Klemmt, 2015, S. 2961 f.). Weiteren

⁴¹Der Beitrag stammt aus einer „Presentation-only“ Session, wodurch entsprechend wenig analysierbarer Inhalt vorhanden ist.

Forschungsbedarf sehen die Autoren speziell in der praktischen Anwendung von Modellen, die Maschinenzustände in die Produktionsplanung integrieren.

In ihrer Literaturanalyse behandeln die Autoren Gordon et al. (2012) Scheduling mit Berücksichtigung von Fälligkeitszeitpunkten sowie Prozesszuständen und -rahmenbedingungen. Neben Prioritätsrandbedingungen, zeitabhängig variierenden Prozesszeiten und Instandhaltungstätigkeiten fokussieren Gordon et al. auch auf Verschleiß- und Lerneffekte, wobei die Autoren Verschleiß als prozesszeitsteigernd und entsprechend entgegengesetzt Lerneffekte als prozesszeitsenkend modellieren.

Jafari und Makis (2016) thematisieren in ihrer Publikation das Problem der Losgrößenrechnungen unter Berücksichtigung der Instandhaltungsstrategie und Zustandsüberwachung. In ihrem Modell gehen die Autoren davon aus, dass die Zustandsinformation nur jeweils nach jedem Produktionszyklus bekannt ist, wobei der tatsächliche Zustand als unbekannt angesehen wird – das Condition Monitoring System stellt nur partielle Informationen dar.⁴² Die Evaluierung der Methode führen Jafari und Makis anhand eines Praxisbeispiels durch, wenngleich anstatt der Evaluierung anhand eines Problems aus dem Bereich Produktionsplanung das Modell anhand der Instandhaltungsplanung an einer Windturbine validiert wird.

Die Autoren Kao et al. (2018) heben in ihrer Publikation hervor, dass der Maschinenzustand in der vorhandenen Literatur zu Scheduling vorwiegend in binärer Form („up“ und „down“) berücksichtigt wird (vgl. auch Yugma et al., 2015; Jacobs et al., 2009). Für die Branche der Halbleiterindustrie unterstreichen die Autoren aber, dass die Produktqualität mit verschlechterndem Maschinenzustand abnimmt und daher eine feingranularere Abbildung des Zustandes notwendig ist. In der Publikation verwenden die Autoren den EHI (vgl. auch Yugma et al., 2015) als Maschinenzustandsindikator, für dessen Berechnung sie einige Beispiele präsentieren.⁴³ Darauf aufbauend werden zwei MIP Programme zur Optimierung der Produktionsreihenfolgen bei einer kombinierten Betrachtung der Produktivität und des Risikos einer schlechten Qualität durch schlechten Maschinenzustand entwickelt. Dabei vergleichen sie ein Modell mit statischem EHI mit dem eines dynamischen⁴⁴ und können nachweisen, dass letzteres die Realität exakter abbildet und Scheduling-Entscheidungen mit geringerem Risiko generiert. Weiteren Forschungsbedarf sehen die Autoren in der Beschreibung des EHI⁴⁵ sowie in der Entwicklung von schnellen Heuristiken, die auch in der Praxis ein effizientes Lösen von komplexen Problemen ermöglichen. (Kao et al., 2018, S. 451 ff.)

⁴²Dieser Zusammenhang trifft speziell bei Condition Monitoring Systemen zu, die auf indirekten Messmethoden (u.a. Vibrationsmessung) beruhen, da der Zustand nur innerhalb eines gewissen Toleranzbereiches abgeleitet werden kann. Der tatsächliche Zustand kann aber vom Gemessenen bzw. Berechneten abweichen.

⁴³Der EHI kann sich dabei aus verschiedenen Messgrößen (die jeweils kritische Komponenten darstellen) zusammensetzen. In der Halbleiterindustrie sind das, zum Beispiel, Einsatzzeit (Kombination aus Produktionsintensität und Dauer), Temperaturen, oder andere Prozessmesswerte. Die Autoren verweisen aber darauf, dass der Fokus ihrer Publikation auf der Integration des EHI in die Produktionsfeinplanung liegt und gehen in diesem Sinne nicht detailliert auf die Erstellung von selbigen ein, sondern binden den EHI als bereits gegeben in ihr Modell ein. (Kao et al., 2018, S. 452)

⁴⁴Wenngleich die Autoren von einem online Condition Monitoring ausgehen, so modellieren sie dieses im Rahmen der theoretischen Evaluierung ihrer Arbeit synthetisch.

⁴⁵Dabei sehen sie auch Einflussgrößen wie Rüstvorgangszahl, Losgrößen, Leerlaufdauern und weitere maschinenspezifische Messgrößen als relevant. (Kao et al., 2018, S. 458)

Diskussion: Durch die Integration von Werkzeug- und Maschinenzuständen in die Produktionsplanung, ist eine realitätsnähere Modellierung der Produktionssysteme möglich, wie, beispielsweise Gordon et al. (2012) und Kao et al. (2018) hervorheben. Die Autoren Doleschal und Klemmt (2015) sehen in der Halbleiterindustrie die Notwendigkeit der Zustandsberücksichtigung, um eine fehlerfreie Produktion zu ermöglichen. In der vorhandenen Literatur zur PPS werden Zustände und deren Erfassung in den meisten Fällen aber nur vage beschrieben, wie auch Jacobs et al. schon im Jahr 2009 hervorheben: Zustände von Maschinen werden in der Produktionsplanung lediglich binär (funktionsfähig, nicht funktionsfähig) berücksichtigt (vgl. Jacobs et al., 2009, S. 1259). Aber auch in aktuelleren Publikationen, wie Yugma et al. (2015, S. 200) und Kao et al. (2018, S. 450), ist diese binäre Modellierung noch ein Kritikpunkt. Dass die Berücksichtigung von Zuständen speziell in der Halbleiterindustrie eine besondere Bedeutung hat, zeigt sich durch die Publikationen Yugma et al. (2015), Moench und Yugma (2015), Doleschal und Klemmt (2015) sowie Kao et al. (2018). Dabei sind zustandsrelevante APC-Daten von besonderem Interesse, wie Yugma et al. (2015) und Kao et al. (2018) hervorheben – ein höherer Detailgrad über eingesetzte Sensorik wird dabei nicht dargestellt. Kao et al. (2018, S. 452), zum Beispiel, setzen das Vorhandensein eines EHI voraus und Yugma et al. (2015, S. 200 f.) sehen Schwierigkeiten speziell in der Berechnung eines geeigneten EHI. Dominierend ist eine Problemmodellierung mittels MIP (Jacobs et al., 2009; Moench und Yugma, 2015; Doleschal und Klemmt, 2015; Kao et al., 2018). In vielen Fällen sind die Modelle sehr komplex und stellen NP-harte Probleme dar, wodurch ein exaktes Lösen innerhalb Polynominalzeit nicht möglich ist. Zur effizienten Verwendung von Optimierungsmodellen, die Werkzeug- und Maschinenzustände mitberücksichtigen, sind somit Heuristiken notwendig, wie auch Kao et al. (2018, S. 458) hervorheben. Die Autoren unterstreichen des Weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der Definition des EHI. Doleschal und Klemmt (2015, S. 2961 f.) heben zudem hervor, dass es zusätzlicher Arbeiten bedarf, die die Integration von Werkzeug- und Maschinenzuständen in die Produktionsplanung in einer praxisnahen Umgebung anwenden.

3.3.3 Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse

Die zentralen Ergebnisse der Literaturanalyse schließen die erste Stufe des Evidenz Zyklus (Ableiten von Forschungsbedarfen) der ausgewählten Forschungsmethodologie ab (vgl. Abschnitt 1.4.2).

Die Literaturanalyse deckt auf, dass nur ein geringer Anteil (lediglich 7 von 156 Publikationen bzw. rund 4 %) der analysierten Publikationen die integrative Betrachtung von Condition Monitoring und Produktionsplanung und -steuerung fokussieren (vgl. Abbildung A.5). Die Arbeiten weisen aus Sicht der Forschungsfragen die folgenden Lücken auf:

Branchenübergreifende Betrachtung der „Integration von Werkzeug- und Maschinenzuständen in der Produktionsplanung“: In der Halbleiterindustrie spielt der Zustand in Form des EHI bei der Integration von Zustandsinformationen in die Produktionsplanung eine zentrale Rolle, wie Kao et al. (2018) und Yugma et al. (2015) hervorheben. Dabei besteht eine Korrelation zwischen dem EHI und der Fehlerdichte der Wafer, wie Doleschal und Klemmt (2015) unterstreichen.

chen. Je nach Branche variiert jedoch die Art der Korrelation zwischen Produktionsprogramm und dem Werkzeug- bzw. Maschinenzustand. Betrachtet man die Lebensmittelindustrie, so spielt die Kontamination von Produktionsanlagen mit Allergenen eine zentrale Rolle, wie Adams (2018) betont. Sobald eine Anlage, beispielsweise, mit Gluten verunreinigt ist, kann sie keine glutenfreien Produkte mehr herstellen. In der PPS muss diese Zustandsänderung berücksichtigt werden – unzulässige Produkte dürfen solange nicht hergestellt werden, wie die Anlage im kontaminierten Zustand bleibt. Aber auch in der metallverarbeitenden Industrie bestehen Korrelationen zwischen Werkzeug- und Maschinenzuständen, wie die Autoren Arrazola et al. (2013, S. 702) darstellen. Betrachtet man in der Literatur jene Ansätze, die Zustandsinformationen in die Produktionsplanung integrieren, so ist zu erkennen, dass der Fokus in der Halbleiterindustrie liegt (siehe Kao et al., 2018; Doleschal und Klemmt, 2015; Moench und Yugma, 2015; Yugma et al., 2015). Die Ergebnisse lassen sich jedoch nur schwer auf andere Branchen transferieren, da zum Teil branchenspezifische Annahmen getroffen werden. Die Ertragsberechnung in der Halbleiterproduktion, beispielsweise, unterscheidet sich deutlich von anderen Branchen: der Zusammenhang zwischen Defekten und Maschinenzustand ist gegeben, die Anzahl an Defekten liegt aber aufgrund einer Vielzahl an Einflussgrößen in stochastischer Form vor (vgl. Doleschal und Klemmt, 2015).

Abbildung des Zustandsindikators: Hauptkritikpunkt in der Literatur ist die binäre Berücksichtigung der Zustände in funktionsfähig und nicht funktionsfähig, den die Autoren Jacobs et al. (2009), Moench und Yugma (2015) sowie Yugma et al. (2015) hervorheben. Trotz der Einhaltung eines definierten Mindestzustandes, kann ein verringerter Zustand eine erhöhte Ausschussrate bzw. einen erhöhten Ressourceneinsatz hervorrufen (Jacobs et al., 2009, S. 1263). Yugma et al. heben hervor, dass die Berücksichtigung der Zustände im Scheduling in einer progressiveren Form zu einer Verringerung der Ausfallrate führt (Yugma et al., 2015, S. 200). Wie die Zustände konkret erfasst werden können, bleibt in der Literatur in vielen Fällen offen. So führen die Autoren Kao et al. lediglich einen kurzen Überblick an möglichen zustandsrelevanten Signalen an, nutzen für die Modellierung in ihrem Fallbeispiel jedoch einen synthetisch erstellten Zustandsindikator, den sie als bereits gegeben betrachten (vgl. Kao et al., 2018). Die Autoren Yugma et al. unterstreichen in ihrer Conclusio, dass Forschungsbedarf hinsichtlich der Integration von zustandsrelevanten Daten (im Kontext der Halbleiterfertigung, im Speziellen Integration von APC-Daten) in das Scheduling besteht und sehen die Betrachtung von Zustandsinformationen in der Produktionsplanung als zentralen Wettbewerbsvorteil in der Zukunft (Yugma et al., 2015, S. 204). Eine Charakterisierung von produktspezifischen Zustandsabhängigkeiten schlagen nur Doleschal und Klemmt (2015) sowie Kao et al. (2018) vor. Die Autoren Yugma et al. (2015) hingegen setzen in ihrer Arbeit einen reduzierten Maschinenzustand mit reduzierter Qualität gleich. Um die Praxisanforderungen zu erfüllen, sehen die Autoren Kao et al. Forschungsbedarf in der Berechnung des EHI (Zustandsindikator), der auch weitere Features berücksichtigen sollte (Kao et al., 2018, S. 458).

Anwendungsorientierung: Die Autoren Gordon et al. (2012), Moench und Yugma (2015) sowie Yugma et al. (2015) betrachten die Integration von Zustandsdaten in die Produktionsplanung aus theoretischer Sicht. Yugma et al. analysieren in ihrer Arbeit die Entwicklung der Integration von APC-Daten im Scheduling in der Halbleiterindustrie der letzten Jahre und kategorisieren die vorhandenen Ansätze als zu theoretisch bzw. im englischen Original: „[...] *ideas can be very theoretical, and thus fundamental research is still required before practical implementations are undertaken.*“ (Yugma et al., 2015, S. 204) Die Autoren Jacobs et al. (2009) stellen in ihrer Publikation ein Modell zur zustandsorientierten Maschinenzuordnungs- und Instandhaltungsplanung vor, das auch mathematisch ausformuliert wird und im Rahmen eines synthetischen Beispiels getestet wird. In ihrem Modell wird der Zustand modellbasiert über eine Abnutzungsfunktion abgebildet, aktuelle Zustandswerte werden nicht berücksichtigt. Das Modell kann aus Sicht der Autoren „[...] *in vielerlei Hinsicht erweitert und modifiziert werden.*“ (Jacobs et al., 2009, S. 1277). Es bietet einen anschaulichen Überblick, wie die Integration von Zustandsinformationen in die Produktionsplanung ermöglicht werden kann. Aufgrund der theoretischen Annahmen (lineare Abnutzungsfunktion, Jacobs et al. 2009, S. 1266 f.; keine Berücksichtigung von Produktionsreihenfolgen Jacobs et al. 2009, S. 1271) eignet sich das Modell jedoch nicht für den Einsatz in der Praxis. Auch Doleschal und Klemmt (2015) sowie Kao et al. (2018) entwickeln in ihren Arbeiten Optimierungsmethoden, die mit synthetischen Daten getestet werden. Lediglich die Arbeit von Jafari und Makis (2016) ist etwas konkreter und wendet die entwickelte Lösung auf Realdaten an. Das Anwendungsbeispiel stammt dabei jedoch nicht aus dem Bereich der Produktion (Instandhaltung einer Windturbine) und ist somit nur begrenzt vergleichbar. Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass die vorhandenen Ansätze meist keinen Anwendungsbezug zur Produktion aufweisen. Die in der Literatur vorhandenen Lösungen sind ...

- (i) theoretisch (vgl. Gordon et al., 2012; Moench und Yugma, 2015; Yugma et al., 2015), werden
- (ii) lediglich mit synthetischen Daten validiert (vgl. Jacobs et al., 2009; Doleschal und Klemmt, 2015; Kao et al., 2018) oder
- (iii) stammen aus einem produktionsfernen Kontext (vgl. Jafari und Makis, 2016).

Eine fehlende Anwendungsorientierung der vorhandenen Lösungen im Bereich der Integration von Werkzeug- und Maschinenzuständen in der Produktionsplanung wird zudem explizit von den Autoren Yugma et al. (2015, S. 204), Doleschal und Klemmt (2015, S. 2961 f.) und Kao et al. (2018, S. 458) unterstrichen.

4 Spezifische Problemstellung und Zielsetzung

In diesem Abschnitt wird basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 3 der Forschungsbedarf zusammengefasst und die spezifizierte Zielsetzung der vorliegenden Dissertation abgeleitet. Anschließend werden die Anforderungen an eine werkzeug- und maschinenzustandsbedingte Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMBPRO) abgeleitet. Somit vollendet der vorliegende Abschnitt den Relevanz Zyklus der Forschungsmethodologie (vgl. Abschnitt 1.4.2).

4.1 Spezifische Problemstellung

Im Kontext der Integration von Condition Monitoring (CM) und Produktionsplanung und -steuerung (PPS) existiert eine Forschungslücke – wie in der Literaturanalyse (vgl. Abschnitte A.1.5 und 3.3) festgestellt werden konnte, liegt der Fokus von nur 4 % (vgl. Abbildung A.5) der als relevant klassifizierten Literatur in der Integration von CM und PPS. Der Großteil der analysierten Publikationen fokussiert auf (i) Instandhaltung, (ii) PPS, oder die Integration aus (i) und (ii). In letzterem Fall erfolgt diese Integration häufiger in einem mittelfristigen Zeithorizont, wodurch vorwiegend präventive Instandhaltungsstrategien eingesetzt werden (vgl. Abbildung A.6). Entsprechend gering fällt auch der Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen aus, wie in Abbildung A.8 dargestellt ist.⁴⁶ Des Weiteren auffallend ist der geringe Anteil an Fallstudien und Instanziierungen – ein Großteil der Arbeiten dient der Konzipierung von Modellen, die anschließend theoretisch (z.B. in Form einer Simulation) evaluiert werden, wie in Abschnitt A.1.5 in den Kategorien (1), (2) und (8) dargestellt ist. Entsprechend wenige Publikationen thematisieren die eingesetzte Messelektronik (in Kategorie (B) dargestellt) und Datenauswertung (in Kategorie (C) dargestellt). Daraus können die folgenden Forschungsbedarfe abgeleitet werden:

- Es existiert Forschungsbedarf hinsichtlich der integrativen Betrachtung von Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) und PPS in der **anwendungsorientierten Forschung**. Um die Anwendung in den Mittelpunkt zu rücken, sind vor allem Lösungen in Form von Methoden und Instanziierungen anzustreben.
- Inhaltlich gilt es explizit **Zustandsüberwachungssysteme zu thematisieren** und (i) Messung sowie (ii) Datenauswertung zu behandeln.

Adressierung von Forschungsfrage 1: Um die in Abschnitt 1.4.4 vorgestellte Forschungsfrage 1 zu adressieren, können die identifizierten Forschungsbedarfe herangezogen werden:

- Wie lässt sich der aktuelle Stand der Forschung beschreiben?

Dass die Integration der Zustandsinformation innerhalb der Produktionsfeinplanung essentiell ist, zeigen im Speziellen Arbeiten aus dem Bereich der Halbleiterfertigung (u.a. Yugma

⁴⁶Trotz der expliziten Verwendung des Begriffes „Condition Monitoring“ (bzw. seiner Synonyme) in den Literaturrecherchen, wurden rund 70 % der Publikationen in der Kategorie (7) Condition Monitoring der Klasse „kein Condition Monitoring“ zugeordnet (vgl. Abschnitt A.1.5).

et al., 2015; Doleschal und Klemmt, 2015; Kao et al., 2018). Aber auch in anderen Branchen ist die Notwendigkeit der Abbildung einer Zustandsabhängigkeit gegeben (z.B. in der metallverarbeitenden Industrie vgl. Liao et al., 2014) – gegenüber der Halbleiterindustrie besteht in diesem Bereich aber weiterer Forschungsbedarf. Die Methoden lassen sich zwischen den Branchen nicht einfach transferieren, da sich die abzubildenden Zustandsabhängigkeiten deutlich unterscheiden und andere Formen der Datenakquise und -verarbeitung benötigen.

- Welche Forschungslücken bestehen im Hinblick auf die Instanziierung der Ansätze in der Praxis?

Die numerischen Beispiele der analysierten Publikationen beruhen in vielen Fällen auf Simulationen (vgl. u.a. Doleschal und Klemmt, 2015; Kao et al., 2018) und es mangelt an Instanziierungen in der industriellen Praxis, wie Abbildung A.4 unter Beweis stellt und explizit von den Autoren Yugma et al. (2015, S. 204), Doleschal und Klemmt (2015, S. 2961 f.) sowie Kao et al. (2018, S. 458) hervorgehoben wird. Es besteht somit Forschungsbedarf in der anwendungsorientierten Forschung, wobei dem Forschungsparadigma des Konstruktivismus folgend (i) die praktische Anwendbarkeit der Methoden bewiesen, (ii) der praktische Nutzen erhoben und (iii) die Methode zur Integration der Zustandsinformationen explizit thematisiert werden sollte.

- Wie wird der Zustand von Werkzeugen und Maschinen im Kontext der Produktionsfeinplanung modelliert?

Aktuelle, verfügbare Systeme zur Produktionsfeinplanung berücksichtigen die Informationen der Werkzeug- und Maschinenzustände nicht in ausreichender Form (vgl. Jacobs et al., 2009; Yugma et al., 2015; Kao et al., 2018). In vielen Fällen wird der „Zustand“ gar nicht (vgl. Abbildung A.8) oder lediglich modellbasiert berücksichtigt. Um eine qualitativ hochwertige Aussage treffen zu können, ist demnach eine auf konkreten Messungen beruhende (d.h. eine datenbasierte) Berücksichtigung der Zustandsinformation notwendig. In diesem Kontext ist anzumerken, dass der Großteil der analysierten Publikationen theoretischer Natur ist und wenig Bezug zur Praxis hat (vgl. u.a. Doleschal und Klemmt, 2015; Kao et al., 2018).

Abgeleitete Problemstellung: Basierend auf den identifizierten Forschungslücken kann die Problemstellung folgendermaßen spezifiziert werden:

- (1) In vielen Branchen der industriellen Produktion, im Speziellen in der Halbleiterindustrie und der metallverarbeitenden Industrie, bestehen Zusammenhänge zwischen Produktionsprogramm und Maschinenzustand. Es fehlen aber praktisch anwendbare Methoden und Planungswerkzeuge, um die Zustandsabhängigkeiten in der Produktionsplanung und -steuerung berücksichtigen zu können.

- (2) Die Berücksichtigung von Zustandsabhängigkeiten in der Produktionsfeinplanung erzeugt eine Komplexität, die von einem Planer mit derzeit verfügbaren Systemen nicht vollends abgedeckt werden kann. Dadurch entstehen in der Produktionsfeinplanung lediglich suboptimale Lösungen.
- (3) Die in der wissenschaftlichen Fachliteratur veröffentlichten Ansätze sind in vielen Fällen theoretisch und eignen sich nur bedingt für die praktische Anwendung. Zudem wird die tatsächliche Erfassung von (für die Planung nutzbaren) Werkzeug- und Maschinenzuständen vernachlässigt.
- (4) Es fehlen (i) ein dokumentiertes, durchgängiges Modell zur Integration von Zustandsabhängigkeiten in die Produktionsfeinplanung und (ii) Instanziierungen einer den Werkzeug- und Maschinenzustand berücksichtigenden Produktionsfeinplanung in der betrieblichen Praxis (Fallstudien).

4.2 Spezifische Zielsetzung

Um die spezifizierte Problemstellung zu adressieren, ist es das Ziel der vorliegenden Dissertation, ein Phasenmodell zur Entwicklung eines Algorithmus zur Optimierung von Produktionsreihenfolgen unter Einbeziehung von Werkzeug- und Maschinenzuständen zu konstruieren. Somit wird (i) der Forschungsbedarf hinsichtlich einer integrativen Betrachtung von Werkzeug- und Maschinenzuständen und der Produktionsplanung adressiert und (ii) Anwendungsorientierung angestrebt, indem Anwendern eine Vorgehensmethode zur Erstellung einer WMBPRO geboten wird. Wie im Wissenschaftsverständnis des Konstruktivismus vorherrschend, wird somit nicht nur das Ergebnis (der Algorithmus als Instanziierung des Phasenmodells), sondern auch dessen Entwicklungsweg (das Phasenmodell) präsentiert.

Um die beiden offenen Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 1.4.4) zu adressieren, wird in Abschnitt 5 die Entwicklungsmethode (Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO) präsentiert (vgl. Forschungsfrage 2), selbige in Abschnitt 6 im Rahmen von Fallstudien in der Praxis angewendet und der Nutzen quantifiziert (vgl. Forschungsfrage 3).

4.3 Anforderungen an eine werkzeug- und maschinenzustandsbedingte Produktionsreihenfolgeoptimierung

Die spezifische Zielsetzung lässt sich, der Forschungsmethodologie des Design Science folgend (vgl. Abschnitt 1.4.2), in Anforderungen, die eine werkzeug- und maschinenzustandsbedingte Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMBPRO) erfüllen muss, übersetzen. Dazu werden (i) Anforderungen an das Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO abgeleitet und (ii) Anforderung an die aus dem Phasenmodell resultierende WMBPRO definiert. Die Anforderungen leiten sich dabei aus den identifizierten Forschungsbedarfen, sowie der spezifizierten Problemstellung ab (vgl. Abschnitt 4.1).

Anforderungen an das Phasenmodell:

- (1) Das Phasenmodell entwickelt ein Optimierungsmodell, das die Werkzeug- und Maschinenzustände in die Produktionsreihenfolgeoptimierung integriert.

In der Literatur verfügbare Methoden berücksichtigen die Zustandsinformation in der Produktionsplanung nicht in ausreichender Form. Dadurch können Methoden der Optimierung in Bereichen, in denen Zustandsabhängigkeiten zwischen Produkt und Werkzeug bzw. Maschine vorherrschen, nicht eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.2.3). Um diesen Forschungsbedarf zu adressieren, müssen die durch das Phasenmodell entstehenden Optimierungsmodelle (WMBPROs) Zustandsinformationen in die Produktionsreihenfolgebildung integrieren. Das Phasenmodell muss darüber hinaus Lösungen entwickeln, die in der Praxis eingesetzt werden können und nicht nur theoretischer Natur sind.

- (2) Das Phasenmodell liefert eine Funktionalität zur Abbildung von ein- und mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeiten und thematisiert explizit die Auswahl geeigneter CMS.

In der für den Kontext relevanten Literatur wird der Zustand in Form eines Indikators als gegeben betrachtet – wie der Zustand erfasst wird, bleibt ungeklärt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Speziell im anwendungsorientierten Bereich besteht aber die Notwendigkeit den Weg vom physischen Zustand eines Werkzeugs oder einer Maschinenkomponente, bis hin zum in der Produktionsplanung nutzbaren Zustandsindikator (d.h. die Entwicklung eines CMS) abzubilden.

- (3) Das Phasenmodell bildet den Entwicklungsprozess einer WMBPRO ganzheitlich ab und deckt dabei alle notwendigen Phasen bis zum fertigen Optimierungsalgorithmus ab.

Die vorhandene Literatur ist zum Großteil theoretischer Natur (vgl. Abbildung A.4) und jene Publikationen, die eine Instanziierung in der Praxis beschreiben, bleiben in einem spezifischen Untersuchungsbereich. Zur Abbildung der Integration von Werkzeug- und Maschinenzustandsabhängigkeiten in die Produktionsreihenfolgeoptimierung ist ein Phasenmodell notwendig, das

- (a) eine Instanziierung in unterschiedlichen Anwendungsfällen ermöglicht und
- (b) die Teilmethoden in detaillierter Form beschreibt, sodass eine Instanziierung mit geringem Aufwand möglich ist (d.h. es müssen keine neuen Methoden entwickelt werden).

Anforderungen an die WMBPRO:

- (1) Die WMBPRO erstellt automatisch valide Produktionsreihenfolgepläne, die logistische oder produktionstechnische Zielgrößen optimieren.

Ziel der WMBPRO ist die automatische Erstellung von Produktionsreihenfolgeplänen zur Optimierung logistischer (Termin-treue, Auslastung, Bestand, Durchlaufzeit) und produktionstechnischer (Energie- und Ressourceneffizienz) Zielgrößen.

- (2) Die WMBPRO integriert Daten aus (i) der Betriebsdatenerfassung (Werkzeug- und Maschinenzustände) und (ii) ERP bzw. MES Systemen (aktuelle Bestände an den Anlagen).

Um Datenkonsistenz zu gewährleisten und Mehraufwand hinsichtlich Datenaufbereitung und -transport zu vermeiden, ist es notwendig, dass die WMBPRO in die bestehende IT-Infrastruktur integrierbar ist und Medienbrüche zwischen Teilsystemen vermieden werden.

- (3) Die WMBPRO kann in der Form eines Unterstützungswerkzeuges zur Nutzung von Produktionsplanern instrumentalisiert werden.

Für den Einsatz der WMBPRO in der Praxis ist es notwendig, diese in Form eines Unterstützungswerkzeuges mit einer graphischen Benutzeroberfläche zu instrumentalisieren. Dadurch wird eine Oberfläche geschaffen, in der die Planer die WMBPRO anwenden und die Ergebnisse der WMBPRO analysieren können (visualisieren, vergleichen etc.).

5 Phasenmodell zur Entwicklung einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMBPRO)

5.1 Überblicksdarstellung: Phasenmodell

Die Entwicklung einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMBPRO) für einen ausgewählten Produktionsprozess wird an dieser Stelle, dem Paradigma des Konstruktivismus folgend, anhand des Entwicklungsprozesses präsentiert. Der Entwicklungsprozess besteht aus den folgenden vier Hauptphasen und ist in Abbildung 5.1 dargestellt:

- **Phase (1):** Erfassung der Werkzeug- und Maschinenzustände
- **Phase (2):** Modellierung der Zustandsabhängigkeiten
- **Phase (3):** Modellierung des werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierungsproblems
- **Phase (4):** Formulierung des Optimierungsalgorithmus

Die Phasen sind dabei sequentiell voneinander abhängig – die Phasen (1) und (2) liefern die notwendigen Daten zur Modellierung der WMBPRO in Phase (3). In Phase (4) wird aufbauend auf die Modellierung ein geeigneter Optimierungsalgorithmus formuliert. Die Teilmethoden des Entwicklungsprozesses werden, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, sequentiell vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf einer generischen Präsentation der Inhalte. Für die Anwendung der Methode aus einer praxisnahen Perspektive sei auf Abschnitt 6 verwiesen.

Vorraussetzungen: Um das Phasenmodell anwenden zu können, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

- (1) Bei dem Produktionsprozess handelt es sich um einen abgeschlossenen Prozess.
- (2) Der Produktionsprozess weist Zustandsabhängigkeiten zwischen den zu fertigenden Produkten und zumindest einem der Werkzeuge oder Maschinenkomponenten der Produktionsanlage bzw. Produktionsanlagen auf.
- (3) Das zu lösende Optimierungsproblem ist ein Problem der Sequenzierung bzw. Reihenfolgebildung.

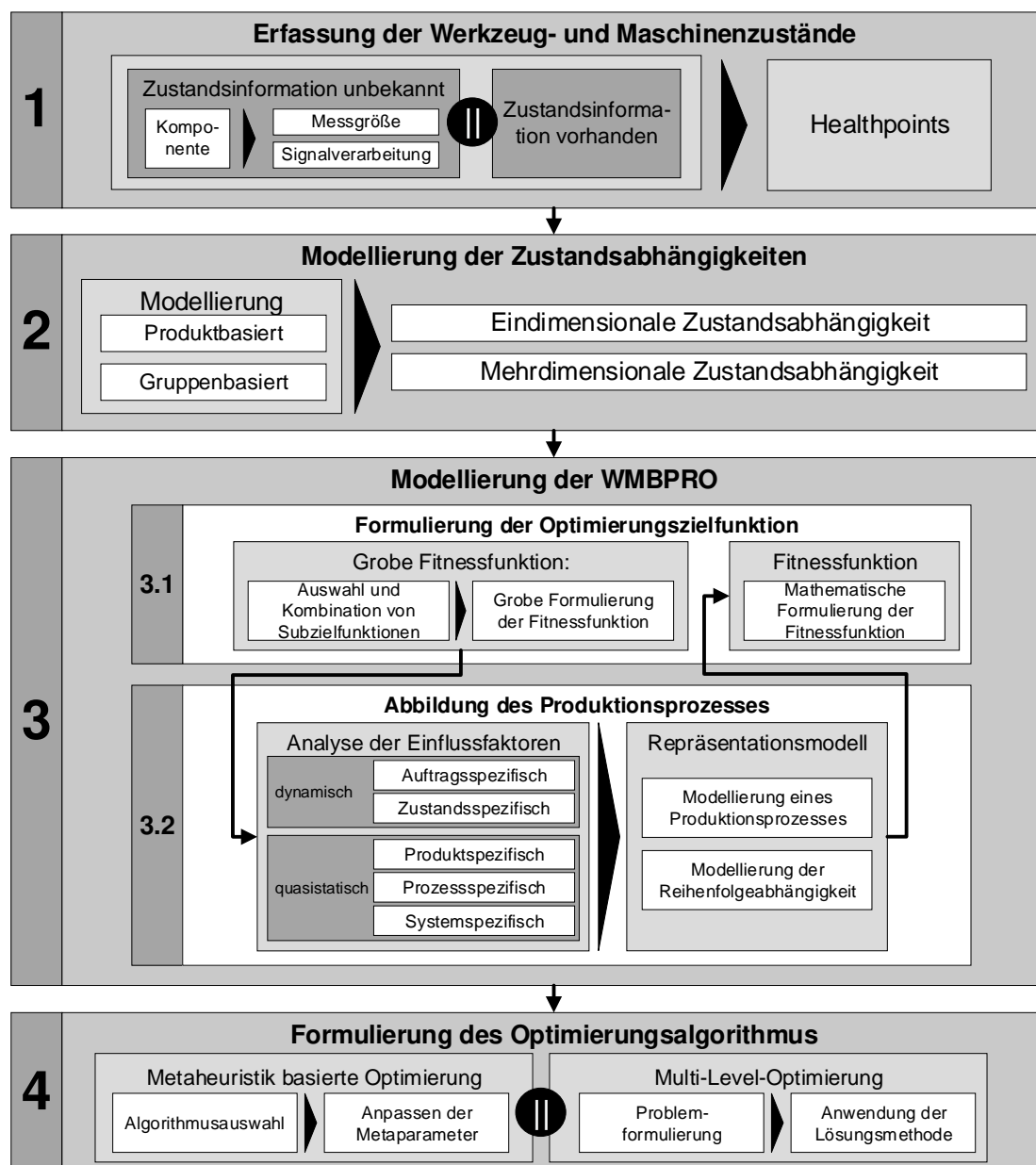


Abbildung 5.1: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO

Das in Abbildung 5.1 dargestellte Phasenmodell wurde in eine Prozessdarstellung überführt (in Form eines Flussdiagramms), die in Abbildung 5.2 dargestellt ist.⁴⁷ Der Hauptprozess beginnt mit der Überprüfung der Voraussetzungen zur Anwendung des Phasenmodells, die im vorliegenden Abschnitt festgeschrieben wird. Sind die Anforderungen erfüllt, folgen die Phasen 1 bis 4. Basierend auf einer Prozessbeschreibung wird in Phase 1 ein Condition Monitoring System ausgewählt (Detaildarstellung in Abbildung 5.3), das zum Bewerten von Werkzeug- und Maschinenzuständen eingesetzt werden kann. Ausgangspunkt für Phase 2 (Detaildarstellung in Abbildung 5.4) bilden historische Messdaten aus dem CMS und dem Produktionsprogramm (aus ERP bzw. MES); durch

⁴⁷Die Legende des Flussdiagramms ist in Abschnitt A.2.1 zu finden.

eine Analyse der Daten erfolgt die Modellierung der Zustandsabhängigkeiten in tabellarischer Form. In Phase 3 (Detaildarstellung in Abbildung 5.5) wird basierend auf einer groben Zielformulierung (i) ein mathematisches Repräsentationsmodell des Produktionsprozesses erstellt und (ii) die Fitnessfunktion festgelegt. Diese Daten werden gemeinsam mit den Zustandsabhängigkeiten in Phase 4 (Detaildarstellung in Abbildung 5.8) zur Formulierung des Optimierungsalgorithmus eingesetzt. Abschließend erfolgt die Integration der entwickelten WMBPRO in die IT-Infrastruktur sowie das Deployment der Lösung.

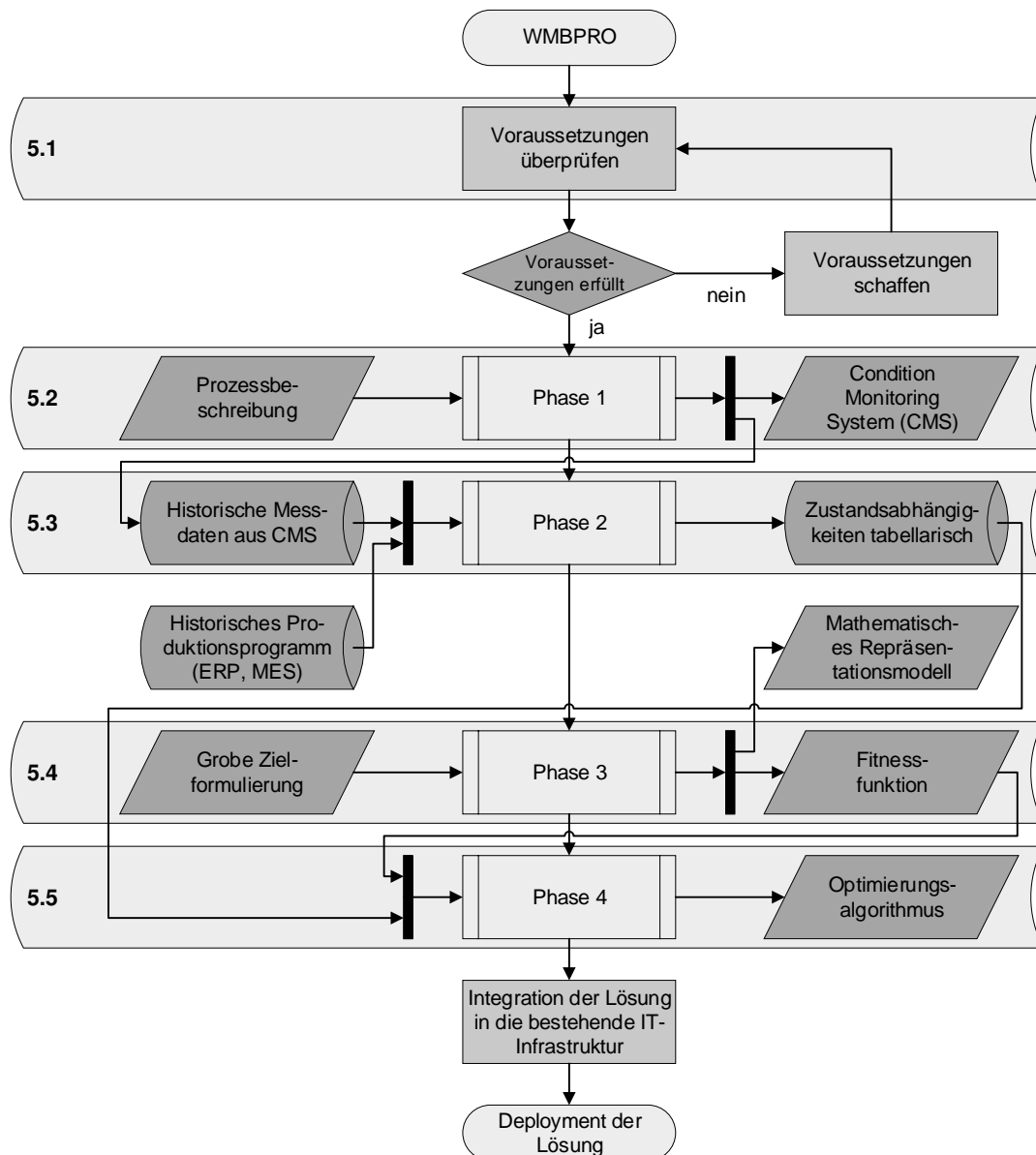


Abbildung 5.2: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm

5.2 Phase 1: Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen

Während in manchen Anwendungsfällen die Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen bereits gelöst ist (Condition Monitoring System, CMS vorhanden \mapsto Zustandsinformation bekannt), so gibt es viele Bereiche, wo Zustände zwar subjektiv eingeschätzt (z.B. von Maschinenisten), aber nicht mit objektiven Systemen gemessen bzw. berechnet werden können (CMS nicht vorhanden \mapsto Zustandsinformation unbekannt). Um Phase 1 erfolgreich abzuschließen, ist folgender Ablauf notwendig (visualisiert in Abbildung 5.3):

(1) Erfassung des Werkzeug- bzw. Maschinenzustandes:

- Ist im betreffenden Anwendungsbeispiel bereits ein CMS vorhanden, so muss sichergestellt werden, dass die Signalerfassung auch tatsächlich in einer den Zustand beschreibenden Spitzenkennzahl resultiert. Ein Zustand kann komplex und schwierig vorstellbar sein (z.B. in der Form eines Frequenzspektrums vorliegend, vgl. z.B. Nandi et al., 2005). Um den Zustand in der Produktionsplanung berücksichtigen zu können, ist es daher zweckmäßig, eine Spitzenkennzahl zur Modellierung der Zustandsabhängigkeit (bzw. eine Reihe an Kennzahlen bei einer mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeit) zu berechnen.
- Ist im betreffenden Anwendungsbeispiel noch kein CMS vorhanden, so wird dieses in Phase 1 konstruiert. Dazu werden, basierend auf einer Prozessbeschreibung, mögliche CMS ausgewählt, wobei Tabelle 5.1 in Abschnitt 5.1 unterstützt. Dabei wird sowohl (i) der physikalische Messaufbau definiert als auch (ii) die Art der Signalverarbeitung festgelegt. Anschließend wird das CMS validiert.
 - Bei erfolgreicher Validierung wird die Zustandsinformation im nächsten Schritt in der Form einer Spitzenkennzahl modelliert, bzw. bei einer mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeit durch eine Reihe an Kennzahlen abgebildet.
 - Ist die Validierung nicht erfolgreich, muss ein alternatives CMS (bzw. ein alternatives Set an Metaparametern) ausgewählt werden.

(2) Skalieren und Speichern des Zustandsindikators:

Ist ein Zustandsindikator gefunden, gilt es diesen zu skalieren (vgl. Abschnitt 5.2.3) und die Bedingungen zur Datensammlung festzulegen. Die erfassten Zustandsinformationen müssen für zukünftige Analysen gesammelt und gespeichert werden. Als alternativer Einstiegspunkt ist zudem der Marker „P2“ eingezeichnet, der durch Phase 2 angestoßen wird (vgl. Abbildung 5.4).

(3) Ergebnis \mapsto Zustandsdatenspeicher:

Um die Zustandsinformationen in zukünftigen Analysen verwenden zu können (z.B. zur Gegenüberstellung mit dem Produktionsprogramm), müssen die Zustände gespeichert werden. Dabei bietet es sich an, eine Datenbank zum Speichern historischer Messdaten zu erstellen.

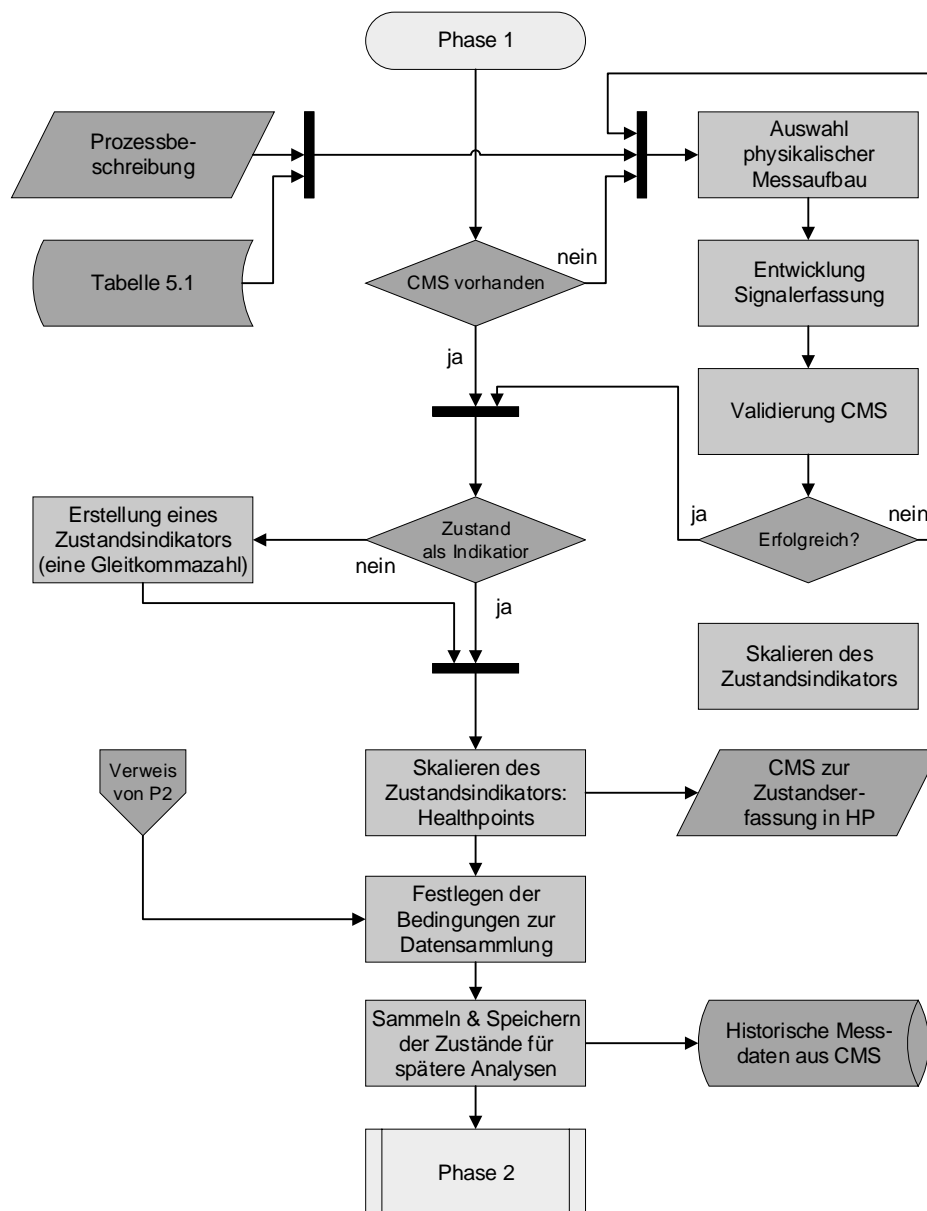


Abbildung 5.3: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 1

Im vorliegenden Abschnitt werden die notwendigen Methoden, um die in Abbildung 5.3 dargestellte Phase 1 des Phasenmodells durchführen zu können, präsentiert. In Abschnitt 5.2.1 werden die Anforderungen an das Condition Monitoring System zur Nutzung im Kontext einer WMBPRO definiert. Existiert für einen gegebenen Anwendungsfall noch kein CMS, das den Anforderungen genügt, wird in Abschnitt 5.2.2 ein Literaturüberblick präsentiert, der bei der anwendungsfall-spezifischen Auswahl eines CMS unterstützt.⁴⁸ Anschließend wird in Abschnitt 5.2.3 der Begriff „Healthpoints“ definiert, der in den darauffolgenden Phasen zur Operationalisierung der Zustandsinformation in der Produktionsplanung genutzt wird.

⁴⁸Für eine allgemeine, theoretische Darstellung des Themas Zustandsüberwachung bzw. „Condition Monitoring“ sei an dieser Stelle auf Abschnitt 2.3 verwiesen.

5.2.1 Anforderungen an das Condition Monitoring System

In der Literatur werden grundsätzlich zwei Arten von Condition Monitoring Systemen unterschieden (Jardine et al., 2006, S. 1491):

- Diagnosesysteme (Finden und Isolieren eines Fehlers nach dem Auftreten) und
- Prognosesysteme (Fehlerprognose vor dem tatsächlichen Fehlerfall).

Im Kontext der Instandhaltung werden Prognosesysteme in den meisten Fällen dazu verwendet, den RUL (Remaining Useful Life) zu ermitteln – jene Zeit, die eine Komponente noch funktionsfähig ist. In Einzelfällen kann der Output von Prognosesystemen auch die Fehler- bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt sein (ibid, 2006, S. 1495). In beiden Fällen bleibt der tatsächliche Zustand der entsprechenden Komponente eine implizite Variable. Im Gegensatz dazu wird im Bereich des TCM (Tool Condition Monitoring) der Zustand häufig expliziert, wobei dieser in Form des Abnutzungsvorrates modelliert wird (vgl. Zhou et al., 2011). Der erfasste Zustand kann dann

- (i) zur Berechnung des RUL verwendet werden, oder
- (ii) in der Produktionssteuerung verwendet werden (z.B. in der zustandsbedingten Produktionsplanung).

Für eine WMBPRO ist ein CMS notwendig, das den Zustand explizit ermittelt.

5.2.2 Auswahl eines Condition Monitoring Systems

Entscheidend für die Konzipierung eines Zustandsüberwachungssystems ist die Auswahl geeigneter Messsysteme: Sensoren müssen jene physikalische Größen erfassen, die sich zum Ableiten eines Zustandsindikators eignen bzw. eine möglichst hohe Korrelation zum Werkzeug- bzw. Maschinenzustand aufweisen. Verschleiß wird in den meisten Fällen von Schwingungen begleitet. Daher finden Schwingungssensoren (z.B. Messung von Beschleunigungen oder akustischen Schwingungen) in Praxis wie auch Wissenschaft eine breite Anwendung (ein verändertes Frequenzspektrum kann z.B. auf einen erhöhten Anlagenverschleiß hindeuten). Neben Schwingungssensoren existiert eine große Bandbreite an Messelektronik, die zur Erfassung von zustandsrelevanten Signalen (u.a. Messung von Kraft, Temperatur, Druck, Drehzahl, Moment etc.) eingesetzt werden kann.⁴⁹ Je nach elektronischem Aufbau der Sensoren, führen Änderungen der Messgröße zu Änderungen von Strom, Spannung oder Ladung, die beispielsweise anhand einer Messbrücken- oder Verstärkerschaltung abgegriffen werden können. Die kontinuierlichen Signale werden im Rahmen ihrer Digitalisierung mit einer definierten Abtastrate diskretisiert (gesampelt). Dadurch entstehen aus den kontinuierlichen Strom- bzw. Spannungssignalen speicher- bzw. analysierbare Daten.⁵⁰ Die Analysen können dabei direkt im Zeitbereich (statistische Analyse der aufgezeichneten

⁴⁹Die mannigfaltigen Möglichkeiten der Messelektronik sind in zahlreichen Büchern dargestellt: z.B. Bernstein (2014); Hering und Schönfelder (2012); Tränkler und Reindl (2015).

⁵⁰Die Messwerte können dabei in Form einer Zeitreihe im lokalen Speicher bzw. in einer Datenbank abgelegt werden.

Zeitreihen) oder im Frequenzbereich (die Transformation erfolgt dabei z.B. mit einer Fast-Fourier-Transformation, FFT) durchgeführt werden, wobei speziell bei hochfrequenten Daten Analysen der Frequenzspektren bevorzugt werden (vgl. Lee et al., 2014). Letztendlich resultieren die Analysen in einem Indikator, der den Zustand einer Maschinenkomponente bzw. eines Werkzeugs beschreibt.

Aufgrund der hohen Anzahl an Publikationen im Bereich „Condition Monitoring“,⁵¹ wird an dieser Stelle auf eine vollständige Literaturrecherche verzichtet. Stattdessen wird eine selektiv-repräsentative Primärliteraturanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 5.1 dargestellt sind. Die Ergebnisse bilden einen kategorischen Überblick über mögliche Anwendungen der Zustandsüberwachung von Werkzeugen und Maschinenkomponenten, wobei je Komponente⁵² repräsentative Publikationen angeführt sind. Ein spezieller Fokus liegt dabei auf der Werkzeugzustandserfassung (engl. Tool Condition Monitoring, TCM), da speziell Werkzeugzustände mit den Zustandsabhängigkeiten von Produkten korrelieren und für eine WMBPRO von besonderer Bedeutung sind.⁵³

Tabelle 5.1: Repräsentativer Primärliteraturüberblick „Condition Monitoring“

Komponente	Quelle	Messgröße	Signalverarbeitung
Bandsäge (Holz)	Saglam (2011)	• Kraft ⁵⁴	• Einsatz von Artificial Neuronal Networks (ANN)
	Zhu et al. (2002)	• Schalldruck ⁵⁵	• Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Energie akustischer Emissionen
Bandsäge (Metall)	Ni et al. (2017)	• Kraft	• Analyse im Zeitbereich
	Thaler et al. (2014)	• Kraft • Schalldruck • Vibrationen ⁵⁶	• Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Discriminant Analysis
Drehmeißel ⁵⁷	Aghdam und Cigeroglu (2016)	• Vibrationen	• Analyse im Zeitbereich • Auto Regressive Moving Average (ARMA)
	Ahmad et al. (2015)	• Vibrationen	• eigene Methode (i-kaz)
	D'Addona et al. (2017a)	• Bildauswertung	• Analyse im Frequenzbereich • Bildauswertung (Einsatz von ANN)
	Dimla und Lister (2000a; 2000b)	• Vibrationen • Kraft	• Einsatz von DNA-based-computing • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Einsatz von ANN (Multi-Layer-Perceptron)

⁵¹Eine Suche nach dem Begriff „Condition Monitoring“ in den Feldern Titel, Kurzfassung und Schlüsselwörter liefert auf dem Portal Scopus ohne weitere Restriktionen 26.240 Treffer (Abfrage am 11.07.2018).

⁵²Komponenten sind in diesem Kontext Maschinenelemente bzw. Werkzeuge.

⁵³Für interessierte Lesende sei die Arbeit von Bhuiyan und Choudhury (2014) empfohlen, die einen anschaulichen Überblick über die Literatur zu TCM bietet.

⁵⁴Zur Messung von Kraft kann ein Dynamometer eingesetzt werden.

⁵⁵Der Schalldruck kann mit diversen Audioaufnehmern bzw. Mikrofonen aufgenommen werden.

⁵⁶Vibrationen werden zumeist in Form von Beschleunigungen mit Schwingungssensoren aufgezeichnet.

⁵⁷Eine Suche nach "Condition Monitoring" AND "Turning" liefert auf Scopus 301 Treffer (Abfrage am 11.07.2018). In der Tabelle ist ein repräsentativer Teil dieser Publikationen dargestellt.

Fortsetzung von Tabelle 5.1

Komponente	Quelle	Messgröße	Signalverarbeitung
	Ratava et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen • Kraft 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Einsatz von ANN (Multi-Layer-Perceptron) • Einsatz von ANN
	Segreto et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen • Kraft • Schalldruck 	
Elektromotor ⁵⁸	Delgado-Arredondo et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen • Schalldruck 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Gegenüberstellung „gesunder“ und fehlerhafter Frequenzspektren
	Irfan et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Strom⁵⁹ • Spannung 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse im Frequenzbereich • Instantaneous Power Analysis
	Ruiz-Cárcel et al. (2016a)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen • Strom • Prozessparameter 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse im Frequenzbereich • Canonical Variate Analysis (CVA)
Fräser ⁶⁰	Ghosh et al. (2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft • Magnetismus⁶¹ • Vibrationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Einsatz von ANN
	Jemielniak und Arrazola (2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Schalldruck • Vibrationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich
	Nouri et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft • Energie (Vorschlag) 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Modellbasiert (Schnittkraftmodell)
	Shao et al. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • Energie 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse im Zeitbereich
	Zhang et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Einsatz von Neuro-Fuzzy-Networks
	Zhou et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Schalldruck • Kraft 	<ul style="list-style-type: none"> • Auto Regressive Moving Average mit exogenen Inputs (ARMAX)
Getriebe ⁶²	Feng et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Abriebpartikelkonzentration 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse der Abriebpartikelkonzentration
	Hu et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen • Abriebpartikelkonzentration 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Averaged Logarithmic Ratio (ALR)
	Peng und Kessissoglou (2003)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen • Abriebpartikelkonzentration 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse der Abriebpartikelkonzentration • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Gegenüberstellung „gesunder“ und fehlerhafter Frequenzspektren

⁵⁸Eine Suche nach "Condition Monitoring" AND ("Electric Engine" OR "Electric Motor" OR "Induction Motor") liefert auf Scopus 1.089 Treffer (Abfrage am 11.07.2018). In der Tabelle ist ein repräsentativer Teil dieser Publikationen dargestellt.

⁵⁹Der Strom wird hierbei indirekt mittels eines Hallsensors gemessen.

⁶⁰Eine Suche nach "Condition Monitoring" AND "Milling" liefert auf Scopus 423 Treffer (Abfrage am 11.07.2018). In der Tabelle ist ein repräsentativer Teil dieser Publikationen dargestellt.

⁶¹Messung erfolgt mittels eines Hallsensors.

⁶²Eine Suche nach "Condition Monitoring" AND "Gear" liefert auf Scopus 1.180 Treffer (Abfrage am 11.07.2018). In der Tabelle ist ein repräsentativer Teil dieser Publikationen dargestellt.

Fortsetzung von Tabelle 5.1

Komponente	Quelle	Messgröße	Signalverarbeitung
Gleitflächen	Baccar und Söffker (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Schalldruck 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse im Frequenzbereich • Energie akustischer Emissionen
Linearachse	Schmidt et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Schalldruck • Drehmoment • Geschwindigkeit • Prozessparameter 	<ul style="list-style-type: none"> • Je nach Signal: Analyse in Zeit- und / oder Frequenzbereich • Ball-bar measurement (BBM)
	Vogl et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen • Winkelmesser • Gyroskop 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse im Zeitbereich (Veränderung der Genauigkeiten)
Schraubverbindung	Zhang et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Winkelmesser • Kraftmessung 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeitbereich
Wälzlager ⁶³	Ali et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Einsatz von ANN
	Chacon et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Schalldruck 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse im Frequenzbereich • Energie akustischer Emissionen
	Dalvand et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Spannungsmessung • Vibrationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Analyse der Instantaneous Frequency of Motor Voltage (IFMV)
	Prieto et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von ANN
	Shanmukha Priya et al. (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse im Frequenzbereich
Wang et al. (2016b)	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrationen • Temperaturmessung 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse in Zeit- und Frequenzbereich • Spectral Kurtosis 	

Wie in Tabelle 5.1 ersichtlich, sind, um ein Condition Monitoring System zu definieren und die Werkzeug- und Maschinenzustände erfassen zu können, (i) die Auswahl der geeigneten Messelektronik und (ii) die Auswahl einer geeigneten Signalverarbeitungsmethode notwendig. In vielen Fällen dienen Analysen von Schwingungsdaten (Vibrationen, Beschleunigungen und Schalldruck) im Zeit- und im Frequenzbereich zur Zustandsüberwachung.⁶⁴ In Summe verwenden 24 der insgesamt 31 analysierten Publikationen eine Form der Vibrationsanalyse als Teil der Zustandsüberwachung, 11 davon verwenden ausschließlich Schwingungsdaten. Dabei ist auffallend, dass diese Methoden speziell bei Komponenten, die rotatorisch bewegt werden, Einsatz finden und sich gleichermaßen für Werkzeugzustandsüberwachung, wie auch zur Zustandsüberwachung anderer Maschinenelemente, eignen. Die Autoren Delgado-Arredondo et al. (2017), zum Beispiel, präsentieren eine Methode zur Fehlererkennung in Elektromotoren basierend auf Schwingungsanalysen (Kombination aus Beschleunigungs- und Schallanalyse). Die Autoren erfassen den Zustand anhand einer Gegenüberstellung des jeweiligen Frequenzspektrums mit dem eines „gesunden“

⁶³Eine Suche nach "Condition Monitoring" AND "Bearing" liefert auf Scopus 2.657 Treffer (Abfrage am 11.07.2018). In der Tabelle ist ein repräsentativer Teil dieser Publikationen dargestellt.

⁶⁴Auch die Autoren Jardine et al. (2006, S. 1487) heben hervor, dass die meist verwendeten Zeitreihendaten in CM Vibrationen sind. Vgl. auch Abschnitt A.1.5 der systematischen Literaturanalyse.

Spektrums. Elektromotoren stehen in vielen Publikationen im Fokus des Condition Monitoring (u.a. Irfan et al., 2017; Ruiz-Cárcel et al., 2016a), da sie eine Maschinenkomponente darstellen, die in den meisten Produktionsanlagen Anwendung findet. Entwicklungen von Motorenzustandsüberwachungssystemen sind somit in vielen Bereichen einsetzbar. Die Motorstromsignaturanalyse (engl. Motor-Current-Signature-Analysis, MCSA), ist beispielsweise eine Form der Zustandsüberwachung, die es ermöglicht, Fehler in Rotor, Stator und in den Lagerungen zu erkennen, wobei die Stromsignale vorwiegend im Frequenzbereich analysiert werden (vgl. Nandi et al., 2005). Neben der Analyse der Frequenzspektren, die speziell im Bereich der MCSA, aber auch bei der Vibrationsanalyse dominieren (insgesamt 21 der 31 Publikationen), verwenden 9 Publikationen Verfahren des maschinellen Lernens, um die Korrelation zwischen Messwerten und Zuständen zu modellieren. Dass maschinelles Lernen im Bereich Condition Monitoring erfolgreich eingesetzt werden kann, haben die Autoren Dimla und Lister (2000a; 2000b) schon im Jahr 2000 bewiesen. In ihren Publikationen präsentieren sie ein Zustandsüberwachungssystem für Drehmeißel, dessen Auswertesoftware auf einem Multilayer-Perzeptron basiert.

Anhand des Literaturüberblicks erschließt sich die Vielseitigkeit des Themas „Condition Monitoring“. Die konkrete Auswahl von (i) Messelektronik und (ii) Signalverarbeitungsmethode ist dabei divers und kann nicht in generischer Form dargestellt werden. Um für einen Anwendungsfall (i) und (ii) auszuwählen, stellt Tabelle 5.1 eine erste Hilfestellung dar. Dabei können Analogien zu den vorgestellten Best-Practice Beispielen zur anwendungsfallspezifischen Auswahl von CM Systemen genutzt werden.

Anwendung der Tabelle: Wird in der Praxis eine Komponente definiert, deren Zustand erfasst werden soll, so liefert die Tabelle einen Einblick in mögliche Lösungsansätze, die innerhalb praktischer Anwendungen bereits erfolgreich getestet wurden. Die konkrete Auswahl von Sensorik und Analyseverfahren bleibt aber anwendungsfallabhängig. Wird beispielsweise ein CMS entwickelt, das mittels Vibrationsmessung den Zustand eines Elektromotors erfassen soll, so ist die Sensorauswahl von der gewünschten Samplingrate abhängig. Die Samplingrate selbst hängt von den Betriebsbedingungen des Elektromotors ab und sollte ein Vielfaches der Eigenfrequenzen sein, um auch höherfrequente Schwingungsanteile⁶⁵ analysieren zu können. Um die notwendige Samplingrate zu definieren, empfiehlt sich eine Voranalyse mit einem hochfrequenten Sensor, um den zu analysierenden Frequenzbereich identifizieren zu können.

5.2.3 Modellierung des Zustandes: Healthpoints

Zur Beschreibung eines Zustandes werden in der Literatur unterschiedliche Begriffe verwendet. Neben dem englischsprachigen Begriff „Condition“ wird auch häufig von Maschinengesundheit gesprochen, wie die Forschungsströmung „Prognostics and Health Management“ unter Beweis stellt (vgl. Lee et al., 2014). So greifen, zum Beispiel, die Autoren Yugma et al. (2015) und Kao

⁶⁵Dabei ist das Nyquist-Shannon Theorem zu beachten, das besagt, dass die Samplingrate mindestens $2 \cdot f$ betragen muss, um ein Signal mit der maximalen Frequenz f fehlerfrei rekonstruieren zu können.

et al. (2018) den Gesundheitsbegriff auf und sprechen in ihren Publikationen vom „*Equipment Health Indicator*“ (EHI). Eine ähnliche Form verwenden mit „*Health Parameter*“ die Autoren Doleschal und Klemmt (2015). Einen anschaulichen Überblick hinsichtlich der Modellierung der „Health Indicators“ bietet die Arbeit von Gouriveau et al. (2016, S. 33-67).

In der vorliegenden Dissertation wird zur Vereinfachung des komplexen Terms „Zustand“ der in der Literatur verbreitete Gesundheitsbegriff aufgegriffen und die Bezeichnung Lebenspunkte bzw. „*Healthpoints*“ (HP) eingeführt. Die Bezeichnung ist dabei inspiriert vom Paradigma der Gamification, die die Einbindung von videospieldbasierten Elementen in eine nichtspielerische Umgebung propagiert (vgl. Deterding et al., 2011). Durch die Verwendung von Lebenspunkten wird die Erklärung und Kommunikation des Zustandes vereinfacht, da der Begriff intuitiv verständlich wird. In Games dienen HP der Beschreibung des aktuellen Zustandes eines Avatars – sind die Lebenspunkte hoch, ist der Avatar in einer guten Konstitution, sind sie hingegen niedrig, wird der Zustand kritisch. HP reduzieren sich dabei durch bestimmte Tätigkeiten, wie zum Beispiel durch Belastungen wie Bewegung oder Kämpfe. Demgegenüber können Lebenspunkte aber auch wieder erhöht werden (z.B. durch die Einnahme von Tränken). Übertragen auf den Kontext der industriellen Produktion bedeutet dies, dass ein Werkzeug oder eine Maschinenkomponente zu Beginn eine bestimmte, maximale Anzahl an Lebenspunkten hat. Durch den fortlaufenden Produktionsprozess, der eine Reihe an Belastungen darstellt, reduzieren sich die HP. Eine Analogie in Videospiele (im Speziellen bei Rollenspielen) ist dabei das Ausführen eines Auftrages (einer Quest). Belastungen, wie beispielsweise Kämpfe innerhalb eines Auftrages führen zu einer Reduktion der Lebenspunkte – erreichen selbige einen kritischen Punkt (d.h. der Avatar verliert all seine Lebenspunkte), so endet die Quest und der Spieler muss von vorne beginnen. Dies lässt sich auch auf den Produktionskontext übertragen. Hierbei ist die Quest ein Produktionsauftrag, der aus mehreren Produkten und Bearbeitungsschritten⁶⁶ besteht, die jeweils einzelne Belastungen darstellen und die HP fortlaufend reduzieren. Ist ein kritischer Zustand (Mindestzustand) erreicht und wird dennoch weiterproduziert, kann es zu einer Fehlproduktion führen. Ist ein Ausbessern der Fehlproduktion durch Nacharbeit nicht mehr möglich, so entsteht Ausschuss – auch in diesem Fall muss, analog zum Videospiel, die „Quest“ von vorne begonnen werden. Um die Lebenspunkte im Rollenspiel wieder zu erhöhen, können Tränke eingenommen werden – so kann der Spieler auch schwierige Quests abschließen. Übertragen auf den Produktionskontext kann die Einnahme eines Trankes mit einer Instandhaltungsmaßnahme gleichgesetzt werden. Ist ein kritischer Werkzeug- oder Maschinenzustand erreicht, so können die Lebenspunkte der Komponente durch Instandhaltung wieder erhöht werden.⁶⁷

Die Skalierung der Healthpoints kann dabei beliebig erfolgen, wobei eine Skalierung zwischen 1 und 0, oder einem ganzzahligen Vielfachen davon (z.B. 100 HP bis 0 HP) die Verständlichkeit des Zustandes erhöht. Die Herausforderung liegt dabei in der Konvertierung der Messergebnisse aus dem Condition Monitoring System in diese Form der Skalierung, da, wie eingangs erwähnt, der Zustand multidimensional sein kann (z.B. ein Frequenzspektrum). Wie die Konvertierung durch-

⁶⁶Das können, zum Beispiel, mehrere Schnittvorgänge an einem Produkt sein.

⁶⁷Wird eine Komponente ausgetauscht, so ist das in den meisten Fällen mit einem Rücksetzen auf den bestmöglichen Zustand (maximale HP) gleichzusetzen.

geführt werden soll, hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Häufig ist eine iterative Anpassung der Konvertierung in enger Kooperation mit Prozessexperten und Maschinisten notwendig. Ist die Konvertierung abgeschlossen, ist es jedoch möglich (i) den Zustand in Form von Healthpoints gegenüber Prozesskundigen zu kommunizieren und (ii) den Zustand innerhalb der Produktionsoptimierung (z.B. zustandsbasierte Randbedingungen in der Produktionsreihenfolgeoptimierung) mitzuberechnen.

5.2.4 Ergebnisse

Nach Durchführung von Phase 1 des Phasenmodells zur Entwicklung einer WMBPRO (Abbildung 5.1) liegen die folgenden Ergebnisse vor:

- (i) **System zur Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen:** Der Zustand, der von Condition Monitoring Systemen (CMS) erfasst wird, bildet den Ausgangspunkt für eine WMBPRO. Unter Anwendung der in Abschnitt 5.2.2 präsentierten Hilfestellung erfolgt die Auswahl eines geeigneten CMS, bestehend aus physischem Sensorsystem und Signalverarbeitungslogik.
- (ii) **Darstellung des Zustandes in Form von Healthpoints:** Um Zustandsabhängigkeiten in der Produktionsplanung modellieren zu können, erfolgt die Beschreibung der Zustände in Form von Healthpoints, wie in Abschnitt 5.2.3 dargestellt.
- (iii) **Zustandsdatenspeicher:** Um die Zustandsinformationen in zukünftigen Analysen verwenden zu können, wird ein Zustandsdatenspeicher erstellt, der historische Messdaten aus dem CMS aufzeichnet.

5.3 Phase 2: Modellierung von Zustandsabhängigkeiten

Basierend auf der Definition der Healthpoints (vgl. Abschnitt 5.2.3) ist an dieser Stelle die Abbildung der Zustandsabhängigkeiten möglich. Die Klassifizierung der Zustandsabhängigkeiten kann dabei, wie im Abbildung 5.4 dargestellten Prozess, eindimensional oder mehrdimensional erfolgen.

- (1) Die Klassifizierung einer eindimensionalen Zustandsabhängigkeit stellt den einfachsten Fall dar und beschreibt den Zusammenhang einer oder mehrerer Produkteigenschaften mit einem einzelnen Werkzeug- bzw. Maschinenzustand. (Abschnitt 5.3.1)
- (2) Die Klassifizierung einer mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeit beschreibt den Zusammenhang zwischen einer Vielzahl an Produkteigenschaften und mehreren unterschiedlichen Werkzeug- bzw. Maschinenzuständen an einem Produktionsprozess. (Abschnitt 5.3.2)

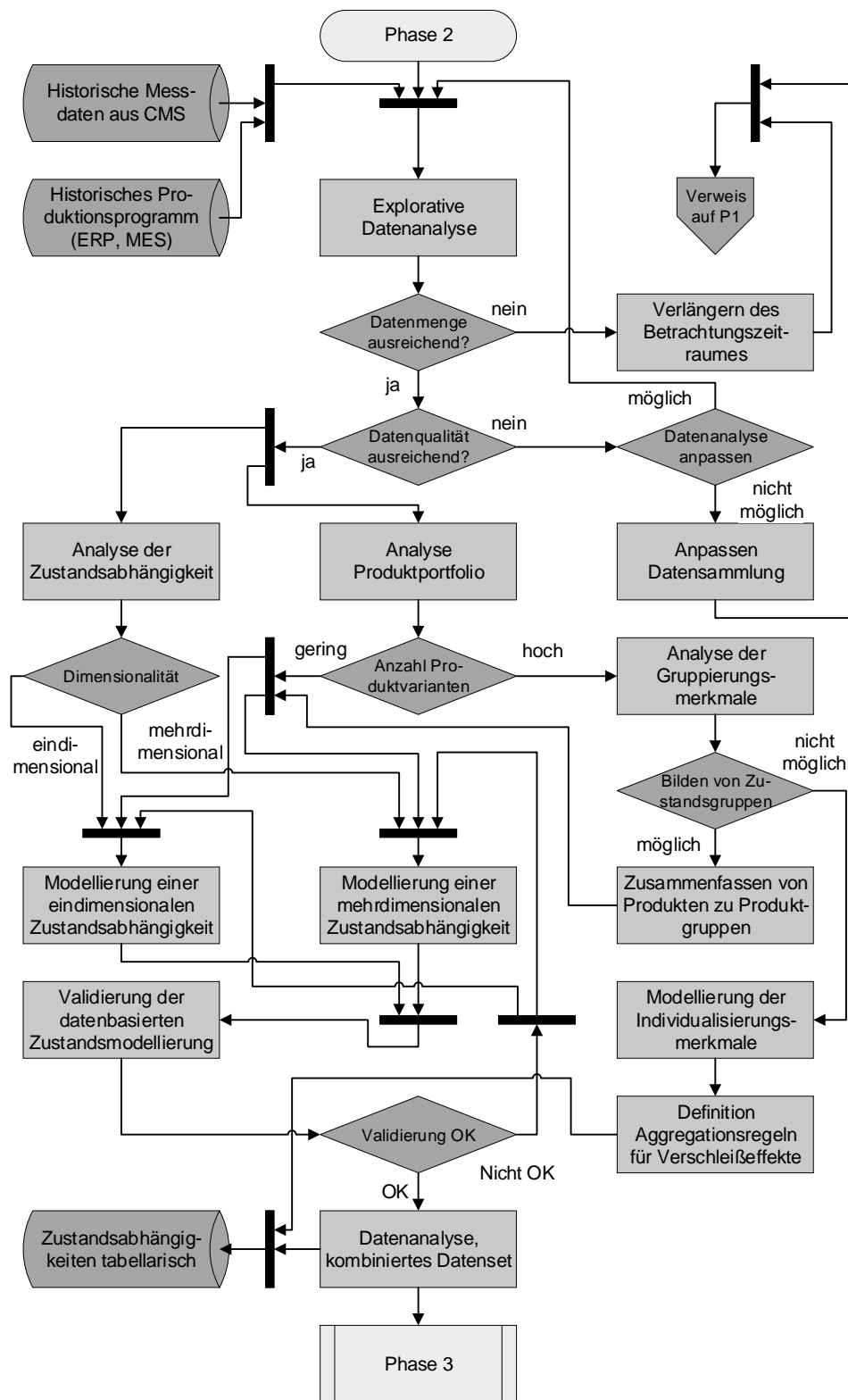


Abbildung 5.4: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 2

Die Modellierung der Zustandsabhängigkeiten folgt dem in Abbildung 5.4 dargestellten Prozess:

(1) **Explorative Datenanalyse:**

- Basierend auf historischen Datenaufnahmen (vgl. Zustandsdatenspeicher, Phase 1) wird eine explorative Datenanalyse durchgeführt. So kann der Zustand den einzelnen Produkten bzw. Produktgruppen gegenübergestellt werden. Dabei sind die folgenden Leitfragen je Produkt bzw. Produktgruppe P zu beantworten:
 - Welche Zustände waren vorherrschend als P bearbeitet wurde?
 - Was sind die minimalen und maximalen Zustände bei denen P bearbeitet wurde?
 - Wie hat die Produktion von P den Werkzeug- bzw. Maschinenzustand verändert?
- Diese Leitfragen sollten statistisch signifikant beantwortet werden können. Ist dies nicht der Fall, ist der Betrachtungszeitraum entsprechend zu verlängern.
- Ist die Datenqualität zur Beantwortung der Leitfragen unzureichend, so kann entweder (i) die Datenanalyse (z.B. Zusammenfassen von Produkten zu Produktgruppen) oder (ii) die Datensammlung angepasst werden. Ein Anpassen der Datensammlung führt zu einem Verweis auf Phase 1 (siehe Abbildung 5.3).

(2) **Analyse Produktportfolio:**

Zentrale Fragestellung ist die Anzahl an Produktvarianten: Ist die Anzahl an Produktvarianten gering, kann eine konventionelle Modellierung der Zustandsabhängigkeiten erfolgen. Andernfalls bestehen zwei Möglichkeiten:

- (a) Bilden von Produktgruppen: Zusammenfassen von Produkten mit ähnlichen Zustandsabhängigkeiten zu Zustandsgruppen
- (b) Modellierung der Zustandsabhängigkeiten durch ihre Individualisierungsmerkmale

(3) **Analyse und Modellierung der Zustandsabhängigkeiten:**

- Bei einer konventionellen Modellierung werden (i) eine eindimensionale Zustandsabhängigkeit (dargestellt in Abschnitt 5.3.1) und (ii) eine mehrdimensionale Zustandsabhängigkeit (dargestellt in Abschnitt 5.3.2) unterschieden.
- Werden die Zustandsabhängigkeiten aufgrund einer hohen Anzahl an Produktvarianten und nicht möglicher Gruppenbildung anhand ihrer Individualisierungsmerkmale modelliert, so werden die Zustandsabhängigkeiten merkmalsbasiert abgebildet (vgl. Abschnitt 5.3.2).
- Ist die Art der Modellierung geklärt, können die Zustandsabhängigkeiten und Verschleißeffekte basierend auf der explorativen Datenanalyse datenbasiert abgeleitet werden:
 - **Mindestzustand:** Der geringste Zustand, bei dem Produkt P gefertigt wurde. Kommen einige Ausreißer vor, kann auch mit den unteren Quantilen gearbeitet werden.

- **Maximalzustand:** Der höchste Zustand, bei dem Produkt P gefertigt wurde. Kommen einige Ausreißer vor, kann auch mit den oberen Quantilen gearbeitet werden.
 - **Verschleißeffekt:** Die Zustandsdifferenz, die durch die Fertigung von einem Produkt P entsteht.
- Die datenbasierte Modellierung der Zustandsabhängigkeiten sollte in einem Validierungsschritt gemeinsam mit den Produkt- und Prozessexperten plausibilisiert werden.

(4) **Ergebnis** \mapsto **modellierte Zustandsabhängigkeiten:**

Das Ergebnis von Phase 2 ist eine tabellarische Darstellung der Zustandsabhängigkeiten (Mindest- und Maximalzustände) und der Verschleißeffekte.

5.3.1 Modellierung einer eindimensionalen Zustandsabhängigkeit

Im einfachsten Fall wird davon ausgegangen, dass für jedes Produkt bzw. für jede Produktgruppe nur eine Werkzeug- bzw. Maschinenzustandsabhängigkeit an der modellierten Anlage besteht. Dabei lässt sich die Zustandsabhängigkeit eines Produktes P_i durch die folgenden Variablen beschreiben: Mindestzustand $HP_{min}(P_i)$, Maximalzustand $HP_{max}(P_i)$ und Verschleißeffekt $\Delta HP(P_i)$. So lässt sich ein produktionsprogrammabhängiger Verschleiß modellieren, wie ihn die Autoren Zhai und Reinhart (2018) als essentiell für die integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung sehen.

Tabelle 5.2: Zustandsklassifizierung im eindimensionalen Fall

Produkt bzw. Produktgruppe	HP_{min}	HP_{max}	ΔHP
P_1	$HP_{min}(P_1)$	$HP_{max}(P_1)$	$\Delta HP(P_1)$
...
P_n	$HP_{min}(P_n)$	$HP_{max}(P_n)$	$\Delta HP(P_n)$

Liegt der aktuelle Zustand des Produktionsmittels unter dem Mindestzustand $HP < HP_{min}(P_i)$, kann eine fehlerfreie Produktion nicht mehr garantiert werden und es müssen Maßnahmen getroffen werden (Instandsetzung, Änderung der Produktionsreihenfolge), um die HP des Werkzeugs bzw. der Maschine wieder auf ein zulässiges Niveau anzuheben. Liegt der aktuelle Zustand über dem Maximalzustand $HP > HP_{max}(P_i)$, so sind andere Produkte vorzuziehen, die einen höheren HP bedürfen, ehe das betroffene Produkt gefertigt werden darf.⁶⁸

$$HP_{min} \leq HP \leq HP_{max} \quad (5.1)$$

Ist eine Produktion möglich (d.h. Ungleichung 5.1 ist erfüllt), so entspricht $\Delta HP(P_i) \cdot n$ der erwarteten Abnahme des Zustandes durch die Produktion von n Einheiten von P_i und es gilt folgender Zusammenhang:

⁶⁸Wie in Abschnitt 5.4 ersichtlich ist, kann durch die Modellierung aneinandergrenzender Zustandsintervalle die Problemkomplexität deutlich reduziert werden. Ist die Modellierung eines Maximalzustandes in einem konkreten Anwendungsfall nicht möglich, so wird dieser auf den Maximalwert des Zustandes gesetzt und somit nicht berücksichtigt.

$$HP(t_{i+1}) = HP(t_i) - \Delta HP(P_i) \cdot n \quad (5.2)$$

Ist eine konkrete Produktionsreihenfolge bekannt, kann mit Gleichung 5.2 der reihenfolgeabhängige Werkzeug- bzw. Maschinenzustandsverlauf ermittelt werden.

Eine Zustandsklassifizierung für eine Anlage besteht aus einer Struktur, wie in Tabelle 5.2 dargestellt. Im Rahmen der Zustandsklassifizierung werden für jedes Produkt bzw. für jede Produktgruppe (P_1 bis P_n), das an der modellierten Anlage produziert werden kann, die Variablen HP_{min} , HP_{max} und ΔHP abgeleitet. Der Mindestzustand (HP_{min}) und der Maximalzustand (HP_{max}) lassen sich in den meisten Fällen direkt aus den Produkteigenschaften, Qualitätsanforderungen oder Kundenanforderungen ableiten. Zur besseren Verständlichkeit ein kurzes Beispiel:

- *Produkt P_1 stellt ein High-End Produkt dar und bringt höchste Qualitätsanforderungen mit sich. Um die spätere Funktionalität zu gewährleisten, ist eine sehr gute Schnittqualität erforderlich, die ihrerseits eine Werkzeugzustandsabhängigkeit aufweist. Das Schneidmittel muss in einem sehr guten Zustand sein, um die gewünschte Schnittqualität erreichen zu können. Somit ist der Mindestzustand von Produkt $HP_{min}(P_1)$ entsprechend hoch. Für ein anderes Produkt P_2 im Produktportfolio ist der Schneidmittelzustand weniger relevant und entsprechend niedriger ist der Mindestzustand $HP_{min}(P_2)$. Um den Mindestzustand ableiten zu können, muss die Produkthanforderung (im Beispiel die Schnittqualität) mit dem Maschinenzustand korreliert werden. Der Mindestzustand stellt somit eine auf die Größe HP normierte Produkthanforderung dar.⁶⁹ Aufgrund eines erhöhten Verschleißeffektes $\Delta HP(P_2)$ von Produkt P_2 soll es erst an einem bereits zum Teil verschlissenen Schneidmittel bearbeitet werden. Das wird durch den Maximalzustand ($HP_{max}(P_2) < HP_{max}(P_1)$) modelliert.*

Die produktspezifischen Verschleißeffekte ΔHP beschreiben die Anzahl an HP , die die modellierte Maschinenkomponente oder das modellierte Werkzeug durch die Produktion eines Produktes verliert.⁷⁰ Zur Bestimmung von ΔHP können historische Messwerte eines Condition Monitoring Systems (vgl. Abschnitt 5.1) herangezogen werden. Der Eintrag in der Klassifizierungsmatrix entsteht dabei aus einer statistischen Aggregation⁷¹ der historischen Messwerte. Welche Art der Aggregation herangezogen wird, ist dabei abhängig vom Anwendungsfall, wobei in den meisten Fällen die Verwendung von Mittelwert oder Median hinreichend ist.

⁶⁹Diese Normierung kann nicht generisch beschrieben werden, kann aber in den meisten Anwendungsfällen von den jeweiligen Prozessexperten intuitiv auf Basis von Erfahrungswissen gebildet werden (vgl. Abschnitt 6). Ist kein Erfahrungswissen bezüglich dieser Normierung vorhanden, muss auf Messungen (z.B. aus einem Condition Monitoring System) zurückgegriffen werden und der Mindestzustand historienbasiert abgeleitet werden.

⁷⁰Theoretisch ist auch die Zunahme der HP durch die Produktion möglich. Das ist dann der Fall, wenn beispielsweise der über die HP dargestellte Zustand einem Reinheitsgrad entspricht und die Produktion eine reinigende Wirkung auf das modellierte Produktionsmittel hat.

⁷¹Dabei können Mittelwert, Median, Maximalwert, Minimalwert oder auch Kombinationen aus selbigen verwendet werden.

5.3.2 Modellierung einer mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeit

Neben dem einfachen Fall der eindimensionalen Zustandsabhängigkeit ist im Allgemeinen eine mehrdimensionale Zustandsabhängigkeit vorhanden.⁷² Dabei werden unterschieden:

- (i) Klassifizierung anhand einer mehrdimensionalen Zustandsklassifizierungsmatrix⁷³
- (ii) Durchführung einer Produktkategorisierung anhand von Individualisierungsmerkmalen⁷⁴

Klassifizierung anhand einer mehrdimensionalen Zustandsklassifizierungsmatrix: Erweitert man die in Abschnitt 5.3.1 dargestellte Zustandsklassifizierungsmatrix (Tabelle 5.2) auf mehrere Dimensionen, so entsteht eine mehrdimensionale Zustandsklassifizierungsmatrix (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Zustandsklassifizierung im mehrdimensionalen Fall

Produkt bzw. Produktgruppe	...	$HP_{min:i}$	$HP_{max:i}$	ΔHP_i	...
P_1	...	$HP_{min:i}(P_1)$	$HP_{max:i}(P_1)$	$\Delta HP_i(P_1)$...
...
P_n	...	$HP_{min:i}(P_n)$	$HP_{max:i}(P_n)$	$\Delta HP_i(P_n)$...

Je Produkt bzw. Produktkategorie existieren m Kombinationen aus Mindestzustand $HP_{min:i}$, Maximalzustand $HP_{max:i}$ und Verschleißeffekt ΔHP_i (m entspricht der Anzahl an abzubildenden Korrelationen zwischen Produkteigenschaften und Werkzeug- bzw. Maschinenzustand der jeweiligen Anlage).

Unter Berücksichtigung des skizzierten Megatrends (vgl. Abschnitt 1.1) der Produktindividualisierung ($n \rightarrow \infty$) wird ersichtlich, dass die Zustandsklassifizierungsmatrix schnell an Komplexität zunimmt. Gleichzeitig sinkt mit $n \rightarrow \infty$ die Anzahl an Messpunkten, die für die Berechnungen der Verschleißeffekte $\Delta HP_j(P_i)$ vorhanden sind.⁷⁵

Die einfachste Möglichkeit der steigenden Komplexität zu entgegnen, ist es, wie in Tabellen 5.2 und 5.3 bereits skizziert, Produkte mit ähnlichen Zustandsabhängigkeiten zusammenzufassen und daraus Produktgruppen zu bilden. Sind die Produkte in ihren Zustandsabhängigkeiten zu unterschiedlich, können die Produkte anhand ihrer Individualisierungsmerkmale kategorisiert werden, wie im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Durchführung einer Produktkategorisierung anhand von Individualisierungsmerkmalen:⁷⁶

Steigende Produktindividualisierung führt zu einer erhöhten Anzahl an Produktvarianten, wobei

⁷²Das ist dann der Fall wenn ein Produkt vom Zustand mehrerer Komponenten abhängig ist. Bei einer CNC Maschine könnten dies, zum Beispiel, die Zustände verschiedener benötigter Werkzeuge sein.

⁷³Dargestellt ab Seite 68.

⁷⁴Dargestellt ab Seite 68.

⁷⁵Ein weiterer Kritikpunkt ist die Generalität der Zustandsklassifizierungsmatrix: Kommen neue Produkte zum Portfolio hinzu, müssen diese nachmodelliert werden. Da für Neuprodukte im Normalfall keine historischen Messungen vorhanden sind, müssen zunächst Daten über das Zustandsüberwachungssystem generiert werden, ehe eine Bewertung der jeweiligen Verschleißeffekte $\Delta HP_j(P_i)$ möglich wird.

⁷⁶Die Inhalte dieses Abschnittes stammen aus Karner und Sihn (2018).

der Trend in Richtung Losgröße 1 geht (vgl. Lödning et al., 2017, S. 299). Ist es bei einem überschaubaren Produktportfolio noch möglich, Restriktionen von Produkten explizit zu modellieren, so ist dies bei steigender Produktvielfalt wirtschaftlich nicht mehr möglich. Betrachtet man die Restriktion „Zustandsabhängigkeit“, so bezieht sich diese im Wesentlichen nicht direkt auf das Produkt selbst, sondern auf spezielle Charakteristika des Produktes. Ein Produkt kann als eine Summe an Charakteristika (Farbe, Toleranz, Funktionalitäten etc.) aufgefasst werden. Eine hohe Variantenvielfalt entsteht erst durch die Kombination der unterschiedlichen Charakteristika. Hierzu ein kurzes hypothetisches Beispiel mit dem Produkt „Fennglas“:

Das Fennglas weist die Individualisierungsmerkmale Augenabstand, Farbe, Optik und Ummantelung auf. Während das erste Merkmal ein vollständig individualisierbares Merkmal darstellt, so gibt es für Farbe, Optik und Oberfläche jeweils eine finite Menge an vordefinierten, diskreten Kategorien. Die Farbe gibt es in X , die Optik in Y und die Oberfläche in Z Kategorien. Aus den diskreten Kategorien entstehen somit $X \cdot Y \cdot Z$ Variantenmöglichkeiten. Für den Augenabstand (vom Kunden individuell parametrierbar) kann lediglich eine „realistische“ Eingrenzung getroffen werden. So kann dieser im Allgemeinen nicht beliebig variieren, sondern liegt in jedem Fall innerhalb eines vordefinierten Intervalls. Dieses Intervall muss in (aus produktionstechnischer Sicht) relevante Subintervalle⁷⁷ eingeteilt werden, woraus eine finite Anzahl an Kategorien K entsteht. Die Gesamtzahl an Möglichkeiten ergibt sich in Folge dessen aus einer Multiplikation der diskreten Kategorien und den Subintervallen zu $X \cdot Y \cdot Z \cdot K$. In Summe entsteht zwar eine hohe Anzahl an Variantenmöglichkeiten, die Anzahl an Möglichkeiten innerhalb der Kategorien bleibt aber in den meisten Fällen überschaubar: Geht man von derselben Anzahl an Möglichkeiten je Kategorie von j aus, so entstehen in Summe j^4 Variantenmöglichkeiten, die von nur $4 \cdot j$ Kategorien dargestellt werden können.⁷⁸ Fertigungstechnische Restriktionen müssen dabei nicht für alle j^4 Möglichkeiten, sondern lediglich für $4 \cdot j$ Kategorien abgebildet werden.⁷⁹

Anhand des Beispiels wird klar, wie aus einer scheinbar unbegrenzten Anzahl an Variantenmöglichkeiten, eine überschaubare Anzahl an fertigungstechnischen Restriktionen abgeleitet werden kann. Im Falle kontinuierlicher Charakteristika (wie im Beispiel der Augenabstand), ist das Bilden von sinnvollen Subintervallen notwendig. Alternativ dazu ist das Ableiten eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Restriktion und Parameter denkbar, wodurch die Einträge in den Tabellen (5.2 bzw. 5.3) durch Funktionen ersetzt werden können. Die in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Möglichkeiten der Modellierung der Zustandsabhängigkeiten (ein- bzw. mehrdimensional) erfolgen dabei nicht für jedes Produkt (im Beispiel j^4 Mal), sondern für jede Kategorie (im Beispiel $4 \cdot j$ Mal). Dabei bildet die erste Spalte (vgl. Tabellen 5.2 und 5.3) nicht das Pro-

⁷⁷Die Subintervalle werden dabei, zum Beispiel, durch Fertigungsrandbedingungen festgelegt. Maschine A kann nur im Bereich a bis b arbeiten, Maschine B im Bereich a bis c etc.

⁷⁸Zum Beispiel erhält man für $j = 10$ eine Menge von 10.000 Variantenmöglichkeiten, die sich mit lediglich 40 Kategorien darstellen lassen.

⁷⁹Voraussetzung dafür ist, dass die Merkmale voneinander unabhängig sind. Sind zwei Merkmale voneinander abhängig, muss entweder (i) ihr funktioneller Zusammenhang modelliert werden, oder es müssen (ii) alle Kombinationen der beiden abhängigen Merkmale berücksichtigt werden, was zu einer erhöhten Kategorienanzahl führt (Im Beispiel mit 4 Kategorien und $j = 10$ ergeben sich $2 \cdot j + j^2 = 120$ Kategorien).

dukt, sondern die jeweilige Produktkategorie. Für ein konkretes Produkt sind somit mehrere Zustandsabhängigkeiten relevant – eine Zustandsabhängigkeit je Kategorie (im Beispiel wären das 4 Zustandsabhängigkeiten). Um für jedes Produkt eindeutige Zustandsabhängigkeiten $HP_{min}(P_i)$, $HP_{max}(P_i)$ und $\Delta HP(P_i)$ zu erhalten, ist somit eine Rekonstruktionsmethode notwendig. Für die Restriktionen (Mindest- und Maximalzustand) ist dies noch intuitiv möglich, indem die Maxima bzw. Minima der Zustandsabhängigkeiten ausgewählt werden.⁸⁰ Zur Veranschaulichung sei ein kurzes Beispiel angeführt:

Es liegt eine eindimensionale Zustandsabhängigkeit an der betroffenen Anlage (eine CNC-Maschine) vor und das Produkt P_1 (wie im zuvor dargestellten Beispiel ein Fernglas) lässt sich durch 4 Kategorien beschreiben. Augenabstand und Farbe sind unabhängig vom Zustand der Schneide und weisen daher an der beschriebenen Anlage einen Mindestzustand von jeweils 0 auf. Die Oberfläche hingegen wurde in der feinsten Rauheitsstufe gewählt, wodurch das Schneidewerkzeug noch einen guten Zustand aufweisen muss ($HP_{min:Schneide} = 6$). Je nach ausgewählter Optik sind zum anschließenden Fügen verschiedene Toleranzstufen notwendig, die jeweils vom Werkzeugzustand abhängen. Die ausgewählte Optik hat hohe Anforderungen an die Toleranz und entsprechend hoch sind die Anforderungen an den Zustand der Schneide ($HP_{min:Schneide} = 8$). An dieser Stelle zählt die kritischere Dimension (der Maximalwert der Mindestzustände) woraus folgt ($HP_{min:Schneide} = 8$).⁸¹

Die Rekonstruktion des Produktverschleißes basierend auf Produktkategorien ist weniger trivial. Eine Möglichkeit stellt auch in diesem Fall die Auswahl des jeweiligen Maximalwertes in analoger Form zur Identifikation des Mindestzustandes dar. Im Allgemeinen hängt die Rekonstruktion der produktspezifischen Verschleißeffekte $\Delta HP_j(P_i)$ von der anwendungsfallsspezifischen Konstruktion aus den historischen Messwerten ab. Sind beispielsweise in den Verschleißeffekten ΔHP_j jeweils Teilverschleißeffekte abgebildet, so ist als Aggregationsmethode eine Summierung der Teilverschleißeffekte zu verwenden. Dazu ist es jedoch notwendig die Teilverschleißeffekte unabhängig voneinander zu erfassen, was herausfordernd sein kann.

5.3.3 Ergebnisse

Nach Durchführung von Phase 2 des Phasenmodells zur Entwicklung einer WMBPRO (Abbildung 5.1), liegen die folgenden Ergebnisse vor:

- (i) **Modellierte Zustandsabhängigkeiten:** Die Zustandsabhängigkeiten, welche die Produkte und ihre Bearbeitungsmaschinen aufweisen, werden modelliert und tabellarisch (vgl. Tabelle 5.2 und 5.3) dargestellt. Die Zustandsabhängigkeiten setzen sich zusammen aus:
 - **Mindestzustände:** Jene Zustände, die eine Bearbeitungsmaschine mindestens aufweisen muss, sodass die Produktion eines Produktes möglich ist.

⁸⁰ $HP_{min}(P_i) = \max(HP_{min:1}, HP_{min:2}, HP_{min:3}, HP_{min:4})$ bzw.

$HP_{max}(P_i) = \min(HP_{max:1}, HP_{max:2}, HP_{max:3}, HP_{max:4})$

⁸¹ Wird dieser höhere Mindestzustand erfüllt $HP_{min:Schneide} \geq 8$, so ist in jedem Fall auch die weniger kritische Bedingung $HP_{min:Schneide} \geq 6$ erfüllt.

- **Maximalzustände:** Jene Zustände, die eine Bearbeitungsmaschine maximal aufweisen darf, sodass die Produktion eines Produktes möglich ist.
- **Verschleißeffekte:** Die Produktion von Produkten führt zu Verschleiß von Werkzeugen bzw. Maschinenkomponenten an den Bearbeitungsmaschinen. Mit der Metrik „Verschleißeffekt“ wird der produktspezifische Verschleiß modelliert.

5.4 Phase 3: Modellierung der WMBPRO

5.4.1 Formulierung des Optimierungsproblems

Das dem WMBPRO zu Grunde liegende Optimierungsproblem lässt sich folgendermaßen formulieren:

Im zu beplanenden Auftragspool sind n Aufträge vorhanden, deren Abarbeitungsreihenfolge durch deren Position im Reihenfolgevektor \vec{x} dargestellt wird. Die einzelnen Einträge in \vec{x} sind dabei eindeutig. Permutationen von \vec{x} stellen jeweils alternative Produktionsreihenfolgen dar.⁸² Jede Permutation des Reihenfolgevektors \vec{x}_i hat, sofern sie den Nebenbedingungen genügt, einen Zielfunktionswert F_i . Ziel ist es eine Abarbeitungsreihenfolge \vec{x}^* zu finden, sodass (i) alle Nebenbedingungen, insbesondere die notwendigen Mindest- und Maximalzustände, erfüllt sind und (ii) die Optimierungszielfunktion F_i^* (vgl. Abschnitt 5.4.2) möglichst optimal wird.

Zur Veranschaulichung des Optimierungsproblems sei ein kurzes Beispiel dargelegt:

In der Instanziierung hat der Reihenfolgevektor \vec{x} die Länge drei und es gibt keine Nebenbedingungen. Eine mögliche Permutation ist $\vec{x}_1 = (A_1, A_2, A_3)^T$. Dabei wird Auftrag A_1 als erstes, A_2 als zweites und A_3 als drittes gefertigt. Eine andere Permutation wäre $\vec{x}_2 = (A_2, A_1, A_3)^T$, wobei Auftrag A_2 als erstes, A_1 als zweites und A_3 als drittes gefertigt werden würde.⁸³ Jede Permutation von \vec{x}_i weist einen Zielfunktionswert F_i auf. Die Zielfunktionswerte werden im Vektor $\vec{F} = (F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6)^T$ gesammelt. Nach der Berechnung aller Zielfunktionswerte kann der optimale Zielfunktionswert ausgewählt werden (je nach Problemtyp der minimale oder maximale Zielfunktionswert). Der korrespondierende Reihenfolgevektor \vec{x}_i entspricht der Optimallösung.

Im Beispiel ist das Enumerieren aller möglichen Lösungen \vec{x}_i aufgrund der überschaubaren Problemgröße noch möglich (es gibt $3! = 6$ Lösungen). Mit zunehmender Problemgröße (steigendem n) nimmt die Anzahl an Lösungen stark zu (vgl. Tabelle 2.1) und es können nicht mehr alle Lösungsmöglichkeiten enumeriert werden. Wie Probleme mit großem n in der Praxis gelöst werden können, wird in Abschnitt 5.5 thematisiert.

⁸²Da der Vektor eine Länge n aufweist, gibt es $n!$ mögliche Permutationen von \vec{x} . Die Enumerierung aller Permutationen stellt somit ein NP-hartes Problem dar.

⁸³Da \vec{x} die Länge 3 hat, gibt es $3! = 6$ mögliche Permutationen.

5.4.2 Formulierung der Optimierungszielfunktion

Entscheidender Bestandteil jedes Optimierungsproblems ist eine objektive Zielfunktion (oft auch als Fitnessfunktion bezeichnet),⁸⁴ die maximiert (Auslastung, Produktivität etc.) oder minimiert (Kosten, Energiebedarf, Durchlaufzeit etc.) werden soll, wobei sich die Optimierungsergebnisse, wie in Gleichungen 5.3 und 5.4 dargestellt, ergeben. Wie die Fitnessfunktion $F()$ dabei aufgebaut ist, hängt vom jeweiligen Problem ab. In den einfachsten Fällen ist die variable Größe eindimensional und die Fitnessfunktion ist stetig-differenzierbar. Solche Optimierungsprobleme sind mit Methoden der Kurvendiskussion lösbar. Die variable Größe kann aber auch mehrdimensional⁸⁵ und die Fitnessfunktion nicht differenzierbar (z.B. abgebildet in Form eines Simulationsmodells) sein. In diesen Fällen bietet der Forschungsbereich der Operations Research zahlreiche Methoden zur Lösung der Optimierungsprobleme.⁸⁶

$$\max(F(x)) \rightarrow x^* = \operatorname{argmax}(F(\vec{x})) \quad (5.3)$$

$$\min(F(x)) \rightarrow x^* = \operatorname{argmin}(F(x)) \quad (5.4)$$

mit

$F()$...	Fitnessfunktion
x	...	variable Größe
x^*	...	Optimallösung

Die Formulierung einer Fitnessfunktion ist ein weitreichendes Forschungsthema und es existieren zahlreiche Ansätze, wie eine Fitnessfunktion für einen bestimmten Anwendungsfall ausgewählt werden kann. Die Autoren Baresel et al. (2002) widmen sich in ihrer Arbeit beispielsweise der Formulierung und Anpassung von Fitnessfunktionen im Kontext evolutionärer Optimierungsalgorithmen. Mit der Formulierung von Fitnessfunktionen im Kontext genetischer Optimierung setzten sich auch Wright und Farmani (2001) auseinander. Einen anschaulichen Überblick, speziell im Bezug auf genetische Optimierung, bietet Michalewicz (2013) in seinem renommierten Buch zur evolutionären Programmierung.

Ein kurzer Einblick in das Thema zeigt, dass die bestehenden Methoden zur Formulierung von Fitnessfunktionen aus dem Bereich des Operations Research stammen, einen stark mathematischen Charakter aufweisen und sich in vielen Fällen auf konkrete Algorithmen und theoretische Beispiele beziehen. Demgegenüber soll das Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO eine Methode bieten, die bei der Formulierung der Fitnessfunktion unterstützt und dabei auf die praktische Anwendbarkeit fokussiert. Aus diesen Gründen wird im Folgenden eine Möglichkeiten zur

⁸⁴Es gibt auch Probleme mit mehreren Zielfunktionen die beispielsweise mittels einer Pareto-Optimierung gelöst werden können (vgl. Konak et al., 2006).

⁸⁵Bei mehrdimensionalen Optimierungsproblemen kann die variable Größe durch Vektoren oder Matrizen dargestellt werden.

⁸⁶Ein kurzer theoretischer Einblick in das Thema wird in Abschnitt 2.2 präsentiert.

Auswahl und Formulierung der Fitnessfunktion im Kontext der Produktionsreihenfolgeplanung anhand einer schrittweisen Vorgehensweise präsentiert.

Prozess zur Formulierung der Fitnessfunktion im Kontext der WMBPRO: Im Falle der Produktionsreihenfolgeoptimierung ist die variable Größe der Reihenfolgevektor \vec{x} und es muss $F = f(\vec{x})$ gelten. Die Abhängigkeiten bestehen, im Allgemeinen, in sequentieller Form – welche Auswirkungen ein Auftrag A_i auf die Fitnessfunktion hat, ist vom vorgelagerten Auftrag A_{i-1} abhängig. Zur Abbildung dieses Verhaltens muss die Fitnessfunktion sequentiell (von $i = 1$ bis $i = n$) berechnet werden. Dabei ist es zielführend, zunächst ein mathematisches Repräsentationsmodell des Produktionssystems zu entwerfen und daraus die endgültige Formulierung der Fitnessfunktion abzuleiten. Um das Produktionssystem in geeigneter Weise zu modellieren, sollte eine grobe Formulierung der Zielfunktion bereits erfolgt sein. Die detaillierte Ausformulierung kann dann, dem Top-Down-Prinzip folgend, durchgeführt werden. Der Prozess zur Erstellung und Ausformulierung der Fitnessfunktion erfolgt dabei, wie in Abbildung 5.5 dargestellt, folgendermaßen:

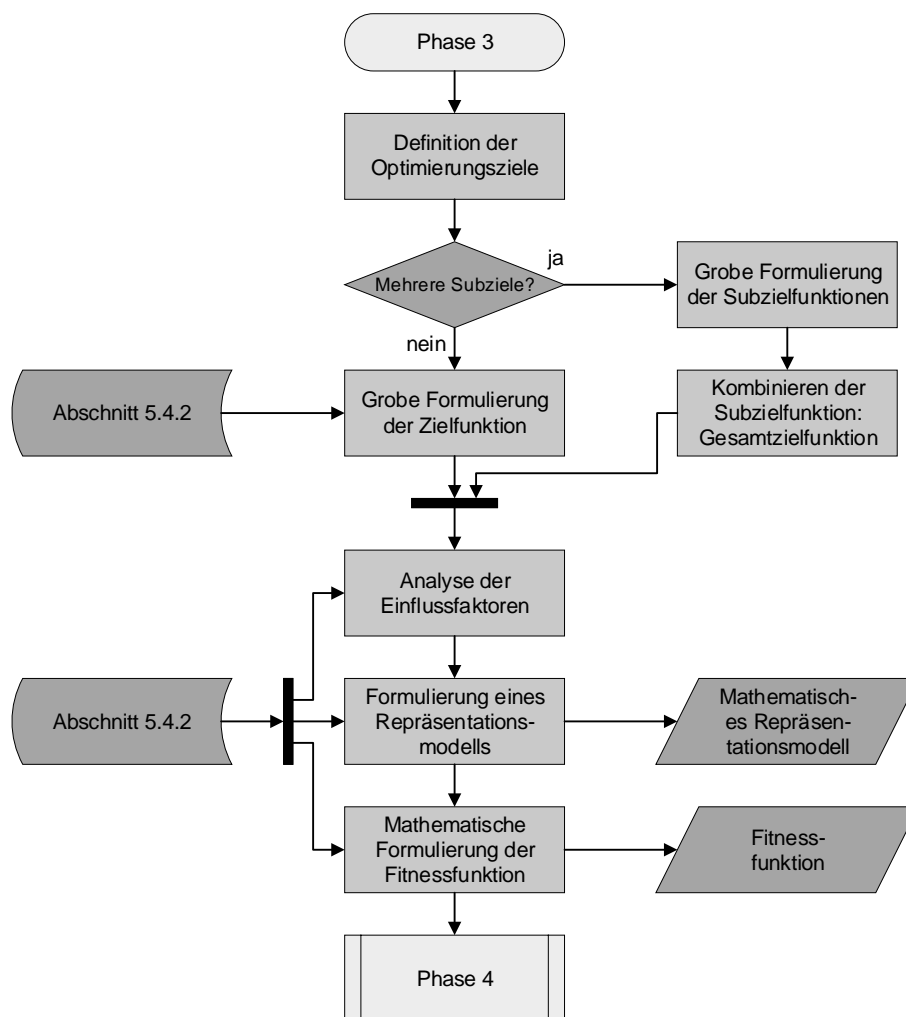


Abbildung 5.5: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 3

- (1) **Definition der Optimierungsziele:** Was ist das Ziel der Optimierung?
- (2) **Grobe Formulierung der Zielfunktion:** Welche logistischen und/oder produktionstechnischen Zielgrößen sollen optimiert werden? Dabei werden (i) einfache und (ii) multikriterielle Zielfunktionen unterschieden. Bei (ii) gilt es, die Subzielfunktionen durch eine geeignete Integration zu kombinieren.
- (3) **Analyse der Einflussfaktoren:** Welche Faktoren beeinflussen die Zielgrößen?
- (4) **Formulierung eines Repräsentationsmodells:** Wie hängen die Einflussfaktoren zusammen und wie werden sie durch die variable Größe beeinflusst?
- (5) **Ergebnis** \mapsto **Fitnessfunktion:** Mathematische Formulierung der Zielfunktion, $\vec{x} \rightarrow f(\vec{x}) \rightarrow F$

Definition der Optimierungsziele und grobe Formulierung der Zielfunktion: Wie die Fitnessfunktion in einem konkreten Anwendungsfall formuliert wird, ist dabei von der jeweiligen Aufgabenstellung der Instanziierung abhängig und kann von logistischen Zielgrößen, über produktionstechnische Effizienzfaktoren bis hin zu multikriteriellen Zusammenhänge reichen. Betrachtet man die Literatur im Kontext der Produktionsplanung und -steuerung, so werden als Planungsziele vorwiegend die logistischen Zielgrößen verwendet (vgl. z.B. Schuh und Stich, 2012a, S. 313):

- Auslastung
- Bestand
- Durchlaufzeit
- Termintreue

Dabei ist zu beachten, dass die Zielgrößen zum Teil in Konflikt zueinander stehen. Sind, zum Beispiel, die Bestände vor einer Anlage sehr gering, kann es zu Stillständen kommen (Sinken der Auslastung, da die Materialversorgung unterbrochen wird). Das Festlegen auf eine der Zielgrößen kann somit zur Verschlechterung anderer logistischer Zielgrößen führen. Betrachtet man die Literatur, so dominieren im Scheduling laut Abedinnia et al. (2017, S. 287) strafbasierte (Verspätung, Pönale, 43 %), durchlaufzeitbasierte (32 %) sowie kostenbasierte Ziele (15 %) (vgl. auch Abschnitt 2.2). Einen geringeren Anteil weisen multikriterielle Zielfunktionen (10 %) auf. Der Einsatz einer multikriteriellen Zielfunktion kann, beispielsweise durch eine gewichtete Addition von Subzielfunktionen (z.B. virtuellen Kostenfunktionen) erfolgen (vgl. Tabelle 5.4), wobei dies durch eine Kombination realer Kosten (z.B. Kapitalbindungskosten) und virtueller Kosten (z.B. Opportunitätskosten für Terminverzug⁸⁷) ermöglicht wird. Eine weitere Möglichkeit der multikriteriellen Optimierung basiert auf der Pareto-Optimierung (vgl. Konak et al., 2006, S. 992; Abschnitt 2.2).

⁸⁷Die Termintreue spielt in der mittelfristigen Grobplanung eine zentrale Rolle wogegen sie in der kurzfristigen Feinplanung zum Teil nicht als expliziter Teil der Fitnessfunktion verwendet wird. Stattdessen wird die Termintreue häufig implizit über harte Nebenbedingungen modelliert.

Tabelle 5.4: Möglichkeiten zur Formulierung einer kostenbasierten Fitnessfunktion

logistische Zielgröße	Kosten
Auslastung	• Leerlaufkosten (z.B. Maschinenstundensätze)
Bestand	• Kapitalbindungskosten • Lagerkosten
Durchlaufzeit	• Opportunitätskosten
Termintreue	• Pönalekosten • Opportunitätskosten (z.B. virtuelle Terminverzugskosten)

Alternativ zu logistischen Größen, kann je nach Anwendungsfall auch die Betrachtung von produktionstechnischen Zielgrößen, wie beispielsweise der Energie- oder Ressourceneffizienz, für die Fitnessfunktion relevant sein. Sollen derartige Zielgrößen mit logistischen Zielgrößen kombiniert werden, eignet sich eine Kostenbewertung zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit.⁸⁸ Neben einer Kostenbewertung der logistischen und produktionstechnischen Zielgrößen, kann die Fitnessfunktion noch um zusätzliche Subzielfunktionen, wie beispielsweise der Rüstkosten, ergänzt werden.

Zur Kombination der Subzielfunktionen kann eine gewichtete Addition verwendet werden. Durch die Gewichtung wird die zukünftige Parametrierbarkeit der Zielfunktion gewährleistet.⁸⁹ Die Zielfunktion (Gesamtkostenfunktion K) ergibt sich dann aus der Summe der gewichteten Subzielfunktionen S_i (vgl. Gleichung 5.5). Um ein Maximierungsproblem (in der Kommunikation ist es intuitiver von einer „Maximierung der Fitness“ zu sprechen) zu generieren, wird aus der negierten Kostenfunktion die Fitnessfunktion F erstellt (vgl. Gleichung 5.6).

$$K(\vec{x}) = \sum_i w_i \cdot S_i(\vec{x}) \quad (5.5)$$

$$F(\vec{x}) = -K(\vec{x}) \quad (5.6)$$

5.4.3 Abbildung des Produktionsprozesses

Die an dieser Stelle vorgestellte Abbildung des Produktionsprozesses bezieht sich auf die Ausformulierung der Fitnessfunktion, dargestellt in Gleichung 5.6 unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.4.2 (vgl. Abbildung 5.5) formulierten Vorgehensweise zur Auswahl und Formulierung der Fitnessfunktion im Kontext der WMBPRO.

Die Modellierung von Produktionsprozessen aus Perspektive der PPS ist in erster Linie abhängig von der Fitnessfunktion und den Nebenbedingungen. Die Fitnessfunktion bestimmt die Granularität, die in der Modellierung notwendig ist – ist das Ziel, zum Beispiel, eine Optimierung der

⁸⁸Die Kostensätze sind dabei im jeweiligen Anwendungsfall abzuleiten.

⁸⁹Im Zeitverlauf des Einsatzes der WMBPRO können sich die Prioritäten der Optimierung ändern. Um zukünftige Anpassungen an der Zielfunktionen durchzuführen (ohne das mathematische Repräsentationsmodell neu zu formulieren), können somit lediglich die Gewichtungsfaktoren angepasst werden.

Auslastung und es bestehen reihenfolgeabhängige Rüstzeiten, so ist es notwendig, diese im Modell abzubilden (z.B. in Form einer Rüstmatrix). Aber auch die Nebenbedingungen haben Einfluss auf die Modellbildung. Um Termine als harte Nebenbedingungen abbilden zu können, müssen die Bearbeitungszeiten in der Modellierung berücksichtigt werden.⁹⁰ Im Falle einer WMBPRO muss des Weiteren sichergestellt werden, dass zum Produktionszeitpunkt die Kriterien hinsichtlich der notwendigen Zustände (Mindest- und Maximalzustände) erfüllt sind.⁹¹

Im vorliegenden Abschnitt wird dazu zunächst über notwendige Einflussfaktoren (zur Modellierung einer WMBPRO) reflektiert und anschließend auf die Art der Modellierung eingegangen.

Analyse der Einflussfaktoren: Grundsätzlich können dynamische und quasistatische Einflussfaktoren unterschieden werden. Während sich die dynamischen Einflussfaktoren durch den Produktionsprozess ändern, bleiben die quasistatischen Einflussfaktoren während des Betrachtungszeitraumes konstant.⁹² Tabelle 5.5 bietet einen Überblick über mögliche Einflussfaktoren. Dabei werden innerhalb der dynamischen Kategorie auftrags- und zustandsspezifische Einflussfaktoren und innerhalb der quasistatischen Kategorien produkt-, prozess- und systemspezifische Einflussfaktoren unterschieden.⁹³

Tabelle 5.5: Einteilung der Einflussfaktoren

dynamisch		quasistatisch		
Auftrag	Zustand	Produkt	Prozess	System
Stückzahl	Maschinenzustand	HP_{min}, HP_{max}	Rüstzeitmatrix	Transportzeitmatrix
Gewicht	OEE	ΔHP	Schichtmodell	
Dimensionen	Bestand	Bearbeitungszeiten		
Termin	Kapazität			
Priorität	Mitarbeiter			
Folgeprozess	Subzielfunktionswert			
...

Der Modellierung aus Phase 2 (vgl. Abschnitt 5.3) folgend, reduziert sich beispielsweise der Werkzeug- bzw. Maschinenzustand einer Anlage durch die Produktion (abgebildet mit Gleichung 5.2), wobei der Verschleiß im Normalfall produktabhängig ist. Basisdaten, wie Bearbeitungs- und Transportzeiten, liegen in einer während des Betrachtungszeitraumes statischen Form vor.

Formulierung des Repräsentationsmodells und der Fitnessfunktion: Das Ziel eines Repräsentationsmodells ist es, die definierten Einflussfaktoren und die Fitnessfunktion in Zusammen-

⁹⁰Nur so kann der Zeitverlauf im Produktionsreihenfolgeplan abgebildet und zur Überprüfung der Terminrestriktionen verwendet werden.

⁹¹Wie diese Nebenbedingungen formuliert werden, ist in Phase 2 des Phasenmodells (vgl. Abschnitt 5.3) beschrieben.

⁹²Die Formulierung quasistatisch wurde gewählt, um anzudeuten, dass sich diese Parameter außerhalb des Betrachtungszeitraumes ändern können.

⁹³Die Tabelle beinhaltet Einflussfaktoren, die im Rahmen von Praxisprojekten (vgl. Abschnitt 6) beobachtet werden können. Es gibt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit: die Tabelle soll den Anwendern einen praxisnahen Zugang zur Auswahl und Definition von produktionsprozessspezifischen Einflussfaktoren bieten.

hang zu bringen und dabei die Überprüfung der Nebenbedingungen zu ermöglichen. Das Repräsentationsmodell muss dabei die folgenden Fragen beantworten:

- (i) Wie beeinflusst der aktuelle Zustand (organisatorisch und physisch) die Produktion eines Auftrages?
- (ii) Wie ändert sich der Zustand (organisatorisch und physisch) durch die Produktion eines Auftrages?

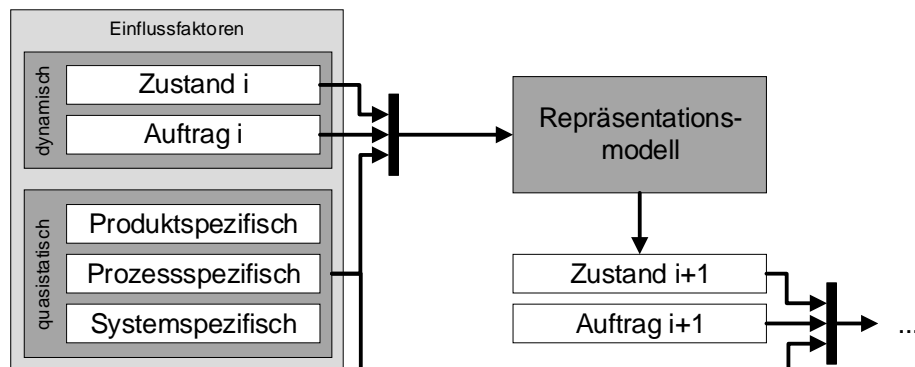


Abbildung 5.6: Funktionale Darstellung Repräsentationsmodell

Das Repräsentationsmodell kann dabei, wie in Abbildung 5.6 dargestellt, als Funktion betrachtet werden, die die Einflussfaktoren (dynamisch und quasistatisch) als Input erhält und daraus einen aktualisierten (organisatorischen und physischen) Zustand berechnet. Dabei weisen die dynamischen Einflussfaktoren eine sequentielle Abhängigkeit auf (vgl. Abbildung 5.7). Ein initialer (organisatorischer und physischer) Zustand Z_{i-1} bildet den Ausgangspunkt für Auftrag A_i . Durch das Ausführen von Auftrag A_i (das Anwenden des Repräsentationsmodells auf Auftrag A_i im Zustand Z_{i-1}) ändert sich der Zustand von Z_{i-1} zu Z_i . Letzterer Zustand bildet wiederum den Ausgangszustand für Auftrag A_{i+1} .

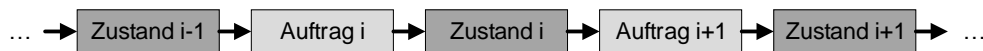


Abbildung 5.7: Darstellung einer sequentiellen Abhängigkeit der Fitnessfunktion

Zur Veranschaulichung der sequentiellen Zusammenhänge sei ein einfaches Beispiel dargestellt:

Der Startzeitpunkt eines Produktionsplanes sei Z_0 und die Aufträge sind in Form des Reihenfolgevektors $\vec{x} = (A_1, A_2, A_3)^T$ mit den Dauern (D_1, D_2, D_3) dargestellt. Wendet man nun die zuvor dargestellte sequentielle Betrachtungsweise zur Berechnung der Zwischenzustände (in diesem Fall der Zeitpunkte) an, so ergibt sich $Z_E = Z_3$, $Z_3 = Z_2 + D_3$, $Z_2 = Z_1 + D_2$, $Z_1 = Z_0 + D_1$. Um den Ausgangszustand Z_2 von A_3 zu bewerten, ist der Ausgangszustand Z_1 von Auftrag A_2 notwendig, der von Zustand Z_0 abhängt. Eliminiert man die

Zwischenzustände, erhält man $Z_E = Z_0 + D_1 + D_2 + D_3$. Dabei sind die Reihenfolgen (aufgrund des Assoziativgesetzes der Addition) unerheblich und es würden auch alle anderen Produktionsreihenfolgen (Permutationen von \vec{x}) zum selben Z_E führen. Dies gilt aber nicht, wenn die Dauern reihenfolgeabhängig sind, wie zum Beispiel im Falle von reihenfolgeabhängigem Rüsten. Geht man von einer asymmetrischen Rüstmatrix aus,

$$RZ = \begin{bmatrix} RZ_{00} & RZ_{01} & RZ_{02} & RZ_{03} \\ RZ_{10} & RZ_{11} & RZ_{12} & RZ_{13} \\ RZ_{20} & RZ_{21} & RZ_{22} & RZ_{23} \\ RZ_{30} & RZ_{31} & RZ_{31} & RZ_{33} \end{bmatrix}$$

ergeben sich die Dauern aus einer reihenfolgeabhängigen Rüstzeit und einer (konstanten) Bearbeitungszeit $D_i = RZ_{ji} + BZ_i$.⁹⁴ Entsprechend ändert sich Z_E unter Anwendung der rekursiven Betrachtungsweise zu $Z_E = Z_3$, $Z_3 = Z_2 + RZ_{23} + BZ_3$, $Z_2 = Z_1 + RZ_{12} + BZ_2$, $Z_1 = Z_0 + RZ_{01} + BZ_1$. Auch an dieser Stelle können die Zwischenzustände aus dem Gleichungssystem eliminiert werden und es ergibt sich $Z_E = Z_0 + RZ_{01} + BZ_1 + RZ_{12} + BZ_2 + RZ_{23} + BZ_3$.

Im Beispiel kann man in beiden Fällen erkennen, dass die Zwischenzustände aus den Gleichungssystemen eliminiert werden können, um direkt den gewünschten Endzustand zu berechnen. Dazu müssen jedoch (i) alle Einflussfaktoren direkt berechnet werden und (ii) die Anzahl an Aufträgen im Reihenfolgevektor \vec{x} fixiert sein. Da eine Produktionsreihenfolgeoptimierung für einen Produktionsprozess aber für eine beliebige Auftragsanzahl durchführbar sein sollte, eignet sich für die programmiertechnische Implementierung der Modelle eine sequentielle Betrachtungsweise.⁹⁵ Zudem können für den Anwender die Zwischenzustände⁹⁶ durchaus interessant sein, um steuernd in den Produktionsreihenfolgeplan eingreifen zu können und Anpassungen durchzuführen. Die sequentielle Betrachtungsweise gleicht in vielerlei Hinsicht dem Paradigma der Simulation, wobei die Bewertung eines Zustandes einem Zeitschritt in einer zeitdiskreten Simulation entspricht.

Zur Bewertung der Fitness eines Produktionsreihenfolgeplanes werden die Subzielfunktionswerte sequentiell ausgewertet und wie in Gleichung 5.5 bzw. Gleichung 5.6 beschrieben, zur Kosten- bzw. Fitnessfunktion aggregiert.

5.4.4 Ergebnisse

Nach Durchführung von Phase 3 des Phasenmodells zur Entwicklung einer WMBPRO (Abbildung 5.1), liegen die folgenden Ergebnisse vor:

⁹⁴Daraus wird ersichtlich, dass die Dauern und in weiterer Folge Z_E abhängig vom Reihenfolgevektor \vec{x} sind.

⁹⁵Ein weiterer Vorteil der sequentiellen Betrachtungsweise liegt in der Speicherplatzeffizienz: Anstatt alle notwendigen Parameter zu berechnen, in-memory zu laden und anschließend zum Endzustand zu kumulieren, wird der Zustand in einem iterativen Prozess aktualisiert, bis der Endzustand erreicht ist.

⁹⁶z.B. Maschinenzustand in X Stunden

- (i) **Definiertes Optimierungsziel:** Es werden die Optimierungsziele auf einer Metaebene definiert (Abschnitt 5.4.2).
- (ii) **Fitnessfunktion in Bezug auf das Reihenfolgeplanungsproblem:** Basierend auf den Metazielen erfolgt die Formulierung der Fitnessfunktion und deren mathematischer Modellierung. Konkretes Ergebnis ist ein mathematisches Repräsentationsmodell des Produktionsprozesses aus Perspektive des Optimierungsproblems (Abschnitt 5.4.3).

5.5 Phase 4: Formulierung des Optimierungsalgorithmus

Für jede beliebige Produktionsreihenfolge \vec{x}_j mit $j \in [1, n!]$, die den Nebenbedingungen genügt, kann mittels der Optimierungszielfunktion (vgl. Abschnitt 5.4.2) ein Fitnesswert F_j berechnet werden. Die optimale Produktionsreihenfolge ließe sich finden, indem alle F_j berechnet werden würden (vgl. Beispiel in Abschnitt 5.4.1). Das Optimum würde sich dann als das Maximum (das WMBPRO Problem wurde als Maximierungsproblem definiert) aller berechneten Fitnesswerte $F^* = \max(F_1, \dots, F_{n!})$ ergeben und die optimale Produktionsreihenfolge wäre $\vec{x}^* = \operatorname{argmax}(F_1, \dots, F_{n!})$.⁹⁷

Wie in Abschnitt 2.2 thematisiert, zählen Probleme der Zeitkomplexität $O(n!)$ zu der Kategorie der NP-harten Probleme. Somit lässt sich das Optimum des Produktionsreihenfolgeproblems F^* nicht in Polynomialzeit finden. Wie in Tabelle 2.1 (Abschnitt 2.2) ersichtlich, bedeutet das, dass Probleminstanzierungen der Komplexitätsklasse $O(n!)$ nur für kleine⁹⁸ n exakt in einer praxistauglichen Zeit lösbar sind. Für große n muss auf approximative Optimierungsalgorithmen zurückgegriffen werden. Im vorliegenden Abschnitt werden, dem in Abbildung 5.8 dargestellten Prozess folgend, zwei Methoden zur Formulierung des Optimierungsalgorithmus vorgestellt:

- (i) Ein Überblick über Metaheuristiken zur Lösung des Problems für große n
- (ii) Eine Multi-Level-Optimierungsmethode zur Reduktion der Problemkomplexität

Der Prozess zur Formulierung des Optimierungsalgorithmus besteht dabei aus den folgenden Schritten:

(1) Analyse der Zustandsabhängigkeiten und Nebenbedingungen:

- Dabei werden die im Anwendungsfall vorliegenden Zustandsabhängigkeiten (resultierend aus Phase 2, Abschnitt 5.3) sowie die modellierten Nebenbedingungen (resultierend aus Phase 3, Abschnitt 5.4) betrachtet. Eine Multi-Level-Optimierung bietet sich an, wenn:
 - die Zustandsabhängigkeiten gruppenbasiert modelliert wurden (Phase 2),

⁹⁷Dabei wird vorausgesetzt, dass ein eindeutiges Maximum existiert. Existieren mehrere Maxima, so gibt es mehrere mögliche optimale Produktionsreihenfolgen \vec{x}^* .

⁹⁸Je nach Rechendauer per elementarem Schritt liegt die obere Grenze von n bei 15 bis 20.

- das Produktportfolio aus „wenigen“ Gruppen⁹⁹ besteht und
- keine harten Nebenbedingungen vorliegen (Phase 3).
- Ist eine der Bedingungen nicht erfüllt, ist es im Allgemeinen sinnvoller, eine Modellierung mittels Metaheuristiken durchzuführen.

(2) Modellierung des Optimierungsalgorithmus:

- Im Falle einer Multi-Level-Optimierung wird eine Entscheidungsbaum-basierte, problemspezifische Heuristik erstellt. Der diskrete Entscheidungsraum kann dann exakt gelöst werden (Berechnen aller Lösungen). Details zur anwendungsfallsspezifischen Entwicklung einer Multi-Level-Optimierung sind in Abschnitt 5.5.2 dargestellt.
- Im Falle einer Modellierung mittels Metaheuristiken gilt der folgende Prozess:
 - Definieren initialer Metaparameter (Anzahl an Iterationen, algorithmenspezifische Metaparameter)
 - Modellierung der Metaheuristiken (vgl. Abschnitt 5.5)
 - Vergleichsstudie: unterschiedliche Metaheuristiken und Metaparameter
 - Auswahl des am besten geeigneten Algorithmus

(3) Ergebnis \mapsto Optimierungsalgorithmus

5.5.1 Formulierung mittels Metaheuristiken

Wie sich in der systematischen Literaturanalyse der vorliegenden Arbeit gezeigt hat, gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, wie Optimierungsprobleme gelöst werden können (vgl. Abbildung A.12). Werden aus dem Datenset (vgl. Tabelle A.2) jene Publikationen exkludiert, die eine Eigenentwicklung verwenden, oder den Algorithmus nicht im Detail beschreiben, verbleiben 80 Publikationen, die 24 verschiedene Algorithmen nennen – darunter kann ein Großteil der Kategorie der Metaheuristiken (vgl. Kategorisierung in Abbildung 2.1) zugeordnet werden.¹⁰⁰ Diese Ergebnisse bestätigen die Arbeit von Abedinnia et al. (2017, S. 289), die rund 75 % der analysierten Publikationen den Kategorien einfache Heuristiken und Metaheuristiken zuordnen.

Metaheuristiken bieten den Vorteil, dass sie grundsätzlich unabhängig von der Probleminstanzierung formuliert werden können und sich für eine Vielzahl an Problemen eignen. Dabei existiert in der Literatur eine breite Auswahl an Algorithmen, wie, beispielsweise die Autoren Gendreau und Potvin (2010, S. 625) darstellen. In der renommierten Arbeit von Blum und Roli (2003) werden, zum Beispiel, die folgenden Algorithmen vorgestellt:

- Hill Climb¹⁰¹

⁹⁹Was unter „wenig“ Gruppen zu verstehen ist, wird in Abschnitt 5.5.2 deutlich.

¹⁰⁰Von den 24 genannten Algorithmen zählen 17 zur Kategorie der Metaheuristiken (70,83 %) – gewichtet nach der Publikationsanzahl sind das 81,25 %.

¹⁰¹Die Autoren sprechen explizit von „Iterative Improvement“ (Blum und Roli, 2003, S. 273 f.).

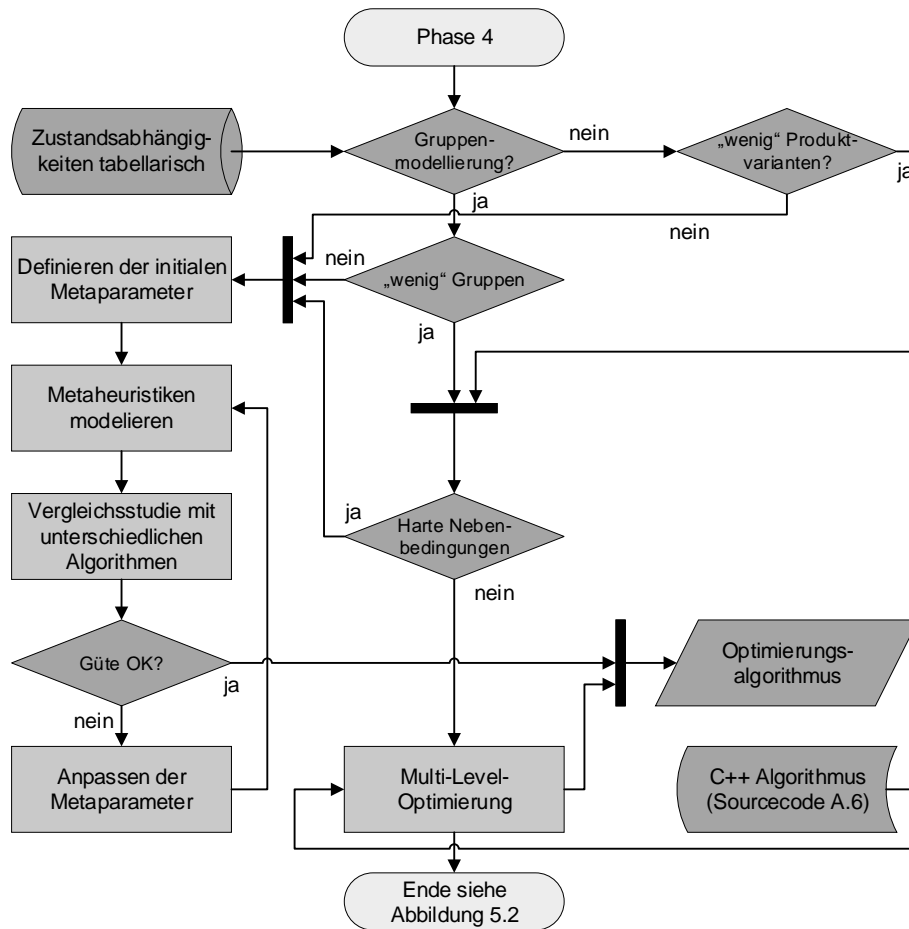


Abbildung 5.8: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 4

- Simulated Annealing
- Tabu Search
- Explorative Local Search Methods, worunter die Algorithmen GRAS, VNS, GLS und ILS zusammengefasst werden
- Evolutionary Computation, worunter der genetische Algorithmus eingeordnet wird
- Ant Colony Optimization

Welche Metaheuristik sich für ein bestimmtes Problem am besten eignet, hängt von der jeweiligen Probleminstanzierung ab. Unabhängig von der Vielzahl an möglichen Algorithmen, zählt es aber zur guten Praxis für ein Problem Vergleichsstudien durchzuführen (d.h. mehrere Metaheuristiken parallel für dasselbe Problem einzusetzen). Dadurch kann die Algorithmusauswahl (und die Konfiguration der Metaparameter) objektiv begründet werden. Die Autoren Boudjelida (2017) vergleichen in ihrer Arbeit zum integrierten Scheduling von Produktion und Instandhaltung die Algorithmen TS, GA und ACO, sowie hybridisierte Ansätze. Demgegenüber verwendet Haddad

(2014) einen hybridisierten, auf HIC basierenden, Algorithmus und stellt dessen Performance der eines GA gegenüber. Weitere Beispiele für die Durchführung von Vergleichsstudien zur Algorithmenauswahl sind u.a. in Lei (2011b) sowie in Safari und Sadjadi (2011) dargestellt.

Im Fall der WMBPRO (Formulierung des Optimierungsproblems in Abschnitt 5.4.1) ist es das Ziel, der Metaheuristik eine möglichst optimale Permutation des Reihenfolgevektors \vec{x} zu finden. Für dieses Sequenzierungsproblem eignen sich prinzipiell alle verfügbaren Metaheuristiken. Als am populärsten sind in der Literaturanalyse (vgl. Abbildung A.12) neben problemspezifischen Eigenentwicklungen speziell die Algorithmen GA und SA aufgefallen.¹⁰² Dass GA im Kontext des Scheduling und Sequencing ein populärer Algorithmus ist, bestätigen auch Abedinnia et al. (2017, S. 290) und weisen einen Anteil von rund 53 % in der Subkategorie Metaheuristiken nach. Abedinnia et al. (2017) heben zudem die Algorithmen TS (14 %), SA (11 %) und PSO (8 %) hervor.

Aufgrund der nachgewiesenen Popularität der Algorithmen, sollen im folgenden TS, SA und GA im Detail vorgestellt und Algorithmen zu ihrer Implementierung für ein Problem der Reihenfolgebildung präsentiert werden.¹⁰³ Für einen praxisorientierten Einblick in Pseudocodes zur Implementierung der Algorithmen sei auf Anhang A.2.2 verwiesen.

Tabu Search (TS): Laut den Autoren Blum und Roli (2003, S. 275 ff.) zählt TS zu den am häufigsten eingesetzten Metaheuristiken. Die Grundidee von TS geht auf Glover (1986) zurück. TS basiert dabei auf einem „Kurzzeitgedächtnis“ (im englischen Original „short term memory“), in dem die Historie der Suchen gespeichert wird und das in Form einer Tabu Liste abgebildet wird. Dadurch kann das wiederholte Berechnen einer bereits analysierten Lösung vermieden werden und der Algorithmus kann auch lokalen Optima entfliehen (vgl. Algorithmus 5.1, vgl. Blum und Roli, 2003, S. 277).

Ausgehend von einer Initiallösung werden Lösungsnachbarn gebildet, wobei die Anzahl und Ausprägung der Nachbarlösungen problemspezifisch implementiert wird.¹⁰⁴ Anschließend wird über die Nachbarlösungen iteriert, wobei nur jene Nachbarn im Detail analysiert werden, die sich nicht in der Tabu Liste befinden. Wird eine Lösung gefunden, die besser ist als das aktuelle Optimum, wird sie als das neue Optimum gesetzt (vgl. Zeilen 5 und 6 in Algorithmus 5.1). Die neuen Lösungen werden der Tabu Liste angefügt und selbige wird gekürzt (Erhöhen der Speicherplatzeffizienz des Algorithmus). In Zeilen 10 und 11 ist zudem ein Abgleich mit einer übergeordneten Globallösung dargestellt.¹⁰⁵

Simulated Annealing (SA): Simulated Annealing ist eine populäre Metaheuristik zur lokalen Suche, die vorwiegend in der diskreten Optimierung eingesetzt wird. SA bietet dabei, im Un-

¹⁰²Betrachtet man das reduzierte Datenset (Publikationen, die den Optimierungsalgorithmus nennen und jene, die keine eigenentwickelten Algorithmen verwenden) der systematischen Literaturanalyse der vorliegenden Dissertation, so bilden GA und SA gemeinsam einen Anteil von 36,25 %.

¹⁰³Neben den vorgestellten Algorithmen sei für einen detaillierteren Einblick in verfügbare Metaheuristiken auf folgende Literatur verwiesen: Yang (2010); Gendreau und Potvin (2010, 2005); Blum und Roli (2003).

¹⁰⁴Das Bilden eines Nachbarn ist beispielweise in Algorithmus 5.3 dargestellt.

¹⁰⁵So kann sichergestellt werden, dass die beste gefundene Lösung immer im Speicher gehalten wird und nicht verloren geht.

Algorithmus 5.1 Tabu Search

Input: x_{best}

- 1: **while** Abbruchkriterium nicht erfüllt **do**
- 2: candidates \leftarrow get_neighbours(x_{best})
- 3: **for all** candidate in candidates **do**
- 4: **if** not (candidate in tabulist) **then**
- 5: **if** (Calc_fitness(candidate) > Calc_fitness(x_{best})) **then**
- 6: $x_{best_candidate} \leftarrow$ candidate
- 7: **end if**
- 8: **end if**
- 9: **end for**
- 10: **if** (Calc_fitness(x_{best}) > Calc_fitness(x_{best_glob})) **then**
- 11: $x_{best_glob} \leftarrow x_{best}$
- 12: **end if**
- 13: tabulist.append($x_{best_candidate}$)
- 14: **end while**

terschied zum Hill Climbing Algorithmus¹⁰⁶ (HIC), einen Mechanismus um lokalen Optima zu entfliehen. Seine Popularität verdankt der Algorithmus der Einfachheit in der Implementierung, die, abgesehen von einer sich stetig abkühlenden Starttemperatur zur probabilistischen Akzeptanz schlechterer Lösungen, jener eines HIC gleicht (vgl. Gendreau und Potvin, 2010, S. 1 ff.). Der Algorithmus kann für die Instanziierung einer WMBPRO, wie in Algorithmus 5.2 dargestellt, formuliert werden (vgl. Eglese, 1990, S. 272; Blum und Roli, 2003, S. 274 f.).

Beim SA (Algorithmus 5.2) wird eine Startlösung sukzessive optimiert. Die notwendigen Metaparameter des Algorithmus sind eine initiale Temperatur T und ein Abkühlungsschema.¹⁰⁷ Innerhalb eines Abkühlungszyklus werden, basierend auf einer Ausgangslösung, Nachbarlösungen generiert. Die dazu eingesetzte Funktion „Generate_neighbour()“ kann dabei unterschiedlich ausgestaltet werden, wobei Algorithmus 5.3 einen einfachen Fall (Tauschen zweier Einträge) darstellt.

Nach Berechnung der Fitnesswerte werden die Fitnesswerte gegenübergestellt. Die neue Lösung wird nur dann akzeptiert, wenn sie (i) einen höheren Fitnesswert aufweist als die ursprüngliche oder (ii) probabilistisch positiv bewertet wird (Kombination aus Fitnesswert und aktueller Temperatur). Ist die Temperatur höher, ist auch die Wahrscheinlichkeit höher, dass eine Lösung mit niedrigerem Fitnesswert akzeptiert wird. Mit laufender Abkühlung sinkt diese Wahrscheinlichkeit (der Algorithmus konvergiert in Richtung eines HIC). Der SA Algorithmus wird solange durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Dieses kann beliebig definiert werden – typischerweise wird nach einer Maximalanzahl an Iterationen, bei keiner weiteren Änderung des Fitnesswertes oder bei einer bestimmten Temperatur abgebrochen.¹⁰⁸

¹⁰⁶Der Hill Climbing Algorithmus ist eine Metaheuristik zur lokalen Suche von Lösungen. Basierend auf einer Startlösung werden Permutationen gebildet, die bei einer Verbesserung der Fitness akzeptiert und bei einer Verschlechterung der Fitness verworfen werden. Der Algorithmus ist somit „gierig“ und akzeptiert nur Lösungen, die die aktuelle Lösung verbessern.

¹⁰⁷Bereits 1983 haben sich Kirkpatrick et al. intensiv mit möglichen Abkühlungsschemata für SA befasst. In einer dargestellten Fallstudie verwenden sie eine exponentielle Abkühlung (vgl. Kirkpatrick et al., 1983, S. 675 ff.).

¹⁰⁸Zusätzlich zur in Algorithmus 5.2 dargestellten einfachen Form, ist es in vielen Fällen zielführend, den besten Fit-

Algorithmus 5.2 Simulated Annealing

Input: x_{best}, T

- 1: **while** Abbruchkriterium nicht erfüllt **do**
- 2: $x_{new} \leftarrow \text{Generate_neighbour}(x)$
- 3: $\text{delta} \leftarrow \text{Calculate_delta}(\text{Calc_fitness}(x), \text{Calc_fitness}(x_{new}))$
- 4: **if** $\text{delta} < 0$ **then**
- 5: $x \leftarrow x_{new}$
- 6: **else**
- 7: **if** $(\text{random}(0, 1) < \exp(-\text{delta} / T))$ **then**
- 8: $x \leftarrow x_{new}$
- 9: **end if**
- 10: **end if**
- 11: $n++$
- 12: $T \leftarrow \text{Cool_Temperature}(T)$
- 13: **end while**

Algorithmus 5.3 Generieren einer Nachbarlösung

Input: x
Output: x_{new}

- 1: **while** True **do**
- 2: $\text{index}_1 \leftarrow \text{random_integer}(0, \text{len}(x))$
- 3: $\text{index}_2 \leftarrow \text{random_integer}(0, \text{len}(x))$
- 4: **if** $\text{index}_1 \neq \text{index}_2$ **then**
- 5: **break**
- 6: **end if**
- 7: **end while**
- 8: $x_{new} \leftarrow x$
- 9: $x_{new}[\text{index}_1, \text{index}_2] \leftarrow x[\text{index}_2, \text{index}_1]$

Genetischer Algorithmus (GA): Der genetische Algorithmus geht auf die Arbeiten von Holland zurück (1975) und ist einer der am häufigsten eingesetzten Algorithmen – speziell im Bereich der kombinatorischen Optimierung (vgl. Gendreau und Potvin, 2010, S. 109 f.). Er basiert auf der Abbildung von Lösungen in Form von Chromosomen, die über Kreuzung und Mutation zu neuen Lösungen kombiniert werden. Der Algorithmus ist populationsbasiert und die Mutations- und Kreuzungsoperatoren werden meist problemspezifisch angepasst. Weiterentwickelte Algorithmen, die auf dem GA basieren, sind NSGA-II und HNSG-II. Angewandt auf die Instanziierung einer WMBPRO lässt sich der GA mit dem Pseudocode dargestellt in Algorithmus 5.4 zusammenfassen (in Anlehnung an Konak et al., 2006, S. 994).

Beim GA (Algorithmus 5.4) gibt es nicht nur eine einzelne Startlösung, sondern eine Population an Startlösungen. Neben der Populationsgrößen sind typische Metaparameter des GA eine Kreuzungsrate (bzw. -wahrscheinlichkeit) und die Mutationsrate. Zu Beginn wird eine Startpopulation gebildet und es werden alle Fitnesswerte der Startlösungen berechnet. Basierend auf den Fitnesswerten und der Kreuzungsrate werden aus der Startpopulation Lösungen für eine Kreuz-

nesswert mitzuführen. Sollte ein probabilistisch ausgewählter neuer Pfad nämlich nicht mehr zu einem bereits erzielten Optimum führen, kann die Lösung zurückgesetzt werden.

Algorithmus 5.4 Genetischer Algorithmus**Input:** x , mutation_parameters, crossover_parameters**Output:** x

- 1: **while** Abbruchkriterium nicht erfüllt **do**
- 2: Fitness \leftarrow Calc_fitness(x)
- 3: parents \leftarrow Select_parents(x , crossover_parameters)
- 4: $x_{new} \leftarrow$ Crossover(parents, crossover_parameters)
- 5: children \leftarrow Select_children(x_{new})
- 6: $x_{new} \leftarrow$ Mutate(children, mutation_parameters)
- 7: Fitness_{new} \leftarrow Calc_fitness(x_{new})
- 8: $x \leftarrow$ Selection($x, x_{new}, Fitness, Fitness_{new}$)
- 9: **end while**

zung (Eltern bzw. engl. „Parents“) ausgewählt. Anschließend werden die Lösungen kombiniert, woraus eine Menge an neuen Lösungen (Kinder bzw. engl. „Children“) entsteht. Der Kreuzungsoperator „Crossover()“ kann dabei unterschiedlich ausgestaltet sein und wird oft an das jeweilige Problem angepasst. Im einfachsten Fall werden dazu zwei Lösungen geteilt und die Teile zu neuen Lösungen zusammengesetzt. Ein Beispiel für einen Kreuzungsoperator ist in Algorithmus 5.5 dargestellt, wobei aus zwei Eltern zwei Kinder generiert werden. Dazu werden die Elternlösungen in zwei Teile zerlegt (Zeilen 8 und 9 in Algorithmus 5.5)¹⁰⁹ und anschließend zu Kinderlösungen zusammengesetzt. Das Beispiel ist dabei einfach gehalten (nur der Kopf der Lösungen wird von Generationen weitergegeben), je nach Problem können die Kreuzungsoperatoren beliebig angepasst werden (z.B. mehr als zwei Eltern, in mehr als zwei Teile aufteilen etc.).

Um die genetische Diversität der Lösungen zu erhöhen, werden die neuen Lösungen mutiert, wobei die Mutation als eine Operation analog zum Bilden eines Nachbars beim SA (vgl. z.B. Algorithmus 5.3) interpretiert werden kann. Die konkrete Ausformulierung des Mutationsoperators kann aber beliebig erfolgen und wird oft an das jeweilige Problem angepasst. Abschließend werden die Fitnesswerte der neu generierten Lösungen berechnet und die Population wird mit einer Selektionsfunktion, die von den Fitnesswerten der Lösungen abhängt, aktualisiert.¹¹⁰ Der GA wird solange durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Dieses kann, wie auch beim SA, beliebig definiert werden – typischerweise wird nach einer Maximalanzahl an Generationen oder wenn sich der Fitnesswert nicht mehr ändert, abgebrochen.

¹⁰⁹Beim Kreuzen muss darauf geachtet werden, dass nach der Kreuzung eine valide Lösung entsteht. Hierzu ein kurzes Beispiel: $\vec{x}_1 = (A_5, A_2, A_3, A_4, A_1)$ und $\vec{x}_2 = (A_5, A_1, A_3, A_4, A_2)$ sind die zwei Eltern und die Kreuzungsposition ist 2, woraus sich die beiden Heads $\vec{h}_1 = (A_5, A_2)$ und $\vec{h}_2 = (A_5, A_1)$ ergeben. Würden nun die verbleibenden Teile (Tails) mit den Heads gekreuzt zusammengesetzt werden, würden nicht zulässige Vektoren, wie z.B. $\vec{x}_b = (A_5, A_2, A_3, A_4, A_2)$ entstehen (Darin ist A_2 doppelt vorhanden, während A_1 fehlt). Daher muss der Tail entsprechend angepasst werden, um eine valide Lösung zu erhalten.

Im dargestellten Kreuzungsoperator (Algorithmus 5.5) wird das durch die Konstruktion der Tails: Nur Einträge, die noch nicht im Head vorkommen, werden hinzugefügt.

¹¹⁰Dabei werden zuvor bestehende Lösungen (mit niedriger Fitness) aus der Population entfernt und mit neuen Lösungen (mit höherer Fitness) ersetzt.

Algorithmus 5.5 Kreuzungsoperator (Genetischer Algorithmus)**Input:** $parent_1, parent_2$ **Output:** $child_1, child_2$

```

1:  $(head_1, tail_1, head_2, tail_2) \leftarrow \text{Get\_heads\_and\_tails}(parent_1, parent_2)$ 
2:  $j = 0$ 
3: for all  $i \in \text{indices}(parent_1)$  do
4:   if  $parent_1[i] \notin head_2$  then
5:      $tail_2[j] \leftarrow parent_1[i]$ 
6:      $j++$ 
7:   end if
8: end for
9:  $j = 0$ 
10: for all  $i \in \text{indices}(parent_2)$  do
11:   if  $parent_2[i] \notin head_1$  then
12:      $tail_1[j] \leftarrow parent_2[i]$ 
13:      $j++$ 
14:   end if
15: end for
16:  $child_1 \leftarrow (head_1, tail_1)$ 
17:  $child_2 \leftarrow (head_2, tail_2)$ 

```

5.5.2 Formulierung einer Multi-Level-Optimierungsheuristik

Das Grundprinzip der Multi-Level-Optimierung (MLO) ist die Zusammenfassung von Aufträgen zu Zustandsgruppen und die Betrachtung von Zustandsgruppen anstatt Aufträgen im Reihenfolgevektor \vec{x} . In den meisten Fällen ist die Anzahl an Zustandsgruppen dabei deutlich kleiner als die Anzahl an Aufträgen und der Einsatz exakter Algorithmen (z.B. die Berechnung aller Lösungsmöglichkeiten) wird ermöglicht.

Voraussetzungen zur Formulierung einer Multi-Level-Optimierungsheuristik: Ein entscheidendes Kriterium zur Formulierung einer Multi-Level-Optimierungsheuristik ist die Möglichkeit, die zu beplanenden Aufträge eindeutigen Gruppen zuzuordnen. Aus Sicht der WMBPRO sind die Gruppen Zustandsgruppen.¹¹¹

Die Produktionsreihenfolge wird mittels Entscheidungen zwischen den einzelnen Gruppen (Entscheidungsstufen) abgebildet, wodurch der Lösungsraum (gegenüber der in Abschnitt 5.5.1 beschriebenen Vorgehensweise) verkleinert wird. Die Modellierung wird zudem vereinfacht, wenn (i) keine harten Nebenbedingungen bestehen und (ii) die Anzahl an Gruppen sowie (iii) die Anzahl an Entscheidungsmöglichkeiten je Gruppe möglichst gering bleiben.

Abbildung als Entscheidungsbaum: Die Entscheidungsmöglichkeiten lassen sich in Form eines Entscheidungsbaumes, wie in Abbildung 5.9 dargestellt, abbilden. Der Entscheidungsbaum

¹¹¹Dabei werden Aufträge zusammengefasst, die ähnliche Anforderungen an die Zustände der Bearbeitungsmaschine haben. Würde man, zum Beispiel, drei Zustandsgruppen definieren, könnten die Gruppen folgendermaßen eingeteilt werden: „sehr empfindlich“, „empfindlich“ und „unempfindlich“.

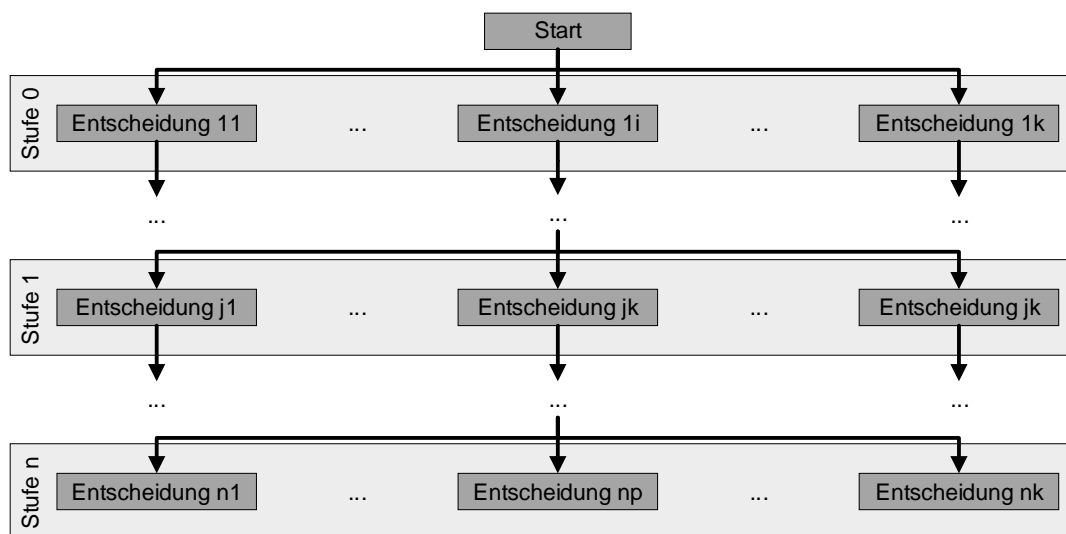


Abbildung 5.9: Generischer Entscheidungsbaum zur Multi-Level-Optimierung (n Stufen und k Entscheidungen je Stufe)

wird dabei aufgespannt von n Stufen (Gruppen) und k Entscheidungen je Stufe. Ausgehend vom Startknoten können k verschiedene Entscheidungen getroffen werden, die in die nächste Stufe führen. Somit gibt es nach der ersten Stufe k Knoten. Mit jeder weiteren Stufe kommen weitere k Entscheidungen hinzu (je Subentscheidungsbaum). Nach der zweiten Stufe sind es bereits k^2 Knoten. Führt man dies m Stufen fort, ergibt sich am Ende eine Anzahl an möglichen Lösungen (A_{MLO}), wie in Gleichung 5.7 dargestellt.

$$A_{MLO} = k^n \quad (5.7)$$

Zur besseren Veranschaulichung des Prinzips ist in Abbildung 5.10 ein Entscheidungsbaum mit $m = 3$ Stufen (Gruppen) und $k = 2$ Entscheidungen je Stufe dargestellt. Auf der untersten Ebene ergeben sich demnach $k^n = 2^3 = 8$ Knoten. Betrachtet man den aufgespannten Entscheidungsbaum von unten nach oben, so ist ein Knoten für jeweils zwei Entscheidungen (da $k = 2$) in der nächsten Ebene verantwortlich. Je Stufe wächst dabei die Anzahl an Subentscheidungsbaum an.

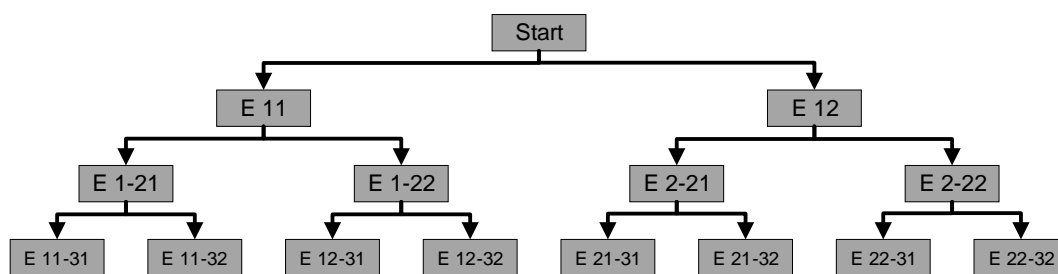


Abbildung 5.10: Beispielhafter Entscheidungsbaum ($k=2$, $m=3$)

Die Anzahl an Entscheidungen k und Stufen n wächst schnell, wie in Abbildung 5.11 dargestellt ist. Im Allgemeinen ist für die Konstruktion einer Multi-Level-Optimierungsheuristik zu beachten, dass die Problembeschreibung soweit vereinfacht werden muss, dass die Anzahl an Entscheidungen k und Stufen n möglichst minimal wird,¹¹² da diese einen direkten Einfluss auf die Anzahl an Endknoten der Entscheidungsbaume haben. Bei einer geringeren Anzahl an Endknoten bleibt auch der Lösungsraum überschaubar und das Enumerieren aller möglichen Lösungen ist in praktisch sinnvoller Zeit möglich. Somit kann das Problem im diskreten Lösungsraum exakt gelöst werden.

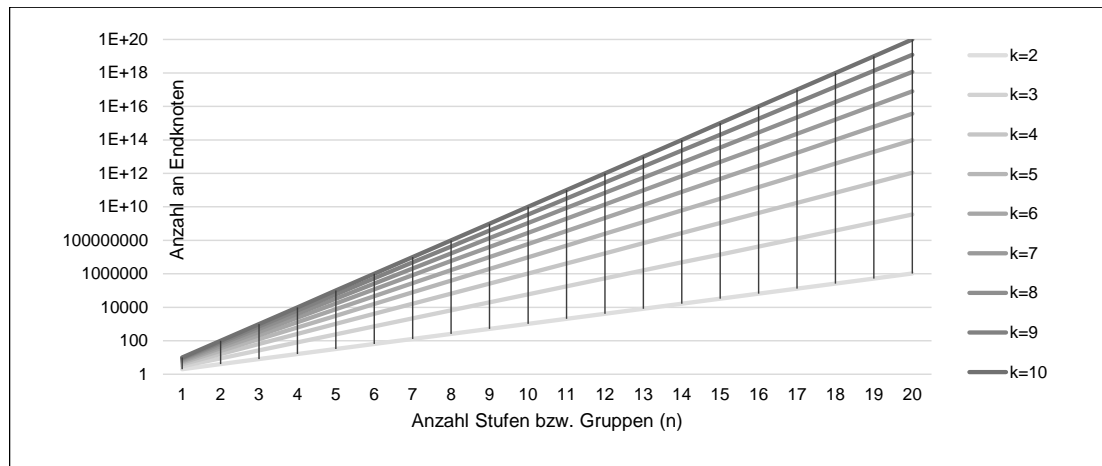


Abbildung 5.11: Endknoten unterschiedlich komplexer Entscheidungsbaume (logarithmische Skalierung der Ordinate)

Implementierung der Multi-Level-Optimierungsheuristik: Für die Implementierung einer Multi-Level-Optimierungsheuristik ist zunächst eine Funktion notwendig, die die möglichen Lösungsstrategien (Endknoten im Entscheidungsbaum) abbilden kann. Zur Kodierung der Entscheidungen können dabei Integer-Werte verwendet werden. Dabei gibt der Wert die Entscheidung an und dessen Position innerhalb eines Vektors beschreibt die Entscheidungsstufe (Gruppe). Gibt es, zum Beispiel, zwei mögliche Entscheidungen ($k = 2$) und zwei Stufen ($n = 2$), so ergeben sich die folgenden vier ($k^n = 2^2 = 4$) Lösungsstrategien: $(0, 0)$, $(0, 1)$, $(1, 0)$, $(1, 1)$. Dabei kann beobachtet werden, dass sich das Enumerieren der Lösung analog zu einem binären Zähler verhält. Beginnend beim niedrigsten Index wird der Zähler erhöht – erreicht dieser ein Maximum, wird ein Inkrement verwendet, der eine Werteerhöhung im nächsthöheren Index auslöst. Eine Implementierung in C++ zum Enumerieren aller Lösungsmöglichkeiten für beliebig große k und n ist in Sourcecode A.6 in Anhang A.2.3 dargestellt.¹¹³

¹¹²In den durchgeführten Fallstudien (vgl. Abschnitt 6) konnte beobachtet werden, dass die Probleminstanciierungen mit einer Gruppenanzahl kleiner zehn Stufen ($n \leq 10$) und einer vergleichsweise niedrigen Anzahl an Entscheidungsmöglichkeiten je Knoten ($k \leq 3$) beschrieben werden kann.

¹¹³Der Algorithmus besteht aus einer Hauptfunktion („generate_mult_permutations()“) und zwei Hilfsfunktionen („add_one_for_gmp()“ und „add_value_increment_for_gmp()“). Die Kernfunktionalität beruht dabei auf dem rekursiven Funktionsaufruf der Hilfsfunktion „add_value_increment_for_gmp()“. Die Funktion ruft sich dabei immer wieder selbst auf bis (i) ein Zustand erreicht ist, wo das Inkrement bei 0 liegt, oder (ii) der Base-Case erreicht ist.

Die mit Sourcecode A.6 kodierte Lösungsmöglichkeiten müssen anschließend hinsichtlich ihrer Fitness bewertet werden, um die optimale Lösung zu finden. Dazu ist eine Funktion notwendig, die die Lösungsstrategien aus den Vektoren dekodiert und zur Sortierung der Reihenfolgen der einzelnen Gruppen anwendet. Dazu wird ein wie in Abschnitt 5.4 beschriebenes Modell angewandt. Die abgebildeten Entscheidungen dienen zur Reihenfolgebildung zwischen den Gruppen. Innerhalb der Gruppen können, je nach Anwendungsfall, noch weitere Sortierkriterien (z.B. Schlupfzeit) definiert werden, um einzelne Aufträge zu reihen.¹¹⁴

5.5.3 Ergebnisse

Nach Durchführung von Phase 4 des Phasenmodells zur Entwicklung einer WMBPRO (Abbildung 5.1) liegen die folgenden Ergebnisse vor:

- (i) **Auswahl und Implementierung Optimierungsalgorithmus:** Je nach Art des Problems wird ein Optimierungsalgorithmus ausgewählt:
- **Multi-Level-Optimierung:** Ist das Zusammenfassen zu Zustandsgruppen möglich, kann eine exakte Lösungsmethode eingesetzt werden, die auf der Abbildung eines Entscheidungsbaumes basiert (Abschnitt 5.5.2).
 - **Metaheuristik:** Ist die Modellierung von Zustandsgruppen nicht möglich oder die Problemkomplexität zu groß, wird eine Metaheuristik eingesetzt (Abschnitt 5.5.1).

5.6 Zusammenfassung

An dieser Stelle wird das formulierte Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO zusammengefasst. Der Fokus liegt dabei auf einer anwendungsnahen Präsentation, wozu eine schrittweise Anleitung zur praktischen Umsetzung präsentiert wird, ohne diese im Detail zu begründen (dazu sei auf die Abschnitte 5.2, 5.3, 5.4 und 5.5 verwiesen). Die einzelnen Schritte beziehen sich dabei auf das Phasenmodell in Abbildung 5.1 in Abschnitt 5.1.

- (1) Erfassung der Werkzeug- und Maschinenzustände (vgl. Abschnitt 5.2, Abbildung 5.12)

- **Zu beantwortende Fragen:**
 - Welche Werkzeug- und Maschinenzustände haben Einflüsse auf die Produktqualität?
 - Ist die Zustandsinformation bereits bekannt oder muss diese erfasst werden?
 - Wie können die entsprechenden Werkzeug- und Maschinenzustände erfasst werden?

¹¹⁴Für ein praxisnahes Beispiel zur Konstruktion einer Multi-Level-Optimierungsheuristik sei an dieser Stelle auf Abschnitt 6.3 verwiesen.

- **Ergebnis:** Ausgewähltes System zur Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen in der Form von Healthpoints

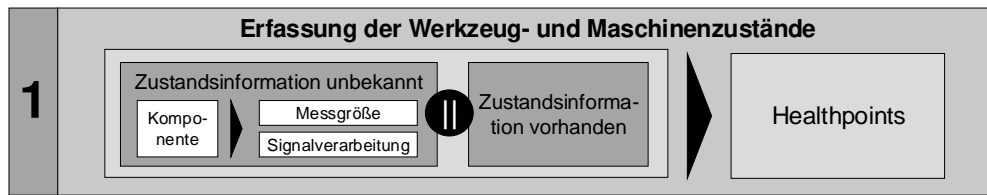


Abbildung 5.12: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO, Phase 1

(2) Modellierung der Zustandsabhängigkeiten (vgl. Abschnitt 5.3, Abbildung 5.13)

- **Zu beantwortende Fragen:**
 - Welche Produkte weisen Zustandsabhängigkeiten auf?
 - Besteht eine eindimensionale oder eine mehrdimensionale Zustandsabhängigkeit?
 - Wie kann die Zustandsabhängigkeit aus Sicht der Produktionsplanung abgebildet werden?
- **Ergebnis:** Abgebildete Werkzeug- und Maschinenzustandsabhängigkeiten (Mindest- und Maximalzustände sowie Verschleißeffekte) zur Integration in die Produktionsreihenfolgeplanung

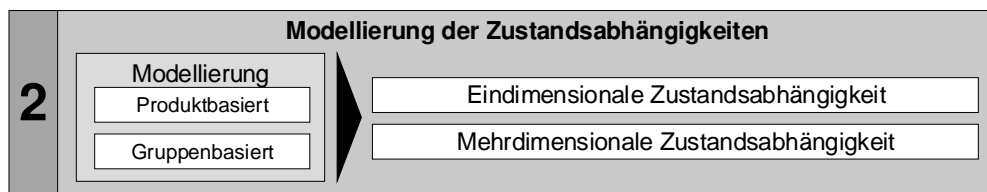


Abbildung 5.13: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO, Phase 2

(3) Modellierung der WMBPRO (vgl. Abschnitt 5.4, Abbildung 5.14)

- **Zu beantwortende Fragen:**
 - Was sind die Optimierungsziele?
 - Wie wird der Produktionsprozess aus Planungssicht abgebildet?
 - Wie lässt sich die Fitness eines Produktionsreihenfolgeplanes bewerten?
- **Ergebnis:** Fitnessfunktion basierend auf einem mathematischen Repräsentationsmodell des Produktionssystems

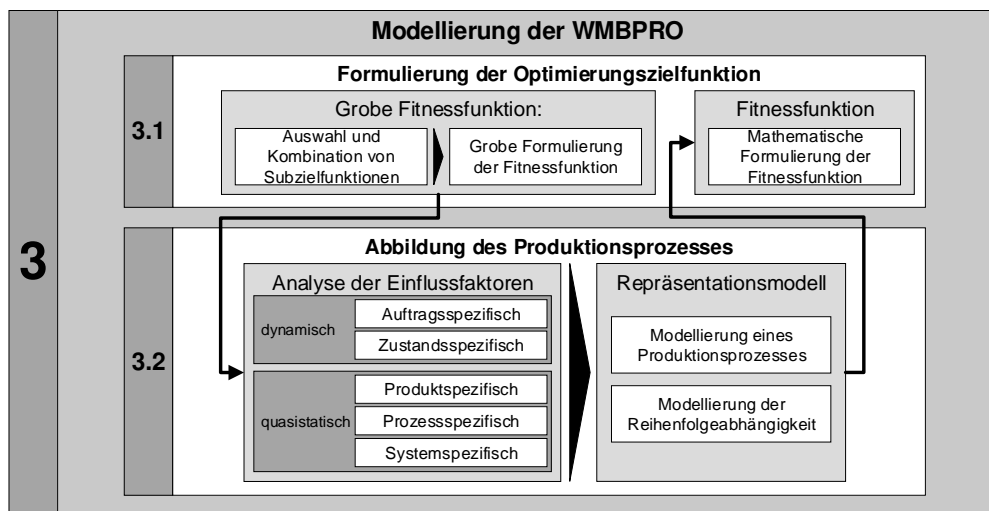


Abbildung 5.14: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO, Phase 3

(4) Formulierung des Optimierungsalgorithmus (vgl. Abschnitt 5.5, Abbildung 5.15)

• **Zu beantwortende Fragen:**

- Wie kann für das formulierte Problem ein optimaler (bzw. guter) Produktionsreihenfolgeplan generiert werden?
- Wie erfolgt die Implementierung des Optimierungsalgorithmus für eine WMBPRO?

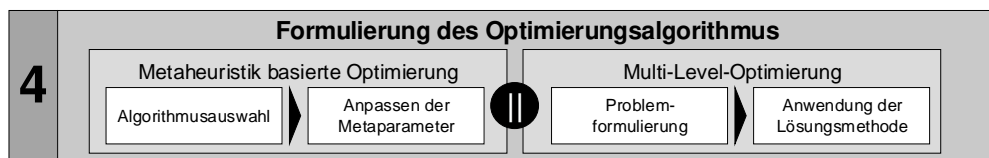
• **Ergebnis:** Optimierungsalgorithmus zur Lösung des formulierten WMBPRO Problems

Abbildung 5.15: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO, Phase 4

6 Anwendung und Validierung des Phasenmodells

Im vorliegenden Abschnitt wird die Anwendung des entwickelten Phasenmodells (vgl. Abschnitt 5) im Rahmen von Fallstudien vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung der einzelnen Phasen des Phasenmodells aus einer praxisnahen Anwendungsperspektive, sowie auf der Darstellung des erzielten wirtschaftlichen Nutzens durch den Einsatz der entwickelten WMBPROs.

6.1 Rahmenbedingungen der Fallstudien

Fallstudien 1 und 2 wurden in der metallverarbeitenden Industrie umgesetzt – der Industriepartner ist ein Hersteller hochlegierter Tafelbleche aus Edelstahl. Die Losgrößen sind für die Branche vergleichsweise gering und die Variantenvielfalt (verschiedene Legierungen und Vergütungen) ist hoch. Um mit der hohen Variantenvielfalt bestmöglich umgehen zu können, ist die Produktion aus makroskopischer Perspektive gemäß dem Prinzip der Werkstattfertigung organisiert. Die Produktionsgrobplanung ist durchlaufzeitbasiert – die jeweiligen Bottlenecks werden kapazitiv beplant und die anderen Arbeitsplätze mit Plandurchlaufzeiten geplant.¹¹⁵ An den Arbeitsplätzen bzw. Arbeitsplatzgruppen¹¹⁶ erfolgt die Produktionsfeinplanung dezentral und wird von Gruppen- bzw. Teamleiter durchgeführt, wobei die obersten Planungsziele eine Erhöhung der Auslastung sowie die Einhaltung von Terminen sind. Die Produktionsfeinplanung gestaltet sich dabei aufgrund von Werkzeug- bzw. Maschinenzustandsabhängigkeiten als komplex: Die einzelnen Produkte weisen je nach Legierungszusammensetzung und Kundenwünschen unterschiedliche Anforderungen an die Bearbeitungsmaschinen auf (z.B. Ofentemperaturen, Reinheitszustände, Werkzeugzustände). Zur Unterstützung der lokalen Produktionsfeinplanung wurde das entwickelte Phasenmodells (vgl. Abschnitt 5) an zwei Bottleneckanlagen angewendet, um jeweils eine WMBPRO zu realisieren.

6.2 Fallstudie 1: WMBPRO an einer Tafelblechschere

6.2.1 Ausgangssituation und Rahmenbedingungen

Die Anlage in der ersten Fallstudie ist eine hydraulische Tafelblechschere, die Tafelbleche aus Stahl in den unterschiedlichsten Legierungen (im Folgenden als Qualitäten bezeichnet),¹¹⁷ Formaten und Dicken bearbeitet. Die maximale Abmessung der Tafelbleche liegt bei 6000 mm (in Länge und Breite), die maximale Dicke liegt, je nach Materialeigenschaften, bei etwa 12 mm. An der Tafelblechschere existieren Zustandsabhängigkeiten zwischen dem Scherenmesser und den unterschiedlichen Produkten (Kombinationen aus Qualitäten und Dicken). Während empfindliche Materialien, die hohe Anforderungen an die Schnittqualität (z.B. an den Schnittwinkel) mit sich bringen und einen guten Zustand der Schneidmesser voraussetzen, sind andere Produkte (z.B. jene, die weiterverarbeitet werden) weniger kritisch und können auch noch auf einem zum Teil

¹¹⁵Die Plandurchlaufzeiten entstehen auftragseigenchaftsabhängig aus einem Durchlaufzeitprognosemodell, das parallel zur Durchführung der Fallstudien entwickelt wurde.

¹¹⁶Gemäß dem Prinzip der Werkstattfertigung zu Gruppen zusammengefasste Arbeitsplätze.

¹¹⁷An der Anlage werden etwa 100 verschiedene Legierungstypen bearbeitet.

verschlissenen Scherenmesser geschnitten werden. Der Zustand des Scherenmessers ist nicht explizit bekannt und wird von erfahrenen Maschinisten beurteilt. Das Scherenmesser wird zustandsbedingt, etwa alle 40 Schichten, erneuert.

Aus Produktionsplanungssicht stellt die Tafelblechschere einen Bottleneck für den entsprechenden Wertstrom dar und jegliche Verbesserungen (hinsichtlich Durchsatz), die lokal an der Anlage erzielt werden können, wirken sich positiv auf den gesamten Wertstrom aus. Aufgrund der Zustandsabhängigkeiten ist die gezielte Anwendung einer konventionellen Produktionsreihenfolgeoptimierung nicht möglich und entsprechend wird die Produktionsfeinplanung manuell auf lokaler Ebene durch den Gruppenleiter und die Maschinisten der Anlage durchgeführt.

6.2.2 Aufgabenstellung der Fallstudie

Im Rahmen der Fallstudie soll ein Optimierungsmodell entwickelt werden, das die Abarbeitungsreihenfolgen der an der Tafelblechschere verfügbaren Aufträge dahingehend anpasst, dass eine multikriterielle Zielfunktion möglichst optimal wird. Die multikriterielle Zielfunktion besteht dabei aus logistischen Zielgrößen (Auslastung, Bestand und Termintreue) und soll in der praktischen Anwendung flexibel angepasst werden können.

Zur Lösung wird das in Abschnitt 5 entwickelte Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO angewendet. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen der Entwicklung aus der Praxisperspektive im Kontext von Fallstudie 1 vorgestellt. Die Fallstudie endet mit einer Gegenüberstellung der erzielten Planungsergebnisse im pre-WMBPRO Zustand und im post-WMBPRO Zustand im Rahmen einer Nutzenbetrachtung.

6.2.3 Entwicklung einer WMBPRO an einer Tafelblechschere: Phase 1

In Abbildung 6.1 ist die Anwendung von Phase 1 des Phasenmodells in Fallstudie 1 dargestellt. Die punktierte Linie entspricht dabei jenem Pfad, der für die Entwicklung einer WMBPRO in Fallstudie 1 durchlaufen wird.

An der Tafelblechschere besteht eine Werkzeugzustandsabhängigkeit der Produkte gegenüber dem Zustand des Scherenmessers. Schnitte mit einem verschlissenen Messer korrespondieren dabei mit erhöhten Schwingungen, wobei die Schwingungen sogar mit menschlichen Sinnen in der Umgebung der Anlage fühlbar sind. Darauf basierend wurde die Hypothese aufgestellt: „*Es existiert eine Korrelation zwischen dem Messerzustand und dem Schwingungszustand des Messers während der Bearbeitung*“. In Bezug zu Abschnitt 5.2 besteht somit bereits eine initiale Hypothese bezüglich der Erfassung des Zustandes. Diese Hypothese lässt sich durch Tabelle 5.1 bestärken – darin wird gezeigt, dass sich eine Schwingungserfassung im Speziellen für Schneidprozesse eignet, wenngleich in der analysierten Literatur vorwiegend rotatorisch bewegte Schneidwerkzeuge (Fräser, Drehmeißel) behandelt werden.¹¹⁸

¹¹⁸Die Inhalte des Abschnittes 6.2.3 wurden in (Karner et al., 2019) erstmalig vorgestellt.

Nach Fertigstellung und Validierung des Condition Monitoring Systems wurde es dazu eingesetzt, um Zustandsdaten zu erfassen und in einem Zustandsdatenspeicher für zukünftige Analysen zur Verfügung stellen zu können.

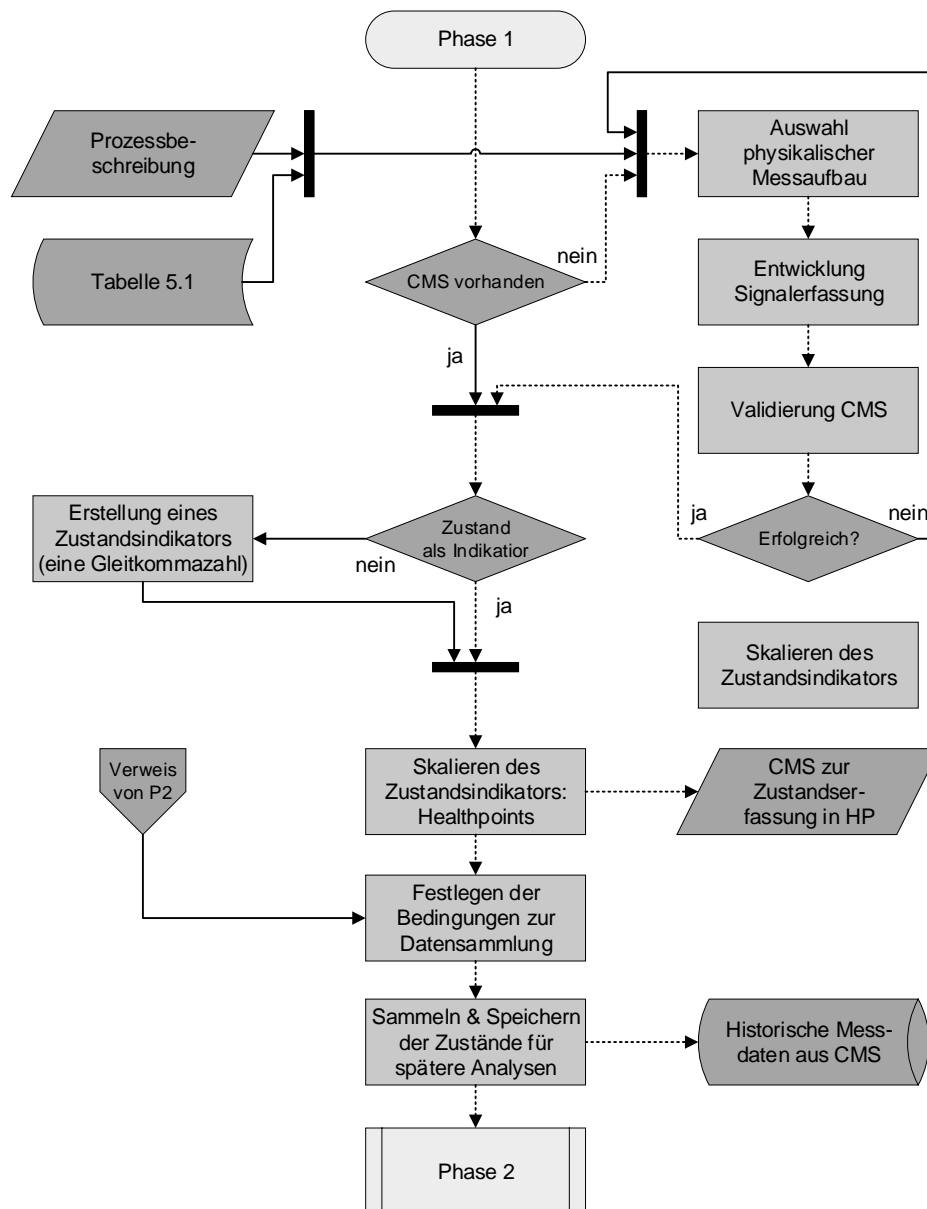


Abbildung 6.1: Fallstudie 1: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 1

In der Fallstudie wurde zur Datenaufnahme ein Schwingungssensor an der Schere appliziert und danach wurden Daten über eine Periode von 150 Schichten aufgezeichnet. Während dieser Zeit wurde der Messerzustand in Form von Healthpoints (HP, vgl. Abschnitt 5.2) zusätzlich einmal pro Schicht mit Hilfe einer Skala von 10 (bester Zustand) bis 0 (schlechtester Zustand) von Prozessexperten bewertet. In der folgenden Datenanalyse bildet diese Bewertung die Grundwahrheit.¹¹⁹

¹¹⁹Der Zustand wurde dabei auf eine Skala von 1 bis 0 normiert.

Machine-Learning Modell zur Bewertung des Scherenmesserzustandes: Die Änderung des Scherenmesserzustandes ist im Allgemeinen kontinuierlich.¹²⁰ Um diesen Zusammenhang zu modellieren, wurden die aufgezeichneten Daten statistisch aggregiert, wobei die Messpunkte in der Zeitdomäne schnittweise aggregiert wurden. Für jeden Schnitt wurden aus den Schwingungswerten die Features Mittelwert und Maximalwert berechnet.¹²¹ Da der Zustand lediglich einmal pro Schicht von Experten bewertet wurde, wäre eine schnittweise Interpolation zwischen den Bewertungen zu ungenau. Stattdessen wurden die schnittweise kumulierten Daten weiter kumuliert, um schließlich einen Zustandswert je Stunde zu erhalten. Die schichtweisen Zustandsbewertungen der Experten wurden ebenso auf die Zeitgröße „Stunde“ interpoliert.¹²² Das finale Datenset besteht somit aus den folgenden Features:

- Kumulierte Anzahl an Schnitten seit dem letzten Scherenmesserwechsel
- Mittelwert der Vibrationsmittelwerte aller Schnitte der vergangenen Stunde
- Maximalwert der Vibrationsmaximalwerte aller Schnitte der vergangenen Stunde

Im nächsten Schritt wird das Datenset in ein Trainings- und ein Validierungsdatenset geteilt, wobei die ersten 70 % der Daten dem Trainingsdatenset und die restlichen 30 % dem Validierungsdatenset zugeordnet werden. Mit dem Trainingsdatenset werden Regressionsmodelle (dargestellt in Tabelle 6.1) trainiert, wozu die Python Library Scikit-Learn (vgl. Pedregosa et al., 2011) verwendet wird.

Tabelle 6.1: Angewendete Regressionsalgorithmen (Fallstudie 1)

Akronym	Regressionsalgorithmus	Spezifikationen
Baseline	Dummy-Regressor	Prognose entspricht immer dem Mittelwert
OLR	Ordinary Linear Regression	
OMP	Orthogonal Matching Pursuit	Cross-Validation aktiviert
ENET	Elastic Net	Cross-Validation aktiviert
KNNR	K-Nearest Neighbour Regression	$k = [5, 50, 100]$
DTR	Decision Tree Regression	$max. depth = [3, 10, 15]$
RFR	Random Forest Regression	$trees = [10, 50, 250]$

Die Regressionsmodelle wurden unabhängig voneinander unter Verwendung der Trainingsdaten konstruiert und durch Validierungsdaten bestätigt. Für die Validierung wurden die Metriken R-Quadrat (R^2) und der Root-Mean-Square-Error ($RMSE$) berechnet. Eine Gegenüberstellung der Metriken der Regressionsalgorithmen ist in Abbildung 6.2 dargestellt.¹²³

¹²⁰In seltenen Fällen kann es durch abnormale Belastungen zu einem Messerausbruch kommen, der mit einem völligen Versagen des Werkzeugs (Zustand von 0) gleichgesetzt werden kann.

¹²¹Die Samplingrate des Schwingungssensors liegt bei 8 Hz, wobei für jeden Schnitt (je nach Länge) etwa 80 Datenpunkte zu Verfügung stehen.

¹²²Somit besteht die Annahme, dass der Zustand zwischen den Expertenbewertungen zeitlich-linear abnimmt.

¹²³Die Visualisierungen (Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3) sind unter Verwendung der Python Libraries matplotlib

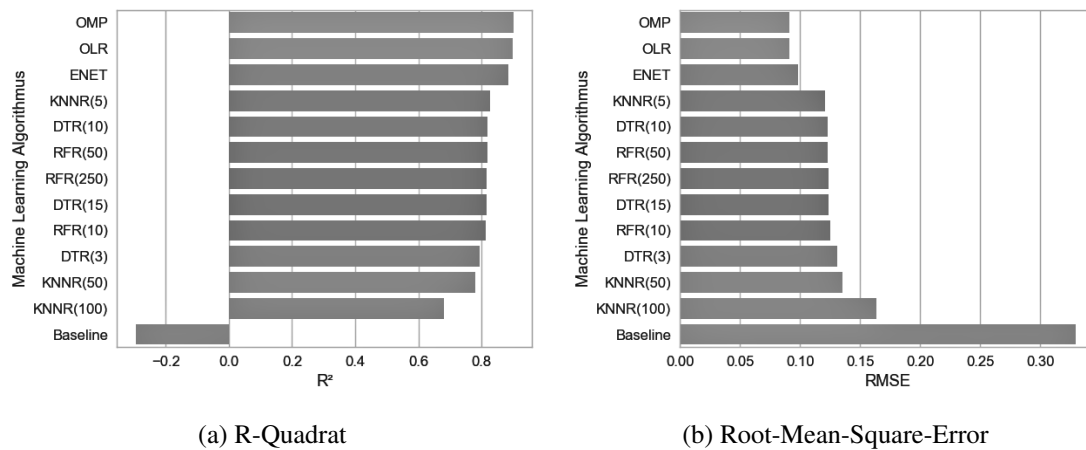


Abbildung 6.2: Tafelblechschere Machine-Learning-Modell, Metriken (Fallstudie 1)

Wie zu erwarten, ist der R^2 der Baseline relativ niedrig, da das Dummy-Modell keine der in den Daten vorhandenen Varianz erklären kann. Die linearen Modelle (OLR, OMP, ENET) können vergleichsweise hohe R^2 Werte erreichen (0,90) und übertreffen sogar die nichtlinearen Modelle. Selbiges Verhalten trifft für die $RMSE$ Werte zu, die die niedrigsten Werte für die linearen Modelle aufweisen. Das beste Regressionsmodell in Bezug auf die Metriken ist OMP mit einem $RMSE$ von 0,091. Um die Ergebnisse dieses Modells im Detail zu visualisieren, werden die Validierungswerte in Abbildung 6.3 aufgetragen¹²⁴. Entlang der Abszisse sind die Expertenbewertungen dargestellt und entlang der Ordinate sind die prognostizierten Zustände aufgetragen. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, liegt der Großteil der Messpunkte nahe der Identity-Line¹²⁵ und es sind keine extremen Ausreißer zu erkennen, wodurch ein Übereinstimmen von gemessenen und prognostizierten Zuständen festgestellt werden kann.

Als Regressionsmodell ergibt sich folgender funktionaler Zusammenhang:¹²⁶

$$HP(\vec{z}) = a_0 + a_1 \cdot z_1 + a_2 \cdot z_2 + a_3 \cdot z_3 \quad (6.1)$$

Die Healthpoints müssen, wie eingangs definiert, im Intervall $[0, 1]$ liegen. Um dies auch beim Regressionsmodell zu gewährleisten, muss eine zusätzliche Logik jene Prognosewerte abfangen, die nicht in dem Intervall liegen. Dazu wird Gleichung 6.2 dem Regressionsmodell (Gleichung 6.1) als Funktion nachgelagert.

sowie Seaborn (Hunter, 2007) entstanden.

¹²⁴Zur besseren Sichtbarkeit der Datenpunkte (Vermeidung von Überlappungen) sind ein Random-Jitter sowie ein Alpha gesetzt.

¹²⁵Abszisse = Ordinate

¹²⁶Dabei sind die Werte a_i die vom Machine-Learning Modell ermittelten Koeffizienten und die Werte z_i die Messwerte. Die numerischen Werte der Koeffizienten sind in Anhang A.3 (vgl. Tabelle A.3) dargestellt.

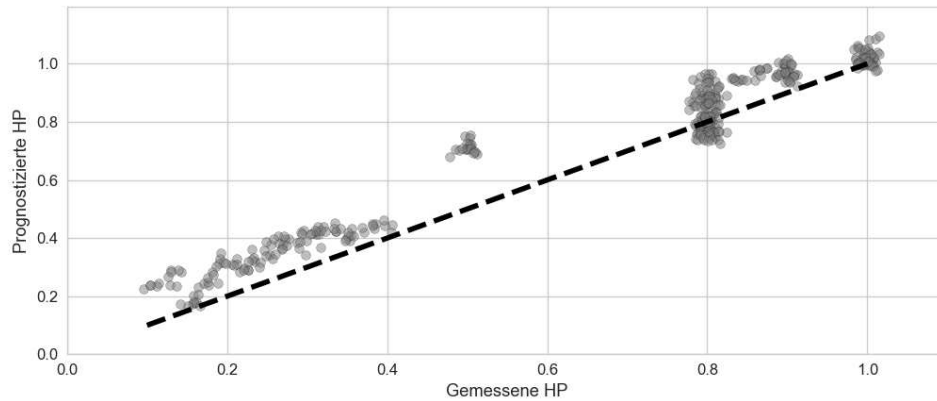


Abbildung 6.3: Gemessene vs. prognostizierte HP (Fallstudie 1)

$$HP = \begin{cases} 0 & \text{wenn } HP < 0 \\ 1 & \text{wenn } HP > 1 \\ HP & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (6.2)$$

Das entwickelte Modell eignet sich nun für den praktischen Einsatz, wobei von einer Accuracy von 90,1 %¹²⁷ ausgegangen werden kann. Dazu müssen die Schwingungsdaten, sowie die Schnittanzahl in derselben Form aggregiert werden, wie im Rahmen der Datenaufbereitung durchgeführt. Der Prozess zur Anwendung des ML-Modells ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

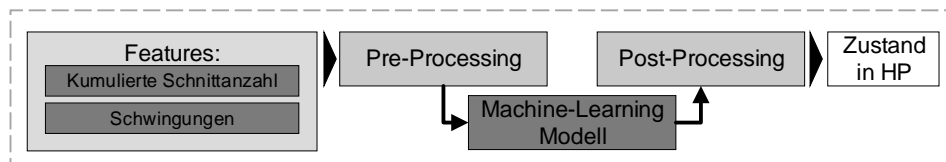


Abbildung 6.4: Anwendung des Machine-Learning-Modells zur Zustandsberechnung, entstandenes CMS (Fallstudie 1)

6.2.4 Entwicklung einer WMBPRO an einer Tafelblechschere: Phase 2

In Abbildung 6.5 ist die Anwendung von Phase 2 des Phasenmodells in Fallstudie 1 dargestellt (die punktierte Linie entspricht dem für Fallstudie 1 aktiven Prozessverlauf).

An der Tafelblechschere besteht eine eindimensionale Zustandsabhängigkeit zwischen den Produkten und dem Zustand des Scherenmessers. Die Zustandsabhängigkeit variiert dabei je nach Legierungstyp und Blechdicke. Da die Blechdicke kundenindividuell parametrierbar ist, können nicht alle möglichen Dicken planungstechnisch abgebildet werden (vgl. theoretisches Beispiel in

¹²⁷Die Accuracy wurde berechnet aus $1 - nRMSE$ mit dem normierten Root-Mean-Square-Error nRMSE.

Abschnitt 5.3.2). Stattdessen werden Breitengruppen gebildet, die einen definierten Dickenintervall abdecken. Um eine praktisch sinnvolle Anzahl an Produktgruppen zu generieren, wurden in Zusammenarbeit mit Prozessexperten die folgenden drei Dickengruppen definiert.

- Dickengruppe 1: $0\text{ mm} < d \leq 7\text{ mm}$
- Dickengruppe 2: $7\text{ mm} < d \leq 11\text{ mm}$
- Dickengruppe 3: $d > 11\text{ mm}$

Die Produktgruppen (vgl. P_1 bis P_n in Tabelle 5.2) ergeben sich aus Kombinationen von Legierungstypen und Dickengruppen: Jeder verfügbare Legierungstyp wurde mit jeder der Dickengruppen kombiniert, woraus in Summe rund 300 Produktgruppen entstanden sind. Zur Erhebung der Produktgruppe eines Auftrages müssen dessen Dicke und dessen Legierung bekannt sein. Die Funktion $PG()$ ordnet einem Auftrag A_i dessen Produktgruppe P_j zu (vgl. Gleichung 6.3).

$$P_j = PG(A_i) \quad (6.3)$$

Zur Formulierung einer WMBRPO müssen im nächsten Schritt die Zustandsabhängigkeiten (wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben) HP_{min} , HP_{max} und ΔHP ermittelt werden. Dazu wurde ein datenbasierter Ansatz gewählt, wobei die Auftragsrückmeldungen kombiniert mit den HP für ein halbes Jahr lang aufgezeichnet wurden. Die gefertigten Aufträge wurden ex-post den definierten Produktgruppen zugeordnet, wodurch sich eine Reihe an verfügbaren Messwerten, wie in Tabelle 6.2 dargestellt, ergibt.

Tabelle 6.2: Beispielmesswerte Zustandsabhängigkeiten (Fallstudie 1)

Qualität ¹²⁸	Dicke in mm	Produktgruppe	Schnittanzahl n	HP_{vor}	HP_{nach}	$\Delta HP \cdot 10^{-5}$
A	6	A 1	14	0,98993	0,98947	3,2857
B	4	B 1	43	0,98947	0,98912	0,8140
C	5	C 1	105	0,98912	0,98813	0,9429
A	4	A 1	107	0,98813	0,98539	2,5607
D	7	D 2	55	0,98539	0,98385	2,8000
...
E	5	E 1	56	0,39548	0,39356	3,4909
F	6	F 1	116	0,39356	0,39261	1,7273
E	5	E 1	72	0,39261	0,39187	1,3455
...

Der Verschleißeffekt ΔHP in Tabelle 6.2 kann aus der Differenz der beiden Messwerte HP_{vor} und HP_{nach} berechnet werden und ergibt sich mit der Schnittanzahl n zu:

$$\Delta HP = \frac{1}{n} \cdot (HP_{nach} - HP_{vor}) \quad (6.4)$$

Um eine Zustandsklassifizierungsmatrix (vgl. Tabelle 5.2) zu erhalten, können die Messwerte nun je Produktgruppe aggregiert werden. Bei der Aggregation ist es zielführend, die Verteilungen der zu den jeweiligen Fertigungszeitpunkten vorherrschenden HP (HP_{vor} bzw. HP_{nach}) je Produktgruppe im Detail zu analysieren und aus den Verteilungen (z.B. durch die Quantile) einen datenbasierten Vorschlag für HP_{min} , HP_{max} und ΔHP abzuleiten. Zur besseren Verständlichkeit sei ein kurzes Beispiel (mit Realdaten aus der Fallstudie) dargestellt:

Bei der Produktgruppe handelt es sich um Legierung A¹²⁹ in der Dickenkategorie 1. Betrachtet man die Verteilung der HP innerhalb der Produktgruppe (vgl. Abbildung 6.6), so fällt auf, dass der Großteil der Messwerte im Intervall $(0,93, 1,00]$ liegt. Dies bedeutet, dass die analysierte Produktgruppe zum Großteil mit einem Messer in einem sehr guten Zustand geschnitten wird. Es gibt aber auch erhöhte Häufigkeiten im Intervall $(0,66, 0,80]$. Kombiniert man die drei Container, befinden sich bereits rund 78 % der Messwerte in diesen Bereichen. Werte die darunter liegen, könnten als Ausreißer interpretiert werden. Die Grenze entspricht in diesem Fall etwa dem 15 % Quantil. Aus Datensicht ergeben sich $HP_{min} = 0,66$ und $HP_{max} = 1,00$.

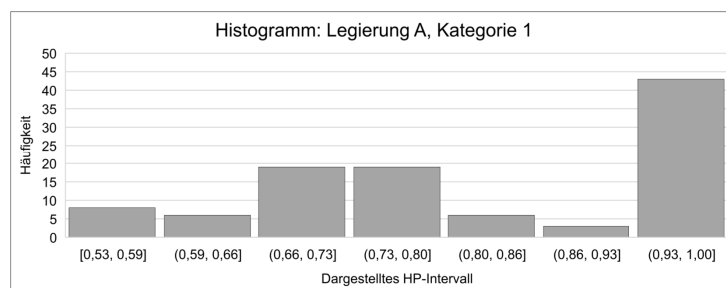


Abbildung 6.6: Histogramm HP (Fallstudie 1)

Analog zum während der Produktion vorherrschenden Zustand, können auch die Verschleißeffekte hinsichtlich ihrer Verteilung analysiert werden. Dabei wird ersichtlich (vgl. Abbildung 6.7), dass die Verteilung der ΔHP (je Schnitt) einer Exponentialverteilung ähnelt. Während die Zustandsänderungen in den meisten Fällen relativ gering sind, gibt es einige Einzelfälle, wo die Schnitte einen deutlich höheren Verschleiß aufweisen. Aufgrund der schiefen Verteilung würde sich zur Zusammenfassung eher der Median eignen, um jedoch die höheren Verschleißeffekte stärker zu gewichten, wird stattdessen der arithmetische Mittelwert verwendet, der sich als $\Delta HP = 3,46 \cdot 10^{-5}$ (je Schnitt) ergibt.

Die Zustandsabhängigkeiten HP_{min} , HP_{max} und ΔHP aller Produktgruppen wurden analog zum dargestellten Beispiel datenbasiert abgeleitet. Die datenbasierten Zustandskategorien HP_{min} und HP_{max} wurden anschließend mit den Prozessexperten diskutiert und plausibilisiert. Ergebnis von Phase 2 ist eine validierte, eindimensionale Zustandsklassifizierungsmatrix, die der Struktur von Tabelle 5.2 folgt.

¹²⁹Die Bezeichnung wurde aus Datenschutzgründen anonymisiert.

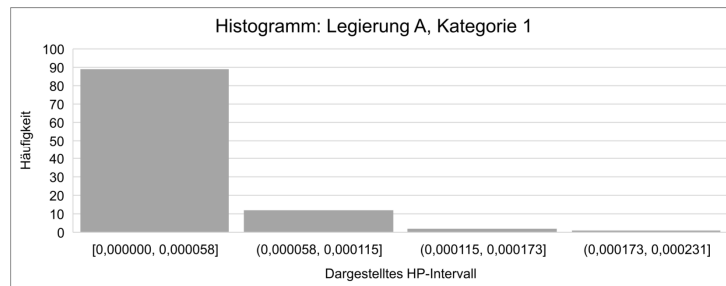


Abbildung 6.7: Histogramm Verschleißeffekte (Fallstudie 1)

6.2.5 Entwicklung einer WMBPRO an einer Tafelblechschere: Phase 3

Wie in Abschnitt 6.2.2 hervorgehoben, ist es das Ziel von Fallstudie 1 eine Optimierungsmethode zu schaffen, die eine multikriterielle Zielfunktion optimiert. Die Fitnessfunktion wurde im Rahmen einer Workshopreihe gemeinsam mit den Prozessexperten definiert. Dazu wurde die in Abbildung 5.5 dargestellte Vorgehensweise zur Erstellung und Ausformulierung der Fitnessfunktion angewandt.

In Abbildung 6.8 ist die Anwendung von Phase 3 des Phasenmodells in Fallstudie 1 dargestellt (die punktierte Linie entspricht dem für Fallstudie 1 aktiven Prozessverlauf).

Grobe Formulierung der Fitnessfunktion (Phase 3.1): Im Ausgangszustand wurde die Produktionsreihenfolge an der betrachteten Anlage manuell geplant. Dabei wurden die Aufträge anhand der Ecktermine unter impliziter Berücksichtigung der Zustandsabhängigkeiten priorisiert. An der Anlage sind aber auch logistische Zielgrößen wie Auslastung und Bestand essentiell – da die Anlage einen Bottleneck darstellt, kann durch eine erhöhte Auslastung der Durchsatz des gesamten betroffenen Wertstromes erhöht werden. Ein hoher Bestand bedeutet gebundenes Kapital, was speziell bei hochpreisigen Legierungen zu berücksichtigen ist. Die Berücksichtigung dieser Vielzahl an Einflüssen war aufgrund der Problemkomplexität manuell nicht möglich. Durch die Entwicklung einer WMBPRO können die zusätzlichen Abhängigkeiten aber nun in der Produktionsreihenfolgebildung berücksichtigt werden. Dazu wurden gemeinsam mit den Prozessexperten die folgenden Subziele der Produktionsreihenfolgeoptimierung an der Anlage definiert: Termintreue, Auslastung und Bestand.

Die Termintreue wird dabei nicht durch die Modellierung von harten Nebenbedingungen berücksichtigt, sondern als Subzielfunktion formuliert. Neben den definierten Subzielfunktionen ist der Maschinenzustand zu berücksichtigen. Der Zustand des Scherenmessers kann durch eine Instandsetzung¹³⁰ wieder erhöht werden. Um diesen Sachverhalt im Rahmen der Produktionsreihenfolgeplanung zu berücksichtigen und den optimalen Zeitpunkt des Instandsetzungsvorganges mit zu

¹³⁰Durch Instandsetzen kann der Zustand des Scherenmessers wieder auf den bestmöglichen Zustand zurückgesetzt werden. Wird häufig instandgesetzt, reduziert sich zwar die Durchlaufzeit der als kritisch kategorisierten Aufträge, es nimmt aber auch die Auslastung ab und das Werkzeug (Scherenmesser) wird nicht optimal ausgenutzt.

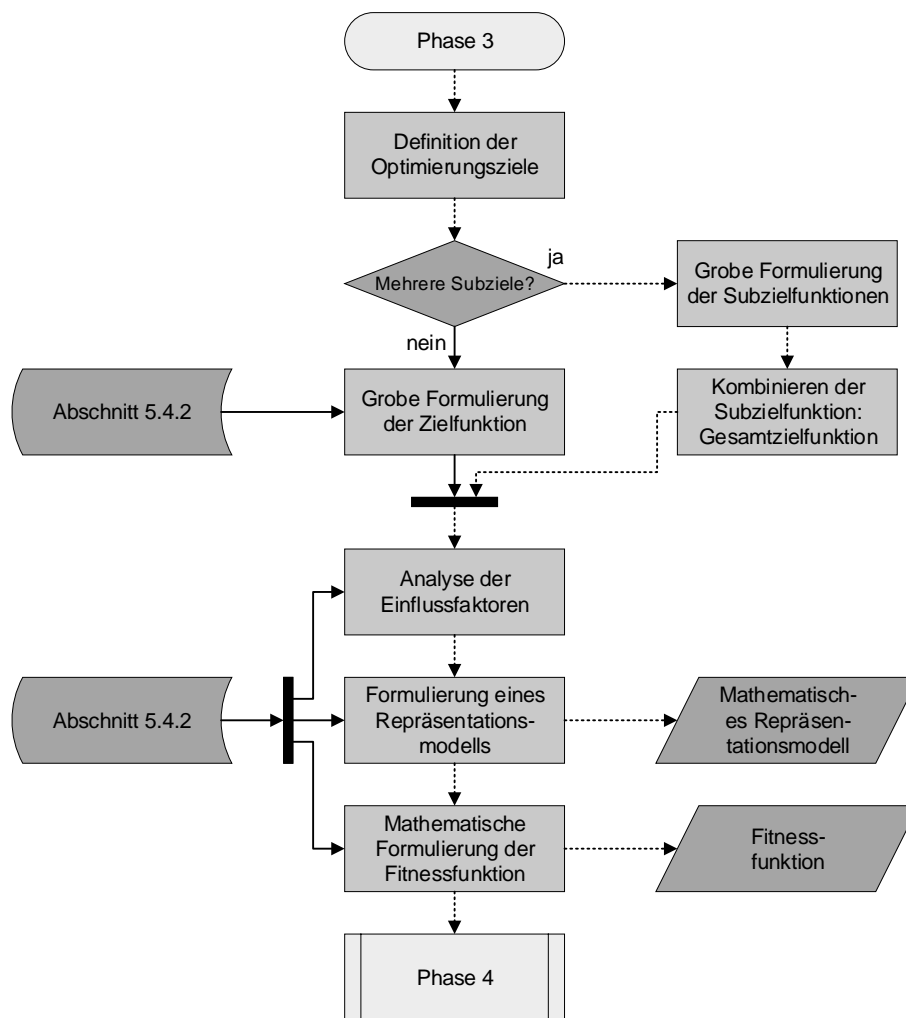


Abbildung 6.8: Fallstudie 1: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 3

optimieren, wird der Instandsetzungsaufwand als weitere Subzielgröße modelliert. Werden alle Subziele kombiniert, ergibt sich in Summe die folgende Fitnessfunktion:

$$F(\vec{x}) = w_1 \cdot S_1(\vec{x}) + w_2 \cdot S_2(\vec{x}) + w_3 \cdot S_3(\vec{x}) + w_4 \cdot S_4(\vec{x}) \quad (6.5)$$

mit

- S_1 ... Termintreue
- S_2 ... Auslastung
- S_3 ... Bestand
- S_4 ... Instandsetzung

Die Gewichtungsfaktoren (w_1, w_2, w_3, w_4) werden als Gleitkommazahlen im Intervall $[0, 1]$ definiert und können je nach Situation beliebig angepasst werden. Um die Subzielfunktionen (S_1, S_2, S_3, S_4),

die unterschiedliche Ziele beschreiben, sinnvoll vergleichen zu können, werden, wie in Abschnitt 5.4.2 vorgeschlagen, Kostenfunktionen verwendet. Die Termintreue wird mittels virtueller Verzugskosten modelliert, der Auslastung werden wiederum die Maschinenstundensätze zu Grunde gelegt. Der Bestand wird kombiniert aus Kapitalbindungs- und Lagerkosten und im Instandsetzungsaufwand wird der mit Kosten bewertete Materialaufwand abgebildet.

Abbildung des Produktionsprozesses (Phase 3.2): Nachdem die Subzielfunktionen definiert sind, können die Abhängigkeiten zu einer variablen Größe (dem Reihenfolgevektor \vec{x}) formuliert werden. Die Reihenfolgeabhängigkeit der einzelnen Subzielfunktionen besteht darin, dass die Fertigungszeitpunkte und -maschinenzustände eines Auftrages A_i von dessen vorgelagertem Auftrag A_{i-1} abhängen. Zur mathematischen Abbildungen dieses Sachverhaltes muss die Fitness eines Reihenfolgeplanes iterativ berechnet werden. Basierend auf Startwerten (Startzeitpunkt, Startzustand in HP) verändert der erste eingeplante Auftrag A_1 den Zustand des Produktionssystems (organisatorisch und physisch). Der aktualisierte Zustand bildet nun den Ausgangszustand für den Folgeauftrag A_2 (vgl. Abbildungen 5.6 und 5.7). Die veränderlichen Zustände, die für die in Gleichung 6.5 dargestellten Subzielfunktionen von Relevanz sind, sind dabei (i) die Zeit (Start- bzw. Endzeitpunkt eines Auftrages im Reihenfolgeplan) und (ii) der Maschinenzustand. Die Modellierung der Reihenfolgeabhängigkeit erfolgt dabei wie in Abbildung 6.9 dargestellt.

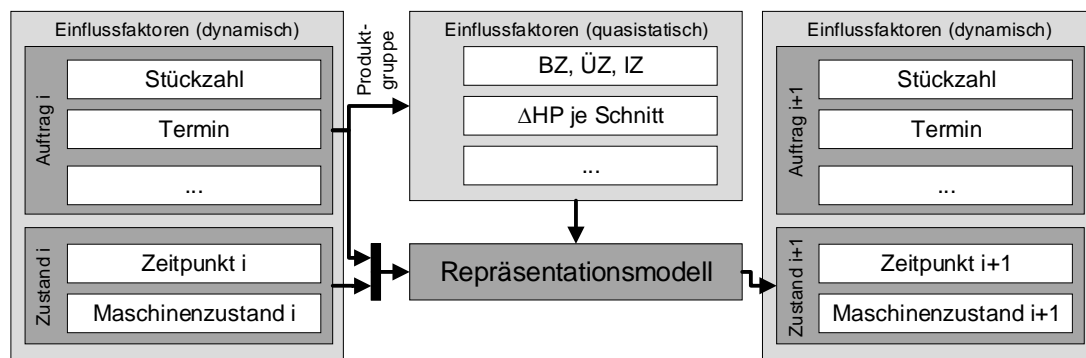


Abbildung 6.9: Modellierung der Reihenfolgeabhängigkeit (Fallstudie 1)

Aus den Auftragsinformationen (von Auftrag A_i) werden Daten über Qualität, Stückzahl und Termin extrahiert. Basierend auf einer Zuordnung des Auftrages zu einer Produktgruppe¹³¹ können Bearbeitungs-, Übergangs-¹³² und Instandsetzungszeit (BZ, ÜZ, IZ) sowie Zustandsabhängigkeiten abgeleitet werden. Die auftragspezifischen Daten werden im Repräsentationsmodell mit dem Ausgangszustand kombiniert und es kann der Folgezustand ($i + 1$) berechnet werden. Der Zeitpunkt Z_{i+1} ergibt sich wie in Gleichung 6.6 dargestellt (mit der Schnittanzahl n_i von Auftrag A_i). Für den Zustand des Scherenmessers nach der Bearbeitung von Auftrag A_i kann Gleichung 6.7

¹³¹Dabei ist die Hilfsfunktion $PG()$ zu beachten, die einen Auftrag zu seiner Produktgruppe zuordnet (vgl. Gleichung 6.3).

¹³²Die Übergangszeit ist abhängig vom vorherigen Auftrag $\ddot{U}Z = f(A_i, A_{i-1})$. Werden zwei ähnliche Aufträge nacheinander gefertigt, so ist $\ddot{U}Z$ im Allgemeinen kürzer (z.B. kein Rüsten notwendig), als wenn zwei unterschiedliche Aufträge aufeinanderfolgen.

herangezogen werden. Die Funktion $IH()$ erfasst basierend auf den Zustandsabhängigkeiten von Auftrag A_i und dem aktuellen Maschinenzustand HP , ob vor der Fertigung von Auftrag A_i eine Instandsetzung notwendig ist.

$$Z_{i+1} = Z_i + \dot{U}Z(PG(A_i), PG(A_{i-1})) + n_i \cdot BZ(PG(A_i)) + IZ \cdot IH(PG(A_i), HP) \quad (6.6)$$

$$HP_{i+1} = \begin{cases} HP_i + n_i \cdot \Delta HP(PG(A_i)) & IH(A_i) = 0 \\ 1 & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (6.7)$$

Aus Gleichungen 6.6 und 6.7 wird die eingangs erwähnte, iterative Abhängigkeit im Reihenfolgeplan sichtbar. Um den Zustand zu einem Zeitpunkt i zu erfassen, müssen alle vorhergehenden Zwischenzustände berechnet werden (vgl. Abbildung 5.7 Abschnitt 5.4.3). Die Zeitpunkte und Maschinenzustände sind die essentiellen Einflussfaktoren für die Subzielfunktionen. Die Abhängigkeiten ergeben sich dabei wie folgt:

- **Termintreue:** Die Termintreue wird in der Form von virtuellen Terminverzugskosten abgebildet. Dabei wird die Verzugszeit (Verspätung) mit dem Auftragswert und einem Verzinsungssatz bewertet. Die Verzugskosten sind daher umso höher, je größer die Verspätung und höher der Auftragswert. Die reihenfolgeabhängigen Terminverzugskosten eines Auftrages A_i ergeben sich dabei folgendermaßen:

$$K_{verz}(A_i) = \begin{cases} 0 & ZE(A_i) - Z_i \geq 0 \\ c_{verz} \cdot W(A_i) \cdot (Z_i - ZE(A_i)) & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (6.8)$$

mit

c_{verz}	...	Terminverzugszinsen
$W(A_i)$...	Auftragswert von A_i
$ZE(A_i)$...	Eckendtermin von A_i

Der gesamte Subzielfunktionswert für die Termintreue ergibt sich aus der Summe der Terminverzugskosten:

$$S_1 = - \sum_i K_{verz}(A_i) \quad (6.9)$$

- **Auslastung:** Die Auslastung wird über einen Maschinenstundensatz bewertet. Je länger es dauert einen Auftrag bzw. eine Reihe an Aufträgen zu fertigen, desto höher sind auch die

Kosten. Die Zeit setzt sich dabei aus Bearbeitungszeit, Übergangszeit und Instandsetzungszeit zusammen. Die reihenfolgeabhängigen Fertigungskosten eines Auftrages A_i ergeben sich folgendermaßen:

$$K_M(A_i) = c_M \cdot (n_i \cdot BZ(PG(A_i)) + \ddot{U}Z(PG(A_i), PG(A_{i-1})) + IZ \cdot IH(PG(A_i), HP)) \quad (6.10)$$

mit Berücksichtigung von Gleichung 6.6 ergibt sich daraus:

$$K_M(A_i) = c_M \cdot (Z_i - Z_{i-1}) \quad (6.11)$$

mit

c_M ... Maschinenstundensatz

Der gesamte Subzielfunktionswert für die Auslastung ergibt sich aus der Summe der Fertigungskosten:

$$S_2 = - \sum_i K_M(A_i) \quad (6.12)$$

- **Bestand:** Die Bestandskosten werden als Kombination aus Kapitalbindungskosten und Lagerkosten modelliert. Während erstere vom Auftragswert und der Liegezeit abhängen, sind letztere abhängig von der benötigten Lagerfläche und der Zeit. Die Bestandskosten eines Auftrages A_i ergeben sich dabei folgendermaßen:

$$K_B(A_i) = K_{B:KB}(A_i) + K_{B:LK}(A_i) \quad (6.13)$$

mit

$K_{B:KB}(A_i)$... Kapitalbindungskostenfunktion von A_i

$K_{B:LK}(A_i)$... Lagerkostenfunktion von A_i

Der gesamte Subzielfunktionswert für den Bestand ergibt sich aus der Summe der Bestandskosten:

$$S_3 = - \sum_i K_B(A_i) \quad (6.14)$$

- **Instandsetzung:** Die Instandsetzung wird in Form der Materialkosten für eine Instandsetzungstätigkeit berücksichtigt.¹³³ Für einen Auftrag wird der Instandsetzungsaufwand mit dem Instandsetzungsindikator $IH()$ folgendermaßen formuliert:

$$K_{IH} = \begin{cases} 0 & IH(PG(A_i), HP) = 0 \\ c_{IH} & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (6.15)$$

Analog zu den anderen Subzielfunktionen ergibt sich der gesamte Subzielfunktionswert für die Instandsetzung als Summe der Instandsetzungsaufwände:

$$S_4 = - \sum_i K_{IH}(A_i) \quad (6.16)$$

Eine Visualisierung des Repräsentationsmodells ist in Anhang A.3.3 (Abbildung A.14) dargestellt.

6.2.6 Entwicklung einer WMBPRO an einer Tafelblechschere: Phase 4

Um die in Abschnitt 6.2.5 entwickelte Fitnessfunktion zu optimieren, ist ein geeigneter Optimierungsalgorithmus notwendig. Betrachtet man das modellierte Produktionssystem, so ist zu erkennen, dass keine harten Nebenbedingungen formuliert wurden. Führt ein Produktionsreihenfolgeplan zu erhöhtem Terminverzug, so bewirkt dies erhöhte Terminverzugskosten sowie reduzierte Fitness, jedoch keinen Ausschluss des Produktionsreihenfolgeplans. Ein ähnlicher Zusammenhang besteht bei der Betrachtung der (physischen) Zustandsabhängigkeiten. Ein Produktionsreihenfolgeplan, der bei einem niedrigen Maschinenzustand einen kritischen Auftrag (erhöhte HP_{min}) einplant, wird durch einen erhöhten Instandsetzungsaufwand bestraft (bevor der kritische Auftrag gefertigt werden darf, muss der Maschinenzustand zunächst wieder erhöht werden). Dadurch ist jeder mögliche Reihenfolgeplan grundsätzlich valide, wenn auch manche Produktionsreihenfolgepläne aus praktischer Sicht nicht sinnvoll erscheinen. Zur Optimierung der Fitness können, ohne weitere Einschränkungen, direkt Metaheuristiken in der Form eingesetzt werden, wie sie in Abschnitt 5.5.1 formuliert wurden. Für die Permutationen des Reihenfolgevektors \vec{x} müssen dabei keine harten Nebenbedingungen überprüft werden.¹³⁴ Dabei erfolgt die Entwicklung des Optimierungsalgorithmus dem in Abbildung 6.10 dargestellten Prozess folgend (die punktierte Linie entspricht dem für Fallstudie 1 aktiven Prozessverlauf).

Im Rahmen der Formulierung des Optimierungsalgorithmus für Fallstudie 1 wurden die folgenden Metaheuristiken getestet und gegenübergestellt:

¹³³Die Instandsetzungstätigkeit wird von den Maschinenbedienern durchgeführt und führt zu einer nicht-produktiven Maschine während der Dauer der Instandsetzung. Diese zeitliche Abhängigkeit ist bereits in der Subzielfunktion Auslastung berücksichtigt.

¹³⁴Eine Ausnahme bildet die Nebenbedingung hinsichtlich der Validität von \vec{x} : jeder der zu beplanenden Aufträge muss genau einmal in \vec{x} vorkommen. Die Position eines Auftrages korrespondiert mit seiner Position in der Produktionsreihenfolge.

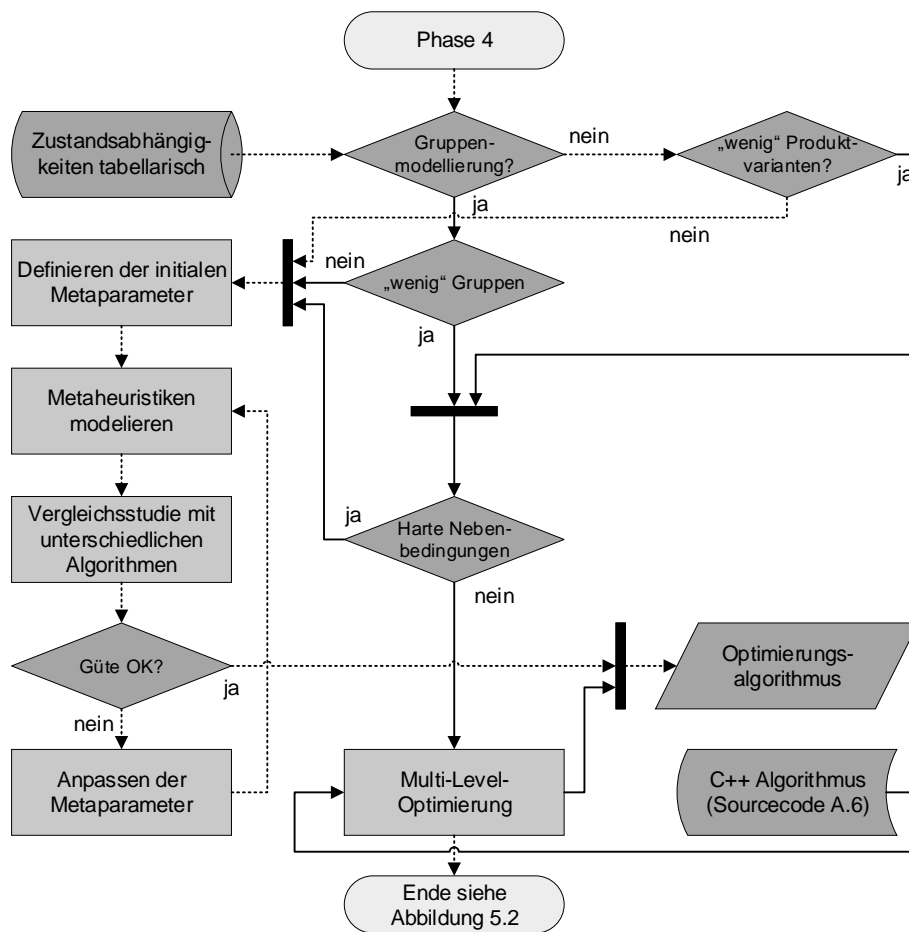


Abbildung 6.10: Fallstudie 1: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 4

- **Hill-Climb:** Aufgrund der Einfachheit in der Implementierung, wurde zunächst ein HIC erstellt, der ausgehend von einer zufälligen Lösung (Start: zufällige Permutation von \vec{x}) den Fitnesswert sukzessive optimiert. Inhärenter Nachteil des Optimierers ist, dass er lokale Optima nicht überwinden kann – dem steht jedoch der Vorteil einer geringen Berechnungsdauer je Iteration gegenüber.
- **Genetischer Algorithmus:** In der Literatur existieren viele unterschiedliche GA Implementierungen. Für die Fallstudie wurde ein Algorithmus in Anlehnung an Algorithmus 5.4 mit einem Kreuzungsoperator, wie in Algorithmus 5.5 dargestellt, verwendet. Als Mutationsoperator wurde das Generieren einer Nachbarlösung, wie in Algorithmus 5.3 dargestellt, implementiert.
- **Simulated Annealing:** SA bietet einerseits den Vorteil der Einfachheit (Analogie zu HIC) und hat gleichzeitig die Fähigkeit, lokalen Optima zu entfliehen. Im Rahmen von Fallstudie 1 wurde ein SA in Analogie zu Algorithmus 5.2 implementiert, der Nachbarlösungen durch ein Vertauschen zweier Einträge in der Ausgangslösung bildet (vgl. Algorithmus 5.3).

Zur Gegenüberstellung der Optimierungsalgorithmen wurden Vergleichsstudien mit unterschiedlichen Iterationen zwischen den Algorithmen¹³⁵ durchgeführt. Für die Vergleichsstudien wurde ein repräsentatives Datenset verwendet und je Algorithmus wurden zehn Durchläufe mit jeweils unterschiedlichen Startlösungen (zufällig generiert)¹³⁶ durchgeführt. Die Ergebnisse der Vergleichsstudien sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.¹³⁷ Zur Gegenüberstellung der Optimierungsgüten der Algorithmen wird die Metrik F_{norm} verwendet (vgl. Gleichung A.1), die den historischen Fitnesswert jenem Fitnesswert, der durch den Einsatz einer WMBPRO erzielt werden kann, gegenüberstellt.

Tabelle 6.3: Gegenüberstellung unterschiedlicher Metaheuristiken (Fallstudie 1)

Alg.	ID	Iterationen	Dauer in s	$\min(F_{norm})$	\bar{F}_{norm} ¹³⁸	$\max(F_{norm})$	Std. Abw.
HIC	1	$1 \cdot 10^2$	$2,36 \cdot 10^{-1}$	0,99309	1,05180	1,07617	0,02117
	2	$5 \cdot 10^2$	$9,56 \cdot 10^{-1}$	1,10140	1,11449	1,11988	0,00506
	3	$1 \cdot 10^3$	$1,80 \cdot 10^0$	1,12294	1,12584	1,12648	0,00141
	4	$1 \cdot 10^4$	$1,84 \cdot 10^1$	1,13848	1,14070	1,14191	0,00093
	5	$1 \cdot 10^5$	$1,82 \cdot 10^2$	1,14104	1,14254	1,14373	0,00070
GA	6	$1 \cdot 10^2$	$5,25 \cdot 10^{-1}$	1,03807	1,04619	1,05657	0,00553
	7	$5 \cdot 10^2$	$2,23 \cdot 10^0$	1,06030	1,06878	1,07713	0,00507
	8	$1 \cdot 10^3$	$4,32 \cdot 10^0$	1,06935	1,08136	1,08751	0,00522
	9	$1 \cdot 10^4$	$4,48 \cdot 10^1$	1,12549	1,13080	1,13080	0,00191
	10	$1 \cdot 10^5$	$4,48 \cdot 10^2$	1,11065	1,13525	1,14183	0,01265
SA	11	$1 \cdot 10^2$	$2,35 \cdot 10^{-1}$	1,01911	1,04622	1,07765	0,01935
	12	$5 \cdot 10^2$	$9,49 \cdot 10^{-1}$	1,10811	1,11191	1,11537	0,00205
	13	$1 \cdot 10^3$	$1,73 \cdot 10^0$	1,12261	1,12470	1,12896	0,00204
	14	$1 \cdot 10^4$	$1,84 \cdot 10^1$	1,13856	1,14024	1,14122	0,00083
	15	$1 \cdot 10^5$	$1,95 \cdot 10^2$	1,14105	1,14305	1,14378	0,00076

Die Ergebnisse der Vergleichsbetrachtung sind in Abbildung 6.11 als Boxplot visualisiert. Bei einer niedrigen Laufzeit¹³⁹ des Optimierers (geringe Anzahl an Iterationen), ist zu erkennen, dass der HIC Algorithmus die vergleichsweise besten Lösungen liefert. Es werden keine Iterationen für Alternativpfade (SA) verwendet oder Rechenleistung zur Berechnung der Population (GA) aufgewendet. Mit höher werdender Iterationsanzahl wird jedoch ersichtlich, dass der HIC an einem lokalen Optimum gefangen ist – eine weitere Erhöhung der Iterationsanzahl führt zu keiner zusätzlichen Verbesserung. Demgegenüber kann SA dem lokalen Optimum entkommen und liefert bessere Ergebnisse. Wie in der Literatur hervorgehoben wird (vgl. z.B. Konak et al., 2006, S. 992), eignet sich der GA prinzipiell gut für multikriterielle Probleme und wird häufig im Kontext des Scheduling und Sequencing eingesetzt (vgl. Abedinnia et al., 2017). Der im Rahmen von Fall-

¹³⁵Beim SA wurde die Initialtemperatur auf 100 gesetzt und Alpha als 0,9995 parametrisiert. Für den GA wurde eine Population von 25 mit einer Kreuzungswahrscheinlichkeit von 0,99 und einer Mutationswahrscheinlichkeit von 0,45 festgelegt.

¹³⁶Zur Generierung einer zufälligen Permutation wurde die numpy Funktion „np.random.permutation()“ auf den Reihenfolgevektor \vec{x} angewandt (van der Walt et al., 2011).

¹³⁷Die Einträge in Tabelle 6.3 entsprechen den Mittelwerten der Vergleichsdurchläufe.

¹³⁹Die Algorithmen wurden zur Vergleichsbetrachtung in Python implementiert. Die Laufzeiten wurden allesamt an demselben Rechner erhoben, wodurch die Vergleichbarkeit gewährleistet werden kann.

studie 1 entwickelte GA bleibt jedoch hinsichtlich seiner Performance hinter dem SA zurück.¹⁴⁰

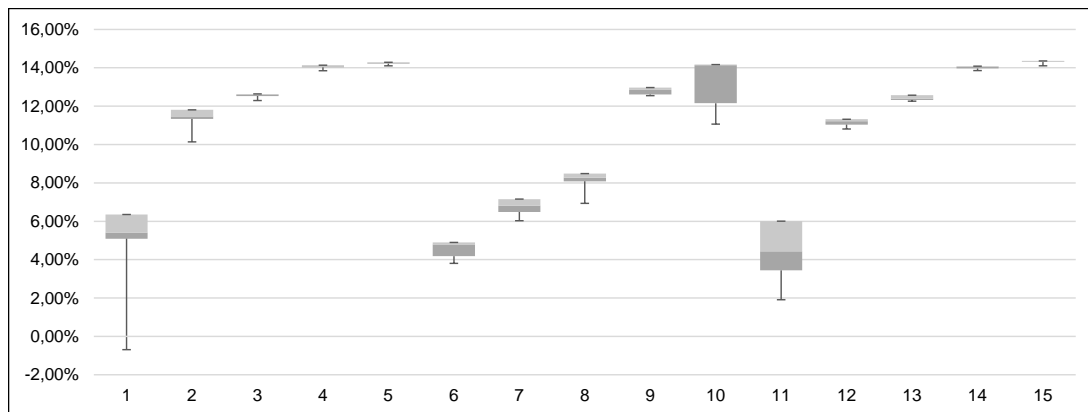


Abbildung 6.11: Boxplot: Gegenüberstellung Metaheuristiken (Fallstudie 1), die IDs sind bezogen auf Tabelle 6.3

Basierend auf der Vergleichsbetrachtung wurde für Fallstudie 1 der Simulated Annealing Algorithmus ausgewählt, der in C++ implementiert wurde, um eine weitere Erhöhung der Performance zu ermöglichen.

6.2.7 Nutzenquantifizierung

Um den Nutzen des in Fallstudie 1 entwickelten WMBPRO Algorithmus zu quantifizieren, wurde auf eine historienbasierte Auswertung zurückgegriffen. Für die Bewertung wurde ein Zeitraum von 8 Monaten herangezogen.

Dabei wird zunächst aus dem ERP-System die Produktionshistorie extrahiert, woraus (a) die jeweils tagesaktuellen historischen Bestandssituationen rekonstruiert und (b) die historischen Produktionsreihenfolgen abgebildet werden können. Durch Anwendung der WMBPRO auf (a) wird eine optimierte Produktionsreihenfolge berechnet, die einen Fitnesswert F_{WMBPRO} aufweist. Wendet man die Fitnessfunktion (vgl. Abschnitt 6.2.5) auf (b) an, entsteht der Fitnesswert F_{hist} der historisch realisierten Produktionsreihenfolge. Um die einzelnen Fitnesswerte unterschiedlicher Zeitpunkte vergleichen zu können (die absoluten Fitnesswerte schwanken stärker und sind u.a. abhängig von der Anzahl an Aufträgen im verfügbaren Bestand), wird, wie in Abschnitt 6.2.6 die Metrik F_{norm} (vgl. Gleichung A.1) verwendet, die den Fitnesswert der WMBPRO und den historischen Fitnesswert kombiniert. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung für den Betrachtungszeitraum sind in Tabelle 6.4 dargestellt.¹⁴¹

In Tabelle 6.4 ist zu erkennen, dass F_{norm} im Intervall $[1,06, 1,13]$ um einen Mittelwert von 1,1001 schwankt. Um den Nutzen in intuitiver Form darzustellen, wird F_{norm} mit Gleichung 6.17 in eine

¹⁴⁰Dies kann, zum Beispiel, an dem Kreuzungsoperator liegen, der aufgrund zeitlicher und finanzieller Restriktionen nicht ausreichend an das Problem angepasst werden konnte.

¹⁴¹Um den Aufwand zur Nutzenquantifizierung zu begrenzen und gleichzeitig einen möglichst langen Betrachtungszeitraum zu berücksichtigen, wurde eine Gegenüberstellung je Monat durchgeführt. Dabei entspricht eine Zeile in Tabelle 6.4 einem Produktionsplan, der mit der Bestandssituation zum jeweils Monatsersten erstellt wurde. Eine tageweise Betrachtung ist für ein Beispielmonat in Anhang A.3 dargestellt.

Tabelle 6.4: Nutzenbewertung (Fallstudie 1)

Datensatz	Reichweite in Tagen	HP Start	F_{norm}
Monat A	4,00	4,00	1,09952
Monat B	4,86	7,22	1,12719
Monat C	4,77	9,13	1,12946
Monat D	5,19	8,51	1,11964
Monat E	4,58	8,01	1,07878
Monat F	3,99	9,22	1,11745
Monat G	3,68	6,13	1,06776
Monat H	2,78	6,00	1,06107

prozentuale Form umgewandelt – F_{proz} ist die prozentuale Verbesserung, die durch den Einsatz einer WMBPRO in der Fallstudie erzielt werden kann.

$$F_{proz} = (F_{norm} - 1) \cdot 100\% \quad (6.17)$$

Im Betrachtungszeitraum lässt sich durch den Einsatz der entwickelten WMBPRO im Mittel eine Verbesserung der Fitness gegenüber einer manuellen Produktionsreihenfolgeplanung in der Höhe von 10,01 % erzielen.

Nutzen durch Integration der WMBPRO: Die WMBPRO in Fallstudie 1 wurde in der Form eines interaktiven GUIs (Graphical User Interface) in die vorhandene IT-Plattform des Anwendungspartners integriert. Die GUI bietet dabei die folgenden Interaktionsmöglichkeiten:

- Die Startparameter (z.B. Startzeitpunkt der Planung) sowie die Gewichtungsfaktoren der multikriteriellen Zielfunktion können parametrisiert werden.
- Der WMBPRO Algorithmus zur automatisierten Erstellung eines Produktionsreihenfolgeplanes kann ausgelöst werden.¹⁴² Die Optimierungsergebnisse werden in tabellarischer Form dargestellt und die Veränderung des Zustandes wird in Form eines Diagramms visualisiert.
- Die Lösungstabelle kann zur physischen Lokalisierung der Aufträge (Vernetzung mit dem Materialtrackingsystem) verwendet werden.
- Die automatisch generierten Produktionsreihenfolgepläne können von den zuständigen Produktionsplanern bei Bedarf manuell angepasst werden. Bei Änderungen erhalten die Planer direkt Feedback hinsichtlich der Auswirkungen der durchgeführten Änderungen auf die Fitnessfunktion.

¹⁴²Die zur WMBPRO in Fallstudie 1 notwendigen Daten werden dabei automatisch aus den notwendig Datentabellen ausgelesen und verarbeitet.

Durch die Instrumentalisierung der WMBPRO im Rahmen von Fallstudie 1 in der beschriebenen Form ergibt sich ein qualitativer Nutzen für die Produktionsplanung:

- Die Planer werden entlastet, da Reihenfolgepläne automatisiert erstellt werden können. Somit wird auch Objektivität gewährleistet (die Pläne sind nicht mehr von subjektiven Einschätzungen unterschiedlicher Personen abhängig).
- Die Interaktionsmöglichkeiten (Anpassen der automatisch generierten Reihenfolgen) schaffen Transparenz über die Auswirkung manueller Änderungen von Produktionsreihenfolgen (direkte Auswirkung auf die Fitnessfunktion ersichtlich).

6.2.8 Conclusio der Fallstudie

Zusammenfassung: Im Rahmen von Fallstudie 1 wurde das in Abschnitt 5 vorgestellte Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO angewandt und eine zustandsbedingte Produktionsreihenfolgeoptimierung wurde an einer Pilotanlage (Tafelblechschere) entwickelt. Dazu wurde in Abschnitt 6.2.3 ein Machine-Learning basiertes Condition Monitoring System zur datenbasierten Bewertung der Scherenmesserzustände erstellt. Die objektive Zustandsbewertung wurde in Abschnitt 6.2.4 instrumentalisiert, um eine produktgruppenspezifische Zustandsklassifizierung der an der Pilotanlage gefertigten Produkte durchzuführen. Basierend auf der Modellierung der Zustandsabhängigkeiten konnte in Abschnitt 6.2.5 das Produktionssystem aus Sicht der Produktionsreihenfolgeoptimierung modelliert und eine Fitnessfunktion abgeleitet werden. In Abschnitt 6.2.6 wurden Metaheuristiken zum Lösen des Reihenfolgeproblems gegenübergestellt und ein Simulated Annealing Algorithmus ausgewählt, der, wie in Abschnitt 6.2.7 dargestellt, im Mittel zu einer Verbesserung der Fitness von 10,01 % gegenüber der manuellen Produktionsreihenfolgeplanung führt. Zudem entlastet das entwickelte Unterstützungswerkzeug die Planer in der komplexen Planungstätigkeit. Zusammenfassend kann der Nutzen einer WMBPRO in der Instanziierung an der Pilotanlage (Tafelblechschere) bestätigt werden.

Ergebnisse, Restriktionen und weiterer Forschungsbedarf: Für das in Fallstudie 1 instanziierte Problem „Produktionsreihenfolgeoptimierung an einer Tafelblechschere“ wurde das in Abschnitt 5 vorgestellte Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO angewandt. Wie in der Forschungsmethodologie (vgl. Abschnitt 1.4.3) vorgestellt, bilden die präsentierten Fallstudien dabei, kombiniert mit dem Entwicklungsprozess, den Design Zyklus der vorliegenden Arbeit.¹⁴³ Die finale Version des entwickelten Phasenmodells (vgl. Abschnitt 5) konnte im Rahmen von Fallstudie 1 an der Pilotanlage (Tafelblechschere) angewandt werden, um ein WMBPRO zu entwickeln, das einen positiven Nutzen aufweist.

¹⁴³Aus einem initialen Phasenmodell und dessen Anwendung im Rahmen der Fallstudie wird Verbesserungspotential ersichtlich, das weitere Iterationen im Design Zyklus anstößt. Neben Fallstudie 1 wurde auch Fallstudie 2 (vgl. Abschnitt 6.3) in den Design Zyklus integriert.

Aufgrund zeitlicher und finanzieller Restriktionen konnten in Abschnitt 6.2.6 keine weiteren Metaparameterstudien durchgeführt werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht daher für detailliertere Analysen der Metaparameter und ihre Auswirkungen auf die Fitnessfunktionen sowie für das Testen unterschiedlicher Operatoren der Algorithmen GA (Kreuzungs- und Mutationsoperatoren) und SA (Generieren von Nachbarlösungen). Zudem liefert Fallstudie 1 keine Aussagen zur Validität der Teilmethode „Klassifizierung einer mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeit“, da im beschriebenen Beispiel nur eine eindimensionale Zustandsabhängigkeit vorherrschend war. Hinsichtlich der im Phasenmodell vorgeschlagenen Methode zur Multi-Level-Optimierung kann keine Aussage hinsichtlich der Validität getroffen werden, da die Alternativmethode (Metaheuristiken) eingesetzt wurde. Würden die einzelnen Produktgruppen weiter zusammengefasst und in Form einer überschaubaren Anzahl an Zustandsgruppen abgebildet werden, könnte die Optimierung auch als Multi-Level-Optimierung abgebildet werden. Um die praktische Anwendung der Multi-Level-Optimierung darzustellen, werden in Fallstudie 2 (Abschnitt 6.3.6) zwei dieser Ansätze verfolgt werden.

6.3 Fallstudie 2: WMBPRO an einem Walzgerüst

6.3.1 Ausgangssituation und Rahmenbedingungen

Die Anlage in der zweiten Fallstudie ist ein Duo Walzgerüst, das Tafelbleche in den unterschiedlichsten Legierungen walzt (an der Anlage gibt es Rezepte für etwa 600 verschiedene Qualitäten). Zudem variieren die Abmessungen von Vormaterial und fertigem Tafelblech. Im Laufe der Walzenreise,¹⁴⁴ die je nach Produktionsprogramm zwischen 10 und 20 Tagen dauert, beanspruchen die Bleche die Walze und die Blechprofile prägen sich in die Walzen ein (schematische Darstellung in Abbildung 6.12). Dabei beschreibt Zustand (a) eine Walze am Beginn der Walzenreise, in Zustand (b) weist die Walze bereits etwas Profil auf und in Zustand (c) ist ein starkes Profil vorhanden. Würde in Zustand (c) ein breites Tafelblech (Breite > Profil) gewalzt werden, würde sich

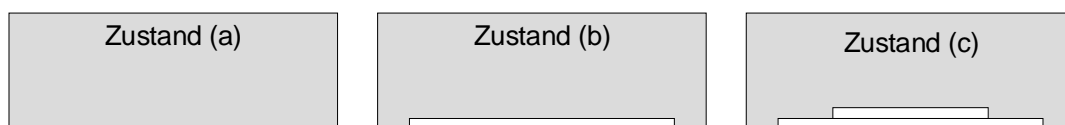


Abbildung 6.12: Zunehmende Walzeneinkerbung (Fallstudie 2)

das Profil der Walze im Blech einwalzen und es würde mindere Qualität entstehen. Daher ist der Walzenzustand ein essentielles Kriterium für die Produktionsreihenfolgeplanung an der Anlage und muss zur Sicherstellung einer hohen Qualität berücksichtigt werden.

Die unterschiedlichen Legierungstypen weisen je nach metallurgischer Zusammensetzung unterschiedliche Walztemperaturen auf (im Bereich 840°C bis 1.100°C) und der dem Walzgerüst vor-

¹⁴⁴Eine Walzenreise ist die Zeit zwischen den Instandsetzungszyklen der Walze.

gelagerte Ofen muss zwischen den unterschiedlichen Aufträgen entsprechend aufgeheizt bzw. abgekühlt werden. Die Temperaturänderungen sind dabei mit Energie- und Zeitaufwand verbunden.

Aus Produktionsplanungssicht stellt das Walzgerüst eine wichtige Anlage dar – ein Großteil der Aufträge, die sich danach in separate Wertströme aufteilen, werden an der Anlage bearbeitet. Eine optimierte Auslastung wirkt sich somit positiv auf den ganzen Wertstrom aus. Aufgrund der Zustandsabhängigkeiten ist die gezielte Anwendung konventioneller Produktionsreihenfolgeoptimierung nicht möglich, weshalb die Produktionsplanung im Ausgangszustand manuell auf lokaler Ebene durch die Teamleiter durchgeführt wurde.

6.3.2 Aufgabenstellung der Fallstudie

Im Rahmen der Fallstudie soll ein Optimierungsmodell entwickelt werden, welches ermöglicht, die Abarbeitungsreihenfolgen der am Walzgerüst verfügbaren Aufträge dahingehend anzupassen, dass die Aufheiz- und Abkühlungszyklen möglichst minimal werden. Dadurch kann (i) Energie eingespart und (ii) die Auslastung maximiert werden (weniger Energie- und Zeitverlust durch Aufheiz- und Abkühlungsvorgänge). Als Nebenbedingung ist die interne Termintreue zu berücksichtigen.

Zur Lösung wird die in Abschnitt 5 entwickelte Vorgehensweise zur Entwicklung einer WMBPRO angewendet. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen der Entwicklung aus Praxisperspektive im Kontext von Fallstudie 2 vorgestellt. Die Fallstudie endet mit einer Gegenüberstellung der erzielten Planungsergebnisse im pre-WMBPRO Zustand und im post-WMBPRO Zustand im Rahmen einer Nutzenbetrachtung.

6.3.3 Entwicklung einer WMBPRO an einem Walzgerüst: Phase 1

Am Walzgerüst besteht eine Werkzeugzustandsabhängigkeit der Produkte gegenüber des Walzenzustandes (vgl. Abbildung 6.12). Weist die Walze aufgrund vorhergehender Aufträge bereits ein Profil auf, so dürfen nur mehr jene Aufträge gewalzt werden, die vom Profil nicht beeinflusst werden und somit gilt $\text{Blechbreite} < \text{Profilbreite}$.¹⁴⁵ Dabei lässt sich der aktuelle Zustand der Walze, ohne eine explizite Messung durchzuführen, basierend auf dem Produktionsprogramm (seit Beginn der Walzenreise gefertigte Aufträge) ableiten.

Somit liegt in Phase 1 des Phasenmodells jene Situation vor, in der ein Condition Monitoring System bereits vorhanden ist. Die Anwendung des Phasenmodells in Fallstudie 2 ist in Abbildung 6.13 visualisiert (die punktierte Linie entspricht dem für Fallstudie 2 aktiven Prozessverlauf).

¹⁴⁵ Andernfalls würde man riskieren, dass sich das in den Walzen vorhandene Profil in die Tafelbleche einwalzt.

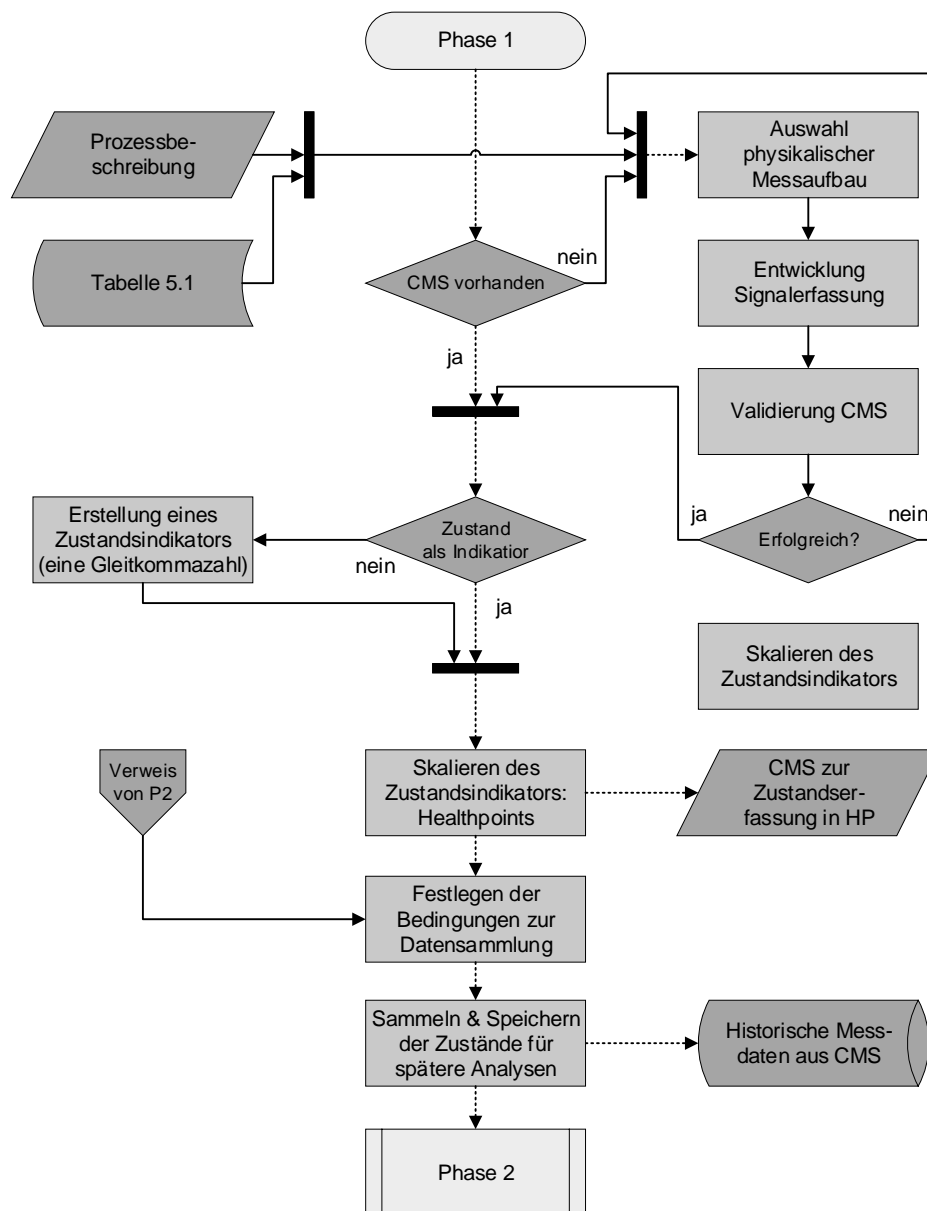


Abbildung 6.13: Fallstudie 2: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 1

6.3.4 Entwicklung einer WMBPRO an einem Walzgerüst: Phase 2

In Abbildung 6.14 ist die Anwendung des Phasenmodells in Phase 2 von Fallstudie 2 visualisiert (die punktierte Linie entspricht dem für Fallstudie 2 aktiven Prozessverlauf).

Das Walzgerüst weist eine eindimensionale Zustandsabhängigkeit zwischen den Produkten und dem Zustand der Walze auf. Die Zustandsabhängigkeit ist dabei abhängig von der Breite der Aufträge. Im Laufe der Walzenreise muss die Blechbreite kontinuierlich sinken, um zu vermeiden, dass sich ein in der Walze bildendes Profil in die Bleche einwalzt. Eine hypothetische Möglichkeit eine valide Produktionsreihenfolge zu bilden, ist dabei die an der Anlage verfügbaren Aufträ-

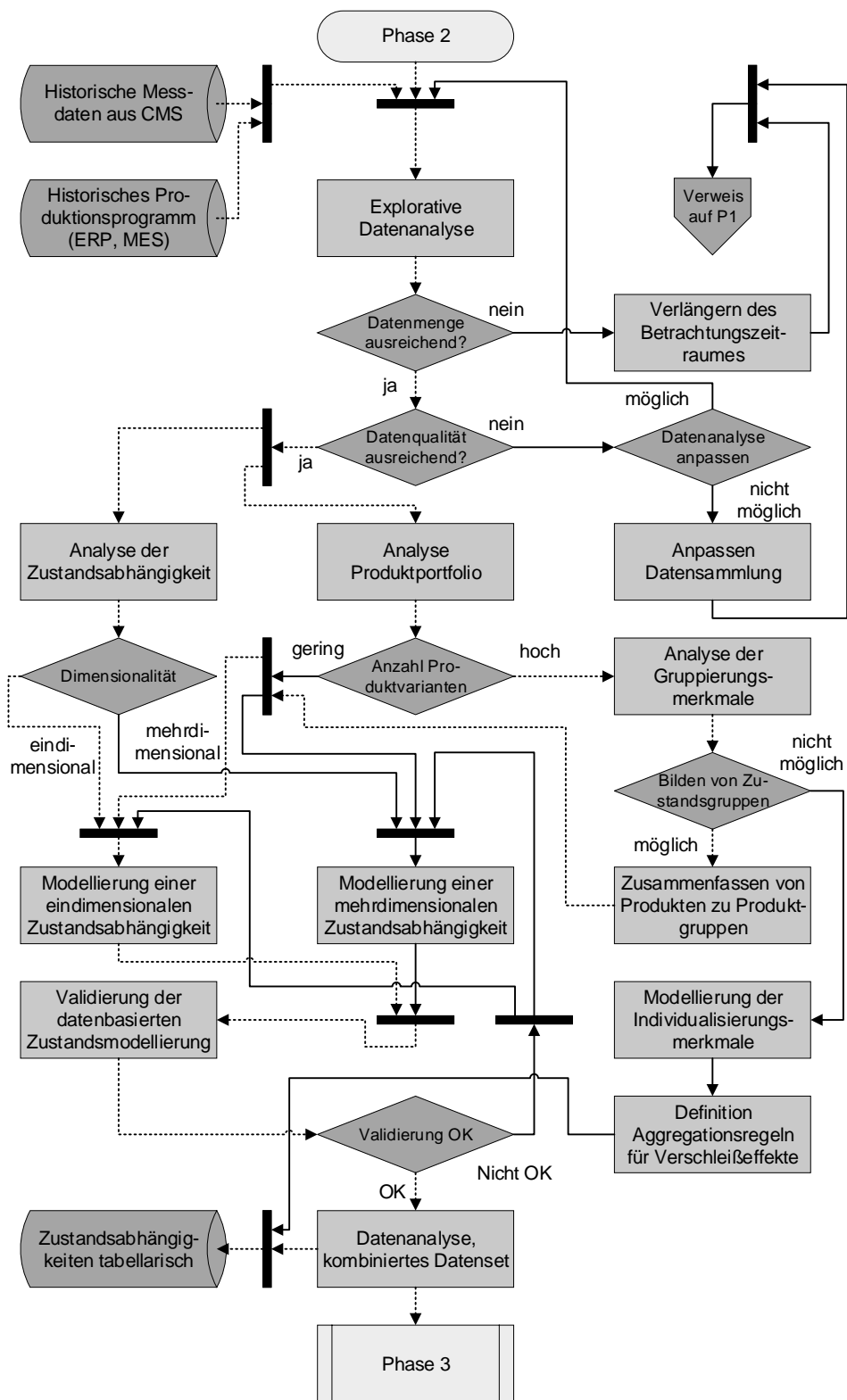


Abbildung 6.14: Fallstudie 2: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 2

ge der Breite nach absteigend zu sortieren. Mit diesem einfachen Sortierkriterium entsteht aber im Allgemeinen eine Produktionsreihenfolge, die in Bezug auf die Aufheiz- und Abkühlzyklen nicht optimal ist. Da die Aufträge nach dem Walzen noch auf Format zugeschnitten werden, ist es zulässig, die Aufträge nicht streng nach Breite zu sortieren, sondern anhand von Breitengruppen anzuordnen. In Zusammenarbeit mit Prozessexperten wurden die folgenden Breitengruppen (abgestimmt auf das Produktionsprogramm) definiert, die, der Nomenklatur des Phasenmodells folgend, als HP-Gruppen klassifiziert werden:

- HP-Gruppe 1, $HPG_1 : b > 2200\text{ mm}$
- HP-Gruppe 2, $HPG_2 : 2200\text{ mm} \leq b < 1900\text{ mm}$
- HP-Gruppe 3, $HPG_3 : 1900\text{ mm} \leq b < 1600\text{ mm}$
- HP-Gruppe 4, $HPG_4 : 1300\text{ mm} \leq b < 1200\text{ mm}$
- HP-Gruppe 5, $HPG_5 : 1200\text{ mm} \leq b < 1050\text{ mm}$
- HP-Gruppe 6, $HPG_6 : 1050\text{ mm} \leq b < 950\text{ mm}$
- HP-Gruppe 7, $HPG_7 : 950\text{ mm} \leq b < 800\text{ mm}$
- HP-Gruppe 8, $HPG_8 : b \leq 800\text{ mm}$

Durch diese Form der Modellierung liegt der Zustand der Walze nicht mehr in kontinuierlicher Form vor (vgl. Fallstudie 1, Abschnitt 6.2), sondern die HP entsprechen einem Wert einer diskreten Menge $HP \in (HPG_1, \dots, HPG_n)$ mit $n = 8$. Nachdem mit einer HP-Gruppe i begonnen wurde, darf keine HP-Gruppe $i - 1$ mehr an der aktuellen Walze bearbeitet werden. Die betroffenen Aufträge können erst wieder im Rahmen der nächsten Walzenreise gefertigt werden. Zur besseren Verständlichkeit sei ein kurzes theoretisches Beispiel dargestellt:

Aktuell befindet sich das Walzgerüst in HP-Gruppe 5 ($HP = HPG_5$) und im Bestand der Anlage befinden sich die folgenden Aufträge: A_1 mit einer Breite von $b_1 = 1100\text{ mm}$, A_2 mit $b_2 = 1250\text{ mm}$, A_3 mit $b_3 = 1150\text{ mm}$, A_4 mit $b_4 = 1020\text{ mm}$ und A_5 mit $b_5 = 1100\text{ mm}$. Die Aufträge A_3 und A_5 befinden sich wie auch A_1 in der HP-Gruppe 5 und können somit in beliebiger Reihenfolge abgearbeitet werden.¹⁴⁶ Auftrag A_2 befindet sich in HP-Gruppe 4 und dessen Bearbeitung ist aufgrund des aktuellen Walzenzustandes ($b_2 > \max(HPG_5)$) nicht mehr zulässig. Auftrag A_4 hingegen liegt in der HP-Gruppe 6 und darf aktuell gefertigt werden. Ist die Walze aber in HP-Gruppe 6 vorgerückt, dürfen Aufträge aus niedrigeren Gruppen nicht mehr bearbeitet werden.¹⁴⁷ Eine mögliche Reihenfolge wäre $\vec{x} = (A_1, A_3, A_5, A_4)$, wobei Auftrag A_2 aufgrund der Zustandsabhängigkeit exkludiert wurde – A_2 darf erst wieder bei der nächsten Walzenreise berücksichtigt werden.

Durch diese Logik wird sichergestellt, dass die Zustandsrestriktionen erfüllt sind und die zulässige Breite kontinuierlich sinkt.

¹⁴⁶Dazu gibt es $n! = 3! = 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6$ Möglichkeiten.

¹⁴⁷Das wäre beispielsweise der Fall bei der Reihenfolge $\vec{x} = (A_1, A_5, A_4)$. Dabei wird A_3 nicht rechtzeitig berücksichtigt und dürfte nach Auftrag A_4 nicht mehr gefertigt werden, da die HP-Gruppe bereits vorangeschritten ist.

6.3.5 Entwicklung einer WMBPRO an einem Walzgerüst: Phase 3

Wie in Abschnitt 6.3.2 hervorgehoben, ist es das Ziel von Fallstudie 2 eine Optimierungsmethode zu schaffen, die Aufheiz- und Abkühlungszyklen des dem Walzgerüst vorgelagerten Ofens minimiert. Dazu wurde das Phasenmodell angewendet – eine Visualisierung der Anwendung ist in Abbildung 6.15 dargestellt (die punktierte Linie entspricht dem für Fallstudie 2 aktiven Prozessverlauf).

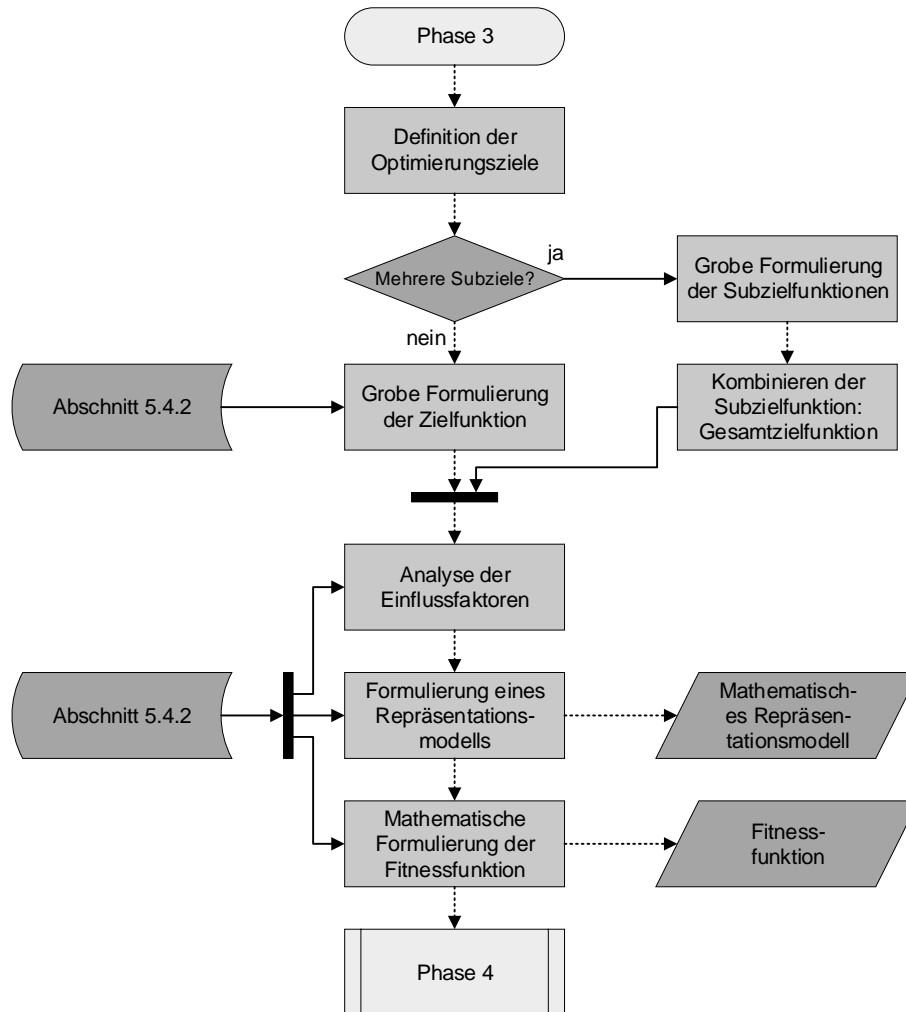


Abbildung 6.15: Fallstudie 2: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 3

Grobe Formulierung der Fitnessfunktion (Phase 3.1): Im Ausgangszustand wurde die Produktionsreihenfolge an der betrachteten Anlage manuell geplant. Dabei wurden die Aufträge anhand der Ecktermine unter Berücksichtigung der Zustandsabhängigkeiten priorisiert und versucht, diese derart einzuplanen, sodass die Gesamttemperaturdifferenz aus Aufheizen und Abkühlen des vorgelagerten Ofens möglichst minimal wird. Aufgrund der Komplexität des Planungsproblems,

kann die Planung, um gute Ergebnisse zu erzielen, nur von sehr erfahrenen Prozessexperten durchgeführt werden.

Mathematisch kann das Optimierungsziel (Minimierung der Gesamttemperaturdifferenz), wie in Gleichung 6.18 dargestellt, formuliert werden.

$$GT(\vec{x}) = \sum_i |\Delta T_i| \quad (6.18)$$

mit dem Temperaturdelta

$$\Delta T_i = T(A_i) - T(A_{i-1}) \quad (6.19)$$

Das Temperaturdelta ergibt sich aus der Differenz der für Auftrag A_i notwendigen Walztemperatur $T(A_i)$ und der vor dem aktuellen Auftrag vorherrschenden Ofentemperatur $T(A_{i-1})$ (der notwendigen Walztemperatur des vorherigen Auftrages).¹⁴⁸ Um Aufheiz- und Abkühlungszyklen gleich stark zu gewichten, wird von den einzelnen Temperaturdeltawerten der Absolutwert gebildet und die Absolutwerte werden aufsummiert. Daraus ergibt sich die Gesamttemperaturdifferenz $GT(\vec{x})$. Um das Problem zu einem Maximierungsproblem zu transformieren, wird die Fitness als negative Gesamttemperaturdifferenz definiert (vgl. Gleichung 6.20).

$$F(\vec{x}) = -GT(\vec{x}) \quad (6.20)$$

Im Allgemeinen ist Aufheizen und Abkühlen mit unterschiedlichen Energie- und Zeitaufwänden verbunden. Um diesen Zusammenhang abzubilden, wird eine Kostenfunktion gebildet (vgl. Gleichung 6.21).

$$K_{GT}(\vec{x}) = c_{auf} \cdot \sum_i (\Delta T_{auf:i}) + c_{ab} \cdot \sum_i (\Delta T_{ab:i}) \quad (6.21)$$

mit

$$\Delta T_{auf:i} = \begin{cases} T(A_i) - T(A_{i-1}) & T(A_i) - T(A_{i-1}) \geq 0 \\ 0 & \text{andernfalls} \end{cases}$$

¹⁴⁸Die Temperatur $T(A_0)$ entspricht der Ofentemperatur vor dem Start des Produktionsreihenfolgeplans.

$$\Delta T_{ab:i} = \begin{cases} 0 & T(A_i) - T(A_{i-1}) \geq 0 \\ -(T(A_i) - T(A_{i-1})) & \text{andernfalls} \end{cases}$$

wobei gilt

- $\Delta T_{auf:i}$... positive Temperaturdifferenz bei A_i
 $\Delta T_{ab:i}$... negative Temperaturdifferenz bei A_i
 c_{auf} ... Kostensatz für eine positive Temperaturdifferenz
 c_{ab} ... Kostensatz für eine negative Temperaturdifferenz

Basierend auf der Kostenfunktion (vgl. Gleichung 6.21) lässt sich eine alternative Fitnessfunktion formulieren (vgl. Gleichung 6.22).

$$F(\vec{x}) = -K_{GT}(\vec{x}) \quad (6.22)$$

Abbildung des Produktionsprozesses (Phase 3.2): Der Produktionsreihenfolgeplanungsprozess am Walzgerüst erfolgt dem in Abbildung 6.16 dargestellten Prozess folgend.

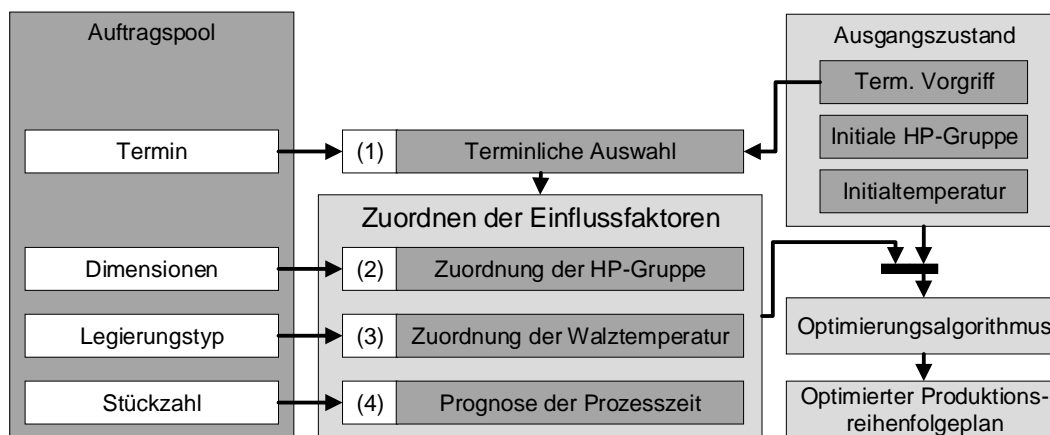


Abbildung 6.16: Abbildung des Produktionsreihenfolgeplanungsprozesses (Fallstudie 2)

Über alle Aufträge, die im Auftragspool vor der Anlage verfügbar sind, müssen die folgenden auftragspezifischen Informationen bekannt sein:

- **Termin:** Ein aus der Produktionsgrobplanung stammender Ecktermin legt grob die Kalenderwoche fest, in der der entsprechende Auftrag zu fertigen ist. Zur Erstellung eines Produktionsreihenfolgeplans am Walzgerüst wird parametrisiert, welcher zeitliche Bereich in der Planung berücksichtigt werden soll. Zur Verfügung stehen dabei (i) der Rückstand¹⁴⁹ (falls

¹⁴⁹Das sind jene Aufträge, deren Ecktermine zum Planungszeitpunkt bereits überschritten sind.

vorhanden) und (ii) die aktuelle Kalenderwoche zuzüglich einem Vorgriff, der als externer Parameter des WMBPRO Modells parametrisiert wird.¹⁵⁰

- **Dimensionen** (im Speziellen die Breite): Basierend auf der Breite eines Auftrages, kann dieser, wie in Abschnitt 6.3.4 beschrieben, einer HP-Gruppe zugeordnet werden.
- **Legierungstyp** (Qualität): Über eine Arbeitsvorschrift wird einem Auftrag die Walztemperatur in Abhängigkeit des Legierungstyps zugeordnet.
- **Stückzahl**: Um eine für den praktischen Einsatz hilfreiche Prognose der Prozesszeiten¹⁵¹ in die WMBPRO zu integrieren, wird die Stückzahl als zentrales Feature benötigt.

Basierend auf einer terminlichen Auswahl (unter Berücksichtigung des terminlichen Vorgriffs) wird aus dem Auftragspool ein Subset an Aufträgen ausgewählt, für das eine optimierte Produktionsreihenfolge gebildet werden soll. Das ausgewählte Auftragssubset wird dann anhand der Einflussfaktoren spezifiziert: es werden konkrete Eigenschaften, wie HP-Gruppe, Walztemperatur und Prozesszeit zugeordnet. In Kombination mit Parametern, die den Ausgangszustand beschreiben, wird unter Einsatz eines Optimierungsalgorithmus (vgl. Abschnitt 6.3.6) ein optimierter Produktionsreihenfolgeplan erstellt. Der Optimierungsalgorithmus bewertet dabei die Fitness $F(\vec{x}_j)$ möglicher Reihenfolgepläne \vec{x}_j mit Gleichung 6.20 (eine alternative Fitnessfunktion bietet 6.22). Die Reihenfolgeabhängigkeit besteht darin, dass das Temperaturdelta zwischen zwei Aufträgen von ihren Walztemperaturen abhängt (vgl. Gleichung 6.19). Anders als in Fallstudie 1 (vgl. Abschnitt 6.2.5) besteht dabei keine iterative Abhängigkeit zu allen vorgelagerten Aufträgen, sondern jeweils eine paarweise Abhängigkeit zweier Aufträge. Das Gesamttemperaturdelta kann daher mit Vektoroperationen berechnet werden:

Es sei $\vec{T}(\vec{x}_j)$ der Temperaturvektor des Reihenfolgeplanes \vec{x}_j bestehend aus den Walztemperaturen der einzelnen Aufträge $\vec{T}(\vec{x}_j) = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T$. Daraus können die beiden Vektoren $\vec{T}_A(\vec{x}_j) = (T_2, \dots, T_n)^T$ und $\vec{T}_B(\vec{x}_j) = (T_1, T_2, \dots, T_{n-1})^T$ (jeweils mit den Längen $n-1$) gebildet und der Temperaturdeltavektor $\Delta\vec{T}(\vec{x}_j) = \vec{T}_A - \vec{T}_B$ berechnet werden. Um daraus einen Vektor mit positiven Einträgen (komponentenweise absolute Einträge) zu erstellen, kann beispielsweise das Hadamard-Produkt des Vektors mit sich selbst¹⁵² eingesetzt werden, um $\Delta\vec{T}_{abs}(\vec{x}_j)$ zu erhalten. Nun kann das Gesamttemperaturdelta aus der Addition des Starttemperaturdeltas¹⁵³ und des Skalarproduktes¹⁵⁴ zwischen $\Delta\vec{T}_{abs}(\vec{x}_j)$ und dem Vektor $\vec{1} = (1, 1, \dots, 1)^T$ (der Länge $n-1$) berechnet werden: $GT(\vec{x}_j) = |T_1 - T_0| + \langle \Delta\vec{T}_{abs}(\vec{x}_j), \vec{1} \rangle$

¹⁵⁰Dadurch wird gewährleistet, dass die WMBPRO im praktischen Einsatz an schwankende Gegebenheiten (Kapazitäten, Bestand) angepasst werden kann. Ist, zum Beispiel, der Bestand gering, kann durch einen größeren Vorgriff dennoch ein (hinsichtlich der Aufheiz- und Abkühlungszyklen) sinnvoller Produktionsreihenfolgeplan gebildet werden.

¹⁵¹Im Rahmen der Entwicklung des WMBPRO in Fallstudie 2 wurde ein datenbasiertes Prozesszeit-Prognosemodell für das Walzgerüst erstellt.

¹⁵²Der Vektor der absoluten Temperaturdifferenzen ergibt sich dabei zu $\Delta\vec{T}_{abs}(\vec{x}_j) = \sqrt{\Delta\vec{T}(\vec{x}_j) \circ \Delta\vec{T}(\vec{x}_j)}$.

¹⁵³Darunter wird die Temperaturdifferenz zwischen der initialen Ofentemperatur und der Walztemperatur des ersten Auftrages im Reihenfolgeplan \vec{x}_j verstanden, das sich folgendermaßen ergibt: $|T_1 - T_0|$

¹⁵⁴Mit dem Skalarprodukt zweier Vektoren (der Länge m): $\langle A, B \rangle = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + \dots + a_m \cdot b_m$

6.3.6 Entwicklung einer WMBPRO an einem Walzgerüst: Phase 4

Die Anwendung von Phase 4 in Fallstudie 2 ist in Abbildung 6.17 visualisiert (die punktierte Linie entspricht dem für Fallstudie 2 aktiven Prozessverlauf).

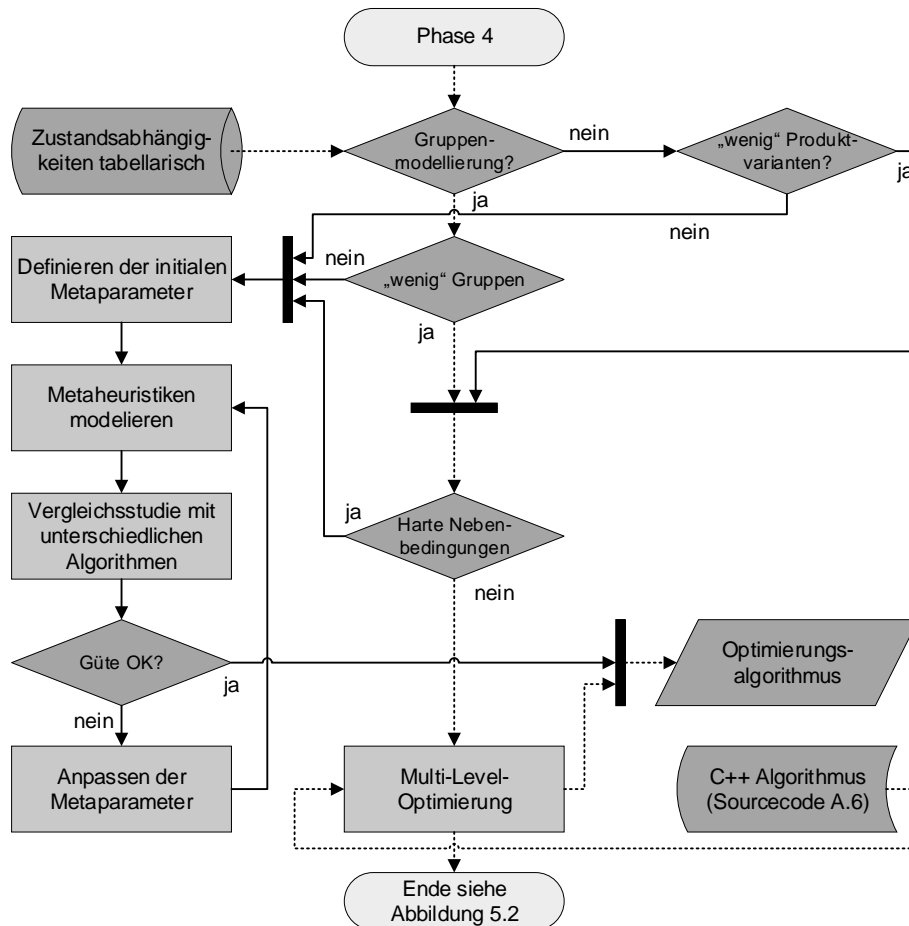


Abbildung 6.17: Fallstudie 2: Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm, Phase 4

Wie in Abschnitt 6.3.4 hervorgehoben, bestehen harte Nebenbedingungen bezüglich der HP-Gruppen, wodurch der Lösungsraum kleiner wird (nicht alle $n!$ Lösungen sind zulässig). Um mit Metaheuristiken arbeiten zu können, muss nun, bevor die Fitness eines Reihenfolgeplanes \vec{x}_j berechnet werden kann, überprüft werden, ob es sich um eine valide Lösung handelt. Um diese Überprüfung zu vermeiden, ist es möglich, mit der im Phasenmodell vorgestellten Multi-Level-Optimierung zu arbeiten¹⁵⁵ und diese in Form einer Konstruktionsheuristik zu nutzen. Dabei werden nur Lösungen konstruiert, die auch tatsächlich valide sind. Dadurch kann der Lösungsraum deutlich eingeschränkt werden und sofern Gruppengröße und Entscheidungsanzahl gering bleiben, kann das Problem in praktisch sinnvoller Zeit exakt gelöst werden. In der Instanziierung von Fallstudie 2 liegt die Gruppengröße bei $n = 8$ und die Entscheidungsanzahl kann mit $k = 2$ modelliert wer-

¹⁵⁵Die Voraussetzungen zum Einsatz einer MLO sind dabei erfüllt.

den (Aufheizen oder Abkühlen). Sind in einem konkreten Produktionsplan tatsächlich alle HP-Gruppen vertreten, so beläuft sich die Anzahl an möglichen Lösungen (vgl. Gleichung 5.7) auf $k^n = 2^8 = 256$.¹⁵⁶

Entwickelte Planungsheuristik: Um die in Abschnitt 5.5.2 vorgestellte Formulierung einer Multi-Level-Optimierungsheuristik auf die Probleminstanziierung von Fallstudie 2 anwenden zu können, wird zunächst die Problemheuristik in Form eines Entscheidungsbaumes modelliert.

Um alle ausgewählten Aufträge¹⁵⁷ eines Auftragspools in einer HP-Gruppe abarbeiten zu können, muss der gesamte, von den Aufträgen aufgespannte Temperaturintervall durchlaufen werden. Dieser ergibt sich folgendermaßen: Es sei \vec{T}_{G_j} ein Vektor bestehend aus allen Ofentemperaturen in der HP-Gruppe HPG_j . Um alle Aufträge abarbeiten zu können, muss zumindest das Temperaturdelta innerhalb der HP-Gruppe überwunden werden, das sich zu $\Delta T_{G_j} = \max(\vec{T}_{G_j}) - \min(\vec{T}_{G_j})$ ergibt. Dieses Mindesttemperaturdelta kann erreicht werden, wenn der Vektor \vec{T}_{G_j} entweder (i) absteigend oder (ii) aufsteigend sortiert wird. Als sekundäres Sortierkriterium wird der Ecktermin verwendet – es werden jene Aufträge zuerst bearbeitet, deren Schlupfzeiten zum Eckendtermin geringer sind. Zwischen den Gruppen müssen die Endtemperatur von Gruppe HPG_{j-1} und die Anfangstemperatur von Gruppe HPG_j angeglichen werden, woraus ein weiteres Temperaturdelta entsteht, das von den innerhalb der Gruppen gewählten Sortierkriterien abhängt. Es lassen sich die folgenden beiden Entscheidungen ableiten:

- (0) Ausgehend von der Endtemperatur $T_{E:j-1}$ der vorherigen Gruppe HPG_{j-1} wird auf die Maximaltemperatur $\max(\vec{T}_{G_j})$ der aktuellen Gruppe HPG_j aufgeheizt (bzw. abgekühlt) und anschließend auf die Minimaltemperatur $\min(\vec{T}_{G_j})$ der aktuellen Gruppe abgekühlt (bzw. aufgeheizt). Die Endtemperatur der aktuellen Gruppe ergibt sich dabei zu $T_{E:j} = \min(\vec{T}_{G_j})$.
- (1) Ausgehend von der Endtemperatur der vorherigen Gruppe HPG_{j-1} wird auf die Minimaltemperatur $\min(\vec{T}_{G_j})$ der aktuellen Gruppe HPG_j abgekühlt (bzw. aufgeheizt) und anschließend auf die Maximaltemperatur $\max(\vec{T}_{G_j})$ der aktuellen Gruppe aufgeheizt (bzw. abgekühlt). Die Endtemperatur der aktuellen Gruppe ergibt sich dabei zu $T_{E:j} = \max(\vec{T}_{G_j})$.

In beiden Fällen muss innerhalb der Gruppe das Delta ΔT_{G_j} überwunden werden. Hinzu kommt die Temperaturdifferenz zwischen den Gruppen $\Delta T_{G_{j-1}:G_j}$, die entscheidungsabhängig ist. Für (0) ergibt sich $\Delta T_{G_{j-1}:G_j} = |\max(\vec{T}_{G_j}) - T_{E:j-1}|$ und für (1) ergibt sich $\Delta T_{G_{j-1}:G_j} = |T_{E:j-1} - \min(\vec{T}_{G_j})|$. Die Verwendung des Absolutwertes ist für den Fall notwendig, dass entweder (i) die Endtemperatur $T_{E:j-1}$ größer als die Maximaltemperatur $\max(\vec{T}_{G_j})$ ist oder (ii) die Endtemperatur kleiner als die Minimaltemperatur $\min(\vec{T}_{G_j})$ ist. Zur besseren Verständlichkeit, sei ein kurzes theoretisches Beispiel dargestellt:

Im Auftragspool sind drei HP-Gruppen vorhanden: HPG_1 , HPG_2 und HPG_3 . Die ausgewählte Planungsstrategie ist (0, 1, 0) und die Initialtemperatur des Ofens entspricht $T_{E:0}$.

¹⁵⁶Diese Menge an Lösungen kann rechnergestützt binnen kurzer Zeit enumeriert und bewertet werden.

¹⁵⁷Die Auswahl erfolgt dabei terminbasiert, wie in Abbildung 6.16 dargestellt.

Zur Umsetzung der Planungsstrategie werden die Aufträge in HPG_1 der Temperatur nach absteigend, in HPG_2 der Temperatur nach aufsteigend und in HPG_3 der Temperatur nach absteigend sortiert. Für den derart gebildeten Reihenfolgeplan $\vec{x}_{Beispiel}$, kann nun mit dem in Abschnitt 6.3.5 vorgestellten Schema die Fitness (vgl. Gleichung 6.20 bzw. Gleichung 6.22) berechnet werden. Die Planungsstrategie wird aber einfacher verständlich, wenn man die Berechnung der Gesamttemperaturdifferenz $GT(\vec{x}_{Beispiel})$ iterativ durchführt:¹⁵⁸

In Gruppe HPG_1 wird ausgehend von der Initialtemperatur auf die Gruppenmaximaltemperatur aufgeheizt und anschließend auf die Minimaltemperatur der Gruppe abgekühlt, woraus sich ergibt: $\Delta T_{G1} + \Delta T_{0:1} = \max(\vec{T}_{G1}) - \min(\vec{T}_{G1}) + |\max(\vec{T}_{G1}) - T_{E:0}|$, die Endtemperatur der ersten Gruppe ist $T_{E:1} = \min(\vec{T}_{G1})$. Die Strategie der zweiten Gruppe ist Abkühlen und dann Aufheizen: $\Delta T_{G2} + \Delta T_{1:2} = \max(\vec{T}_{G2}) - \min(\vec{T}_{G2}) + |T_{E:1} - \min(\vec{T}_{G2})|$ und $T_{E:2} = \max(\vec{T}_{G2})$. In ähnlicher Form ergibt sich auch das Temperaturdelta der dritten Gruppe zu $\Delta T_{G2} + \Delta T_{2:3} = \max(\vec{T}_{G3}) - \min(\vec{T}_{G3}) + |\max(\vec{T}_{G3}) - T_{E:2}|$ mit $T_{E:3} = \min(\vec{T}_{G3})$. Die Gesamttemperaturdifferenz beträgt nun $GT(\vec{x}_{Beispiel}) = \Delta T_{0:1} + \Delta T_{G1} + \Delta T_{1:2} + \Delta T_{G2} + \Delta T_{2:3} + \Delta T_{G3}$ mit der Endtemperatur $T_E = T_{E:3} = \min(\vec{T}_{G3})$.

Implementierung der Planungsheuristik: In Fallstudie 2 wird ein Entscheidungsbaum mit $k = 2$ und $n = 8$ formuliert, sofern im ausgewählten Auftragspool alle HP-Gruppen explizit vorhanden sind. Sind in manchen Gruppen keine Aufträge vorhanden, so reduziert sich die Komplexität des Entscheidungsbaumes entsprechend ($n \leq 8$). In der Implementierung des Algorithmus ist es somit notwendig, n kontextspezifisch aus dem Planungsproblem zu extrahieren. Zur Zusammenfassung des Konzeptes ist in Abbildung 6.18 ein beispielhafter Entscheidungsbaum im Kontext von Fallstudie 2 mit $n = 3$ dargestellt (vgl. auch Abbildung 5.10).

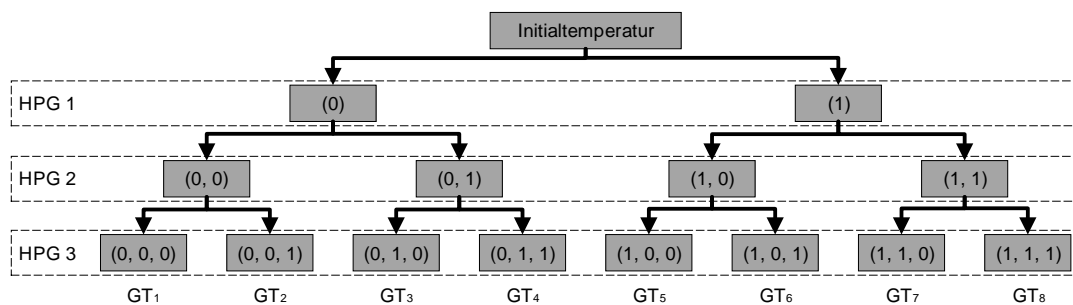


Abbildung 6.18: Entscheidungsbaum für 3 vorhandene HP-Gruppen (Fallstudie 2)

Zur Enumerierung der Lösungsstrategien wird Algorithmus A.6 (vgl. Abschnitt 5.5.2) mit $k = 2$ und instanzierungsabhängigem n (mit $n \leq 8$) eingesetzt. Je nach aktuellem Planungsproblem variiert die Anzahl an tatsächlich vorhandenen HP-Gruppen. Somit muss n basierend auf dem ausgewählten Auftragspool berechnet werden. Nachdem alle Lösungsmöglichkeiten des diskreten Lösungsraumes enumeriert wurden, werden diese mit Gleichung 6.20 hinsichtlich ihrer Fitness be-

¹⁵⁸Dies entspricht im weitesten Sinne einer Simulation der Umsetzung der Planungsstrategie.

wertet. Jene Lösungsstrategie mit der besten Fitness (minimale Gesamttemperaturdifferenz) wird ausgewählt und bildet die Optimallösung für das Planungsproblem.

6.3.7 Nutzenquantifizierung

Zur Quantifizierung des Nutzens der im Rahmen von Fallstudie 2 entwickelten WMBPRO, wurde auf eine historienbasierte Auswertung zurückgegriffen. Für den Betrachtungszeitraum werden Validierungsdatensätze (a) aus dem ERP-System extrahiert, die die historisch realisierten Produktionsreihenfolgepläne darstellen. Um die WMBPRO anwenden und mit den Fitnesswerten der Validierungsdatensätze gegenüberstellen zu können, werden die historischen Bestandssituationen in Form von (b) Testdatensätzen abgebildet. Für (b) wird die entwickelte WMBPRO angewendet und eine optimierte Produktionsreihenfolge \vec{x}_{WMBPRO} berechnet. Durch Anwenden der Fitnessfunktion auf \vec{x}_{WMBPRO} ergibt sich der Fitnesswert F_{WMBPRO} . Wird die Fitnessfunktion ohne Einsatz der WMBPRO auf (a)¹⁵⁹ angewendet, ergibt sich die Fitness F_{hist} . Um die Fitnesswerte über unterschiedliche Zeitpunkte hinweg vergleichen zu können, wird die Metrik F_{norm} (vgl. Gleichung A.1) verwendet, die F_{hist} auf F_{WMBPRO} normiert. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung für den Betrachtungszeitraum sind in Tabelle 6.5 dargestellt.

Tabelle 6.5: Nutzenbewertung (Fallstudie 2)

Datensatz	Starttemperatur	Startbreite	Δ_{rel}	F_{norm}
DS 1	1080	1600	0,10	1,11
DS 2	980	1100	0,40	2,00
DS 3	1000	1000	0,00	1,00
DS 4	1000	1000	-0,20	0,71
DS 5	960	2000	-0,40	0,73
DS 6	1060	1800	0,40	1,29
DS 7	1080	1400	-0,20	0,92
DS 8	1100	1300	0,50	1,45
DS 9	980	1200	0,00	1,00
DS 10	1080	2000	0,10	1,17
DS 11	1080	2000	0,10	1,06
DS 12	1100	1000	0,60	1,46
DS 13	980	1000	0,50	1,63
DS 14	1080	2000	0,05	1,04
DS 15	1100	2000	-0,20	0,88

In Tabelle 6.5¹⁶⁰ ist ersichtlich, dass der eingesetzte Algorithmus zum Teil deutlich bessere Er-

¹⁵⁹Diese Daten stellen die historisch realisierten Produktionsreihenfolgen \vec{x}_{hist} dar.

¹⁶⁰Das in Tabelle 6.5 dargestellte Delta beschreibt die Differenz zwischen historischer Fitness und F_{WMBPRO} mit

gebnisse erzielt als die manuelle Reihenfolgeoptimierung, weil mehr Daten berücksichtigt werden können (vgl. DS 2 und DS 13). Demgegenüber erzielt der manuelle Produktionsreihenfolgeplan in einigen Fällen bessere Ergebnisse, was durch einen $F_{norm} < 1$ gekennzeichnet wird. Dies liegt daran, dass die Breitenrestriktionen in der manuellen Planung zum Teil nicht so streng berücksichtigt werden, wie im WMBPRO modelliert. Handelt es sich um einen unkritischen Auftrag¹⁶¹ mit geringer Stückzahl, kann in Einzelfällen eine Verletzung der Breitenrestriktionen akzeptiert werden, ohne die Qualität zu gefährden. Die Δ_{rel} der einzelnen Datensätze sind in Abbildung 6.19 visualisiert.

Betrachtet man F_{norm} über alle Datensätze hinweg, so ergibt sich im Mittel ein $F_{norm} > 1$. Im Betrachtungszeitraum lässt sich durch den Einsatz der entwickelten WMBPRO im Mittel eine Verbesserung (Berechnung der prozentualen Verbesserung mit Gleichung 6.17) der Fitness gegenüber einer manuellen Produktionsreihenfolgeplanung in der Höhe von 16,34% erzielen.

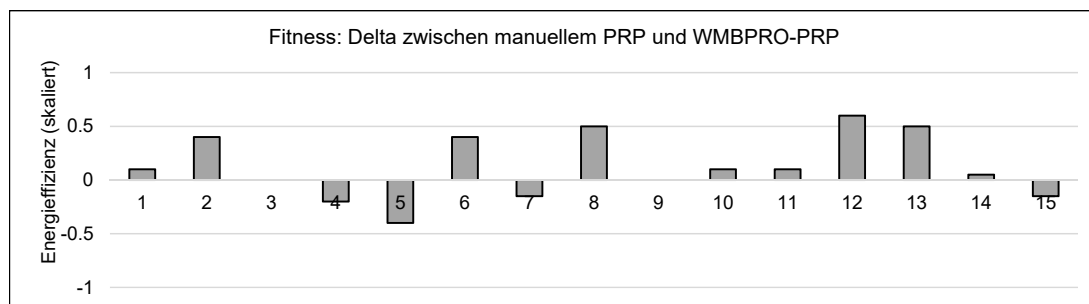


Abbildung 6.19: Temperaturdelta zwischen den Methoden, die IDs sind bezogen auf Tabelle 6.5

Nutzen durch Integration der WMBPRO: Die WMBPRO in Fallstudie 2 wurde in Form eines interaktiven GUIs in die vorhandene IT-Plattform des Anwendungspartners integriert. Dabei werden die folgenden Interaktionsmöglichkeiten geboten:

- Die Startparameter (Startzeitpunkt der Planung, terminlicher Vorgriff) können parametrisiert werden.
- Basierend auf den ausgewählten Parametern kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt der WMBPRO Algorithmus zur automatisierten Erstellung eines Produktionsreihenfolgeplanes ausgelöst werden.¹⁶² Die Optimierungsergebnisse werden in tabellarischer Form dargestellt und die Veränderung des Zustandes wird in Form eines Diagramms visualisiert. Zudem wird die Heizkurve des dem Walzgerüst vorgelagerten Ofens visuell dargestellt.

einer min-max-Skalierung skaliert: $\Delta_{rel:i} = \frac{F_{WMBPRO:i} - F_{hist:i}}{\max(\Delta_{abs}) - \min(\Delta_{abs})}$ mit $\vec{\Delta}_{abs} = (F_{WMBPRO:1} - F_{hist:1}, \dots, F_{WMBPRO:i} -$

$F_{hist:i}, \dots, F_{WMBPRO:n} - F_{hist:n})^T$

¹⁶¹Darunter wird ein Auftrag mit Materialeigenschaften verstanden, der zu keinen Einprägungen in der Walze führen wird.

¹⁶²Die zur WMBPRO in Fallstudie 2 notwendigen Daten werden dabei automatisch aus den Datentabellen ausgelesen und verarbeitet.

- Die Lösungstabelle kann zur physischen Lokalisierung der Aufträge (Vernetzung mit dem Materialtrackingsystem) verwendet werden.
- Der durch den WMBPRO Algorithmus ermittelte Produktionsreihenfolgeplan kann von den zuständigen Produktionsplanern bei Bedarf manuell angepasst werden und die Planer erhalten direkt Feedback über die Auswirkungen der Anpassungen auf die Fitnessfunktion. Durch diesen manuellen Eingriff können durch spezielle Kombinationen an Bestand und Zustand entstehende Produktionsreihenfolgen hinsichtlich der Ofentemperaturen noch weiter geglättet werden. Dabei ist es dem Planer auch möglich, Verschiebungen entgegen der definierten Restriktionen (vgl. 6.3.4) durchzuführen. Wie sich in der Nutzenquantifizierung (vgl. Tabelle 6.5) gezeigt hat, ist es in Einzelfällen durchaus zulässig die strengen Breitenrestriktionen zu verletzen.

Durch die Instrumentalisierung der WMBPRO im Rahmen von Fallstudie 2 in der beschriebenen Form, ergibt sich ein qualitativer Nutzen für die Produktionsplanung:

- Die Planer werden entlastet, da Reihenfolgepläne automatisiert erstellt werden können. Es wird Objektivität gewährleistet, da die Pläne nicht mehr von subjektiven Einschätzungen unterschiedlicher Personen abhängig sind.
- Es wurde eine Funktionalität zur Prognose der Prozesszeiten der Aufträge am Duo Walzgerüst geschaffen. So können die produktionsreihenfolgeabhängigen Fertigstellungszeitpunkte der Aufträge abgeschätzt werden.
- Die Interaktionsmöglichkeiten (Anpassen der automatisch generierten Reihenfolgen) schaffen Transparenz über die Auswirkung manueller Änderungen von Produktionsreihenfolgen (direkte Auswirkung auf die Fitnessfunktion ersichtlich).

6.3.8 Conclusio der Fallstudie

Zusammenfassung: Im Rahmen von Fallstudie 2 wurde das in Abschnitt 5 vorgestellte Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO angewandt, um eine zustandsbedingte Produktionsreihenfolgeoptimierung an einer Pilotanlage (Duo Walzgerüst) zu entwickeln. Basierend auf einer bereits vorhandenen Systematik zur Zustandserfassung (vgl. Abschnitt 6.3.3), wurde die Zustandsinformation in Abschnitt 6.3.4 in Form von diskreter Zustandsgruppen instrumentalisiert, um die Zustandsabhängigkeiten in eine für die Produktionsreihenfolgeplanung verwendbare Form zu transformieren. Basierend auf dieser Modellierung konnte in Abschnitt 6.3.5 das Produktionssystem aus Planungssicht abgebildet und eine Fitnessfunktion formuliert werden, die die produktionstechnische Zielgröße „Minimierung der Temperaturwechsel an dem Walzgerüst vorgelagerten Ofen“ abbildet (vgl. Gleichung 6.20). In Abschnitt 6.3.6 wird eine Multi-Level-Optimierung auf Basis der diskretisierten Zustandsgruppen entwickelt, indem ein mehrstufiger Entscheidungsprozess, basierend auf den beiden Elementarentscheidungen Abkühlen und Aufheizen, formuliert wird. Der diskrete Lösungsraum weist eine Problemgröße auf, die in praktisch sinnvoller Zeit

exakt gelöst werden kann. Dazu wird die Implementierung der Planungsheuristik anhand eines Beispiels (vgl. Abbildung 5.10) beschrieben. Die entwickelte Planungsheuristik erzielt im Mittel eine Verbesserung der Fitness von 16,34% gegenüber einer manuellen Produktionsreihenfolgeplanung. Darüber hinaus vereinfacht die entwickelte WMBPRO die komplexe Planungstätigkeit der Planer. Zusammenfassend kann der Nutzen einer WMBPRO in der Instanziierung an der Pilotanlage (Duo Walzgerüst) bestätigt werden.

Ergebnisse, Restriktionen und weiterer Forschungsbedarf: Für das in Fallstudie 2 instanziierte Problem „Produktionsreihenfolgeoptimierung an einem Duo Walzgerüst“ wurde das in Abschnitt 5 vorgestellte Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO angewandt. Die finale Version des entwickelten Phasenmodells (vgl. Abschnitt 5) konnte im Rahmen der Fallstudie an der Pilotanlage (Duo Walzgerüst) angewandt werden, um eine WMBPRO zu entwickeln, die einen positiven Nutzen aufweist.

Ausgehend von der in Abschnitt 5.5.2 vorgestellten Multi-Level-Optimierung wurde in Abschnitt 6.3.6 eine Konstruktionsheuristik entwickelt, die den in Abschnitt 6.3.4 diskretisierten Lösungsraum optimiert. Aufgrund der reduzierten Problemgröße können alle Lösungsmöglichkeiten in praktisch sinnvoller Zeit enumeriert und bewertet werden, wodurch ein exaktes Lösen ermöglicht wird. Somit liefert Fallstudie 2 jedoch keine Aussage hinsichtlich der Validität des im Phasenmodell vorgeschlagenen Einsatzes von Metaheuristiken zur Problemoptimierung.

6.4 Vergleichsbetrachtung der Fallstudien

An dieser Stelle werden die Fallstudien (vgl. Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3) verglichen und deren Unterschiede diskutiert. Dazu sind die Fallstudien in Tabelle 6.6 gegenübergestellt.

Vergleicht man die Zustandsabhängigkeiten in den Fallstudien, so können diese in beiden Fällen eindimensional modelliert werden:

- In Fallstudie 1 besteht ein eindimensionaler Zusammenhang zwischen Produktionsprogramm und Scherenmesserzustand.
- In Fallstudie 2 besteht ein eindimensionaler Zusammenhang zwischen Produktionsprogramm und Walzenzustand. Der Zusammenhang zwischen der notwendigen Ofentemperatur und den jeweiligen Produkten stellt in Fallstudie 2 zwar eine weitere Zustandsabhängigkeit dar, diese wird jedoch in der Optimierungsziel Funktion modelliert.

In Fallstudie 1 (vgl. Abschnitt 6.2) wurde die Zustandsabhängigkeit anhand der Bildung von Produktgruppen expliziert und einem kontinuierlichen (aus einem eigens entwickelten CMS stammenden) Zustandswert gegenübergestellt. Demgegenüber wurde die Zustandsinformation in Fallstudie 2 (vgl. Abschnitt 6.3) in diskreter Form abgebildet, wodurch der Einsatz einer Multi-Level-Optimierung ermöglicht wurde. Die Art der Modellierung von Fitnessfunktion und Optimierungsalgorithmus bildet den wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Fallstudien. Während in

Tabelle 6.6: Gegenüberstellung der Fallstudien

Kriterium	Fallstudie 1	Fallstudie 2
Prozess	Tafelblechschere	Duo Walzgerüst
Zustandsabhängigkeit (Komponente)	Scherenmesser	Walzen, Ofen
Zustandsabhängigkeit (Produkteigenschaft)	Qualität und Dicke	Breite
Produktgruppen	ca. 300	8
Erfassung des Zustandes (Phase 1)	Vibrationsdaten, ML-Modell	aus Produktionsprogramm
Art der Zustandsabhängigkeit (Phase 2)	eindimensional	zweidimensional bzw. eindimensional modelliert
Fitnessfunktion, Optimierungsziel (Phase 3)	logistische Zielgröße (multikriteriell)	produktionstechnische Zielgröße (Ofentemperatur)
eingesetzter Optimierungsalgorithmus (Phase 4)	Simulated Annealing	Multi-Level-Optimierung
quantitativer Nutzen der WMBPRO	10,01 % Kosteneinsparung	16,34 % weniger Temperaturwechsel

Fallstudie 1 die Anzahl an Produktgruppen bei etwa 300 liegt, ist die Anzahl an Produktgruppen in Fallstudie 2 mit 8 Gruppen vergleichsweise gering. Aufgrund dieser erhöhten Komplexität, war in Fallstudie 1 der Einsatz von Metaheuristiken notwendig. Hingegen konnte das Optimierungsproblem im diskreten Lösungsraum in Fallstudie 2 durch eine MLO exakt gelöst werden. Auch die Konstruktion der Fitnessfunktion unterscheidet sich grundlegend in beiden Fallstudien. Während das Optimierungsziel in Fallstudie 1 aus mehreren logistischen Subzielfunktionen kombiniert wurde, war das Optimierungsziel in Fallstudie 2 eine eindimensionale, produktionstechnische Zielgröße.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass die zweite Fallstudie die Ergebnisse aus Fallstudie 1 bestätigt: der Einsatz des Phasenmodells zur Entwicklung einer WMBPRO resultiert in einem validen Produktionsreihenfolgeoptimierungsalgorithmus, der einen positiven Nutzen mit sich bringt. Zudem werden die Ergebnisse um die Evidenz für den in Abschnitt 5.5.2 vorgestellten Ansatz zur Multi-Level-Optimierung erweitert, der in Fallstudie 1 aufgrund der hohen Anzahl an Produktgruppen nicht eingesetzt werden konnte.

7 Resümee und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wurde ein Phasenmodell zur Entwicklung einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung (WMBPRO) entwickelt. Dabei wurde der in der Literaturanalyse (vgl. Abschnitt 3) nachgewiesene Forschungsbedarf hinsichtlich einer integrativen Betrachtung von Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) und Produktionsplanung und -steuerung adressiert. Anschließend wurde das entwickelte Phasenmodell im Rahmen von zwei Fallstudien in der metallverarbeitenden Industrie instanziiert und die Anwendung des Phasenmodells sowie der Nutzen der dadurch generierten Lösungen wurden dokumentiert (vgl. Abschnitt 6).

In den folgenden Ausführungen werden die Forschungsergebnisse diskutiert, indem zum einen auf die Erfüllung der definierten Anforderungen eingegangen wird und zum anderen die Forschungsfragen diskutiert werden. Abschließend erfolgt die Diskussion von Restriktionen und weiterem Forschungsbedarf.

7.1 Diskussion der Forschungsergebnisse

Um den Evidenz Zyklus abzuschließen (vgl. Forschungsmethodologie in Abschnitt 1.4.2), werden an dieser Stelle die Forschungsergebnisse diskutiert. Dazu werden die definierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.3) mit den Anwendungsergebnissen (Instanzierungen des Phasenmodells im Rahmen der Fallstudien in Abschnitt 6) gegenübergestellt und abgeglichen. Anschließend werden die Forschungsfragen diskutiert.

7.1.1 Abgleich mit den Anforderungen

In Abschnitt 4.3 wurden sechs Anforderungen an eine WMBPRO definiert, darunter drei Anforderung an das Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO und drei Anforderungen an die aus dem Phasenmodell resultierenden WMBPRO Modelle.

Abgleich mit den Anforderungen an das Phasenmodell:

- (1) Das Phasenmodell entwickelt ein Optimierungsmodell, das die Werkzeug- und Maschinenzustände in die Produktionsreihenfolgeoptimierung integriert.

Zum Zeitpunkt der Durchführung der systematischen Literaturanalyse existieren keine Methoden, die beschreiben, wie Werkzeug- und Maschinenzustandsinformationen im Rahmen eines Optimierungsmodells zur Produktionsreihenfolgeoptimierung abgebildet werden können (vgl. Abschnitt 3). Vorhandene Lösungen bilden die Zustandsabhängigkeiten nur in binärer Form ab (vgl. Kao et al., 2018; Yugma et al., 2015; Jacobs et al., 2009) und bieten keine Möglichkeiten zur Abbildung produktspezifischer Zustandsabhängigkeiten. Ergebnis der Anwendung des Phasenmodells ist ein WMBPRO Modell, das zur Optimierung von

Produktionsreihenfolgen unter Berücksichtigung von Werkzeug- und Maschinenzustandsabhängigkeiten eingesetzt werden kann. Die Instanziierungen im Rahmen der Fallstudien (vgl. Abschnitt 6) stellen die Anwendbarkeit des Phasenmodells unter Beweis und zeigen, dass die entstandenen WMBPROs zur zustandsbedingten Produktionsreihenfolgeplanung in der Praxis eingesetzt werden können.

- (2) Das Phasenmodell liefert eine Funktionalität zur Abbildung von ein- und mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeiten und thematisiert explizit die Auswahl geeigneter CMS.

Das entscheidende Kriterium zur Nutzung der Zustandsinformationen im Kontext der Produktionsplanung ist eine geeignete Form der Modellierung selbiger (vgl. Karner und Sih, 2018). Das entwickelte Phasenmodell bietet mit Phase 2 (vgl. Abschnitt 5.3) eine Methode, wie Zustandsinformationen, die aus einem CMS stammen, in einer für die Produktionsreihenfolgeoptimierung nutzbaren Form abgebildet werden können. Die praktische Anwendbarkeit der Methode konnte im Rahmen von Fallstudie 1 (vgl. Abschnitte 6.2.3 und 6.2.4) nachgewiesen werden. Zudem bietet Fallstudie 2 einen Einblick, wie eine Zustandsabhängigkeit ohne der Notwendigkeit eines CMS modelliert werden kann (vgl. Abschnitt 6.3.4). Das Phasenmodell bietet mit Phase 1 einen repräsentativen, aus der Literatur extrahierten Überblick über für die Zustandserfassung mögliche CMS (vgl. Tabelle 5.1).

- (3) Das Phasenmodell bildet den Entwicklungsprozess einer WMBPRO ganzheitlich ab und deckt dabei alle notwendigen Phasen bis zum fertigen Optimierungsalgorithmus ab.

Neben den in Anforderung (2) thematisierten Phasen 1 und 2, die die Modellierung der Zustandsabhängigkeiten in einer für die Produktionsreihenfolgeplanung nutzbaren Form abbilden, werden die Auswahl und Modellierung von Zielfunktion und Optimierungsalgorithmus in den Phasen 3 und 4 des Phasenmodells beschrieben (vgl. Abschnitte 5.4 und 5.5). Dabei basieren die Phasen auf der vorhandenen Literatur (u.a. Korte und Vygen, 2018; Abedinia et al., 2017; Schuh und Stich, 2012a; Gendreau und Potvin, 2010; Konak et al., 2006) und bringen die bestehenden Methoden in einen für das Phasenmodell nutzbaren Kontext. Somit beschreibt das entwickelte Phasenmodell den Entwicklungsprozess in abgeschlossener Form und aus der Instanziierung resultiert, wie in Anforderung (1) beschrieben, ein Optimierungsmodell, das in der Praxis anwendbar ist.

Die in Abschnitt 4.3 formulierten Anforderungen an ein Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO können daher, unter Bezugnahme der durchgeführten Fallstudien, validiert werden.

Abgleich mit den Anforderungen an die WMBPRO:

- (1) Die WMBPRO erstellt automatisch valide Produktionsreihenfolgepläne, die logistische oder produktionstechnische Zielgrößen optimieren.

Aus den Instanziierungen des Phasenmodells (vgl. Abschnitt 6) wird ersichtlich, dass die generierten Lösungen (die WMBPRO Modelle) die Produktionssysteme derart abbilden,

sodass die in Phase 3 formulierten Zielsetzungen adressiert werden und die in Phase 4 entwickelten Optimierungsalgorithmen valide Reihenfolgepläne liefern. In Fallstudie 1 (vgl. Abschnitt 6.2) wird dabei eine Fitnessfunktion zur Modellierung einer multikriteriellen (aus logistischen Subzielen bestehenden) Zielgröße generiert und in Fallstudie 2 (vgl. Abschnitt 6.3) entsteht eine Fitnessfunktion, die einen produktionstechnischen Effizienzfaktor (die Energieeffizienz der Reihenfolgepläne) abbildet. Wird der Planungsalgorithmus ausgelöst, erstellt die WMBPRO automatisch einen auf die definierten Parameter ausgerichteten Produktionsreihenfolgeplan.

- (2) Die WMBPRO integriert Daten aus (i) der Betriebsdatenerfassung (Werkzeug- und Maschinenzustände) und (ii) ERP bzw. MES System (aktuelle Bestände an den Anlagen).

Die im Rahmen der Fallstudien entwickelten WMBPROs nutzen Daten aus (i) und (ii). In Fallstudie 1 stammen die Werkzeugzustände aus einem CMS, das echtzeitnahe Sensordaten verarbeitet und zu einem Zustand transformiert. Zur Bildung der Produktionsreihenfolgen werden in Fallstudie 1 und 2 jene Aufträge, die tatsächlich an der Anlage verfügbar sind (Daten aus ERP- und Materialtrackingsystem), genutzt. In Fallstudie 2 kann der Zustand direkt aus dem Produktionsprogramm abgeleitet werden und es bedarf keiner Integration eines CMS. In beiden Fällen wurde die WMBPRO in die bestehende IT-Infrastruktur integriert, um Medienbrüche zwischen Teilsystemen zu vermeiden.

- (3) Die WMBPRO kann in der Form eines Unterstützungswerkzeuges zur Nutzung von Produktionsplanern instrumentalisiert werden.

In Fallstudie 1 und 2 wurden für die entwickelten WMBPROs graphische Benutzeroberflächen geschaffen, um die Methode für die Nutzung von Produktionsplanern zu instrumentalisieren. Dazu wurden die Optimierungsmodelle in eine bestehende IT-Plattform des Anwendungspartners integriert. Um die Akzeptanz der WMBPROs unter den Planern zu erhöhen, wurden zudem Analysefunktionalitäten geschaffen, die zu einem unmittelbar sichtbaren Mehrwert für die Produktionsplaner führen.

Im Rahmen der durchgeführten Fallstudien (vgl. Abschnitt 6) werden die Anforderungen an eine WMBPRO somit, wie in Abschnitt 4.3 dargestellt, erfüllt.

7.1.2 Diskussion der Forschungsfragen

An dieser Stelle werden die in Abschnitt 1.4.4 formulierten Forschungsfragen beantwortet und diskutiert. Forschungsfrage 1 wurde bereits im Rahmen der systematischen Literaturanalyse in Abschnitt 3.2.3 thematisiert und die gewonnenen Erkenntnisse für die Spezifizierung von Problemstellung und Zielsetzung (vgl. Abschnitt 4) instrumentalisiert.

- **Forschungsfrage 2:** Wie können Werkzeug- und Maschinenzustandsinformationen in die Produktionsfeinplanung integriert werden?

- Subforschungsfrage 2.1: Welche Funktionalitäten sind für diese Integration erforderlich?
- Subforschungsfrage 2.2: Wie können diese Funktionalitäten abgebildet werden?

Die Frage nach dem „Wie“, die das zentrale Element des Forschungsparadigmas des Konstruktivismus bildet, wird durch die Darlegung eines Phasenmodells adressiert. Dazu wird in Abschnitt 5 ein Phasenmodell zur Entwicklung einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung vorgestellt (vgl. Abbildung 5.1).¹⁶³ Das Phasenmodell liefert anhand von vier Phasen eine schrittweise Anleitung, wie für einen spezifischen Anwendungsfall eine WMBPRO entwickelt werden kann. Die Funktionalitäten, die zur Integration von Werkzeug- und Maschinenzustandsinformationen in die Produktionsfeinplanung notwendig sind, sind dabei:

- (1) Eine objektive Erfassung von Werkzeug- und Maschinenzuständen sowie die Abbildung der Zustandsinformationen in einer für die Produktionsplanung nutzbaren Form
- (2) Eine Modellierung der Zustandsabhängigkeiten der Produkte in Form von Mindest- und Maximalzuständen sowie produktspezifischen Verschleißeffekten
- (3) Die Abbildung des Produktionssystems aus planungstechnischer Sicht unter Berücksichtigung der modellierten Zustandsabhängigkeiten sowie die Formulierung von Fitnessfunktionen und Nebenbedingungen
- (4) Ein Optimierungsalgorithmus, der die formulierte Fitnessfunktion optimiert

Die Funktionalitäten entsprechen den im Phasenmodell dargestellten Phasen (vgl. Abbildung 5.1). Um in der Instanziierung des Phasenmodells die Funktionalitäten abzubilden, bieten die einzelnen Phasen des Phasenmodells folgende Teilmethoden:

- Phase (1) unterstützt bei der Auswahl und Abbildung eines Condition Monitoring Systems (CMS). Dazu wird ein repräsentativer Überblick über die in der Literatur vorhandenen Ansätze zum Condition Monitoring dargestellt (vgl. Tabelle 5.1). Im Rahmen von Instanziierungen des Phasenmodells kann der Überblick zur Erstellung von Hypothesen hinsichtlich möglicher CMS genutzt werden. Zudem wird eine Methode zur intuitiven Kommunikation der Zustandsinformation in Form von Healthpoints präsentiert.
- Phase (2) widmet sich der Modellierung der Zustandsabhängigkeiten und bietet Methoden zur Abbildung von ein- und mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeiten von Produkten (vgl. Abschnitte 5.3.1 und 5.3.2). Um den aktuellen Megatrend der Produktindividualisierung und den damit verbundenen Anstieg an Produktvarianten (vgl. z.B. Schuh et al., 2018b) abzubilden, wird zudem eine Möglichkeit zur Abbildung von Zustandsabhängigkeiten in der variantenreichen Fertigung dargelegt.

¹⁶³Die Produktionsfeinplanung wird in Form der Produktionsreihenfolgeplanung adressiert.

- In Phase (3) werden vorhandene Methoden aus der Literatur zur Formulierung der Optimierungsziele in Form einer Fitnessfunktion dargestellt und in einen für das Phasenmodell nutzbaren Kontext gebracht. Dabei werden mögliche Einflussfaktoren auf die Produktionsreihenfolgeplanung diskutiert und Modellierungsmöglichkeiten präsentiert. (vgl. Abschnitt 5.4)
- Phase (4) bietet einen Überblick über die in der Literatur verfügbaren und für die Produktionsreihenfolgeoptimierung einsetzbaren Metaheuristiken. Dabei werden drei renommierte Metaheuristiken (Tabu Search, Genetischer Algorithmus und Simulated Annealing) für ein Produktionsreihenfolgeoptimierungsproblem formuliert (vgl. Abschnitt 5.5.1). Zudem wird in Phase (4) eine Methode zur Multi-Level-Optimierung vorgestellt (vgl. Abschnitt 5.5.2), die zur Komplexitätsreduktion der Reihenfolgeprobleme durch die Bildung von Zustandsgruppen eingesetzt werden kann.

Im Rahmen der Anwendung in Abschnitt 6 wurde das Phasenmodell im Kontext von Fallstudien instanziiert und die einzelnen Phasen wurden umgesetzt. Dabei konnte die praktische Anwendbarkeit der abgebildeten Funktionalitäten validiert werden.

- **Forschungsfrage 3:** Welcher Nutzen resultiert aus einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung?

Der Nutzen der durch die Instanzierung des Phasenmodells entstehenden WMBPROs wurde im Rahmen der Fallstudien erhoben und wird in den Abschnitten 6.2.7 und 6.3.7 im Detail präsentiert. In Fallstudie 1 kann im Mittel ein Nutzen von 10,01 % der normierten Fitnessfunktion (multikriterielle, logistische Zielgröße) gegenüber einer manuellen Produktionsreihenfolgeplanung erzielt werden. Das im Rahmen von Fallstudie 2 entwickelte WMBPRO Modell erzielt im Mittel einen Nutzen von 16,34 % der normierten Fitnessfunktion (produktionstechnische Effizienz des dem Aggregat vorgelagerten Ofens), bezogen auf eine manuelle Produktionsreihenfolgebildung.

Somit lässt sich hervorheben, dass der Einsatz einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung, wie in den Fallstudien dargelegt, zu einem quantifizierbaren Nutzen führt. Auch ein qualitativer Nutzen kann durch den Einsatz einer WMBPRO erzielt werden, wie in den Fallstudien dargestellt ist – durch die Instrumentalisierung der WMBPRO in Form eines Unterstützungswerkzeuges für die Planer, werden diese in der Planungstätigkeit entlastet und können die Planungsergebnisse der WMBPRO für weitere, tiefergreifendere Analysen nutzen.

7.2 Weiterer Forschungsbedarf

In Abschnitt 7.1 wurde dargelegt, dass die in der Literatur identifizierten und in Abschnitt 4.3 formulierten Anforderungen an das Phasenmodell sowie die Anforderung an die aus dem Modell resultierenden Artefakte erfüllt werden. Mit den Anforderungen wird, den Grundpositionen

des Konstruktivismus folgend, im Speziellen die Anwendbarkeit der Methode in einer Praxisumgebung sowie die Realisierung eines Nutzens in der Praxis thematisiert. Diese Punkte können im Kontext der durchgeführten Fallstudien bestätigt werden. Das entwickelte Phasenmodell wurde im Rahmen von Fallstudie 1 (vgl. Abschnitt 6.2) und Fallstudie 2 (vgl. Abschnitt 6.3) in der metallverarbeitenden Industrie entwickelt. Wenngleich die Fallstudien unterschiedliche Produktionsprozesse abbilden, so ist das Produkt in beiden Fällen ein Tafelblech. Die Validität des entwickelten Phasenmodells bzw. der Abgleich mit den Anforderungen ist somit nur in diesem Kontext gegeben. Aus Sicht des Autors lässt sich jedoch die Hypothese erstellen, dass das Phasenmodell auch in anderen Instanziierungen (in anderen Branchen) den Anforderungen entsprechend eingesetzt werden kann, da in der Formulierung (vgl. Abschnitt 5) keine domänenspezifischen Einschränkungen getroffen wurden. Zum Überprüfen der Hypothese ist die Durchführung eines β -Tests (Anwendung der Methode in einem alternativen Kontext), wie ihn van Aken (2004, S. 232) vorschlägt, möglich.

Hinsichtlich der inhaltlichen Weiterentwicklungen des Phasenmodells existieren die folgenden Forschungsideen, die über die definierten Rahmenbedingungen der vorliegenden Dissertation hinausgehen:

- **Erweiterung des Phasenmodells um eine Phase zum Meta-Lernen:** Dabei wird das Phasenmodell um eine zusätzliche Phase erweitert. Durch das Ausführen dieser zusätzlichen Phase wird in den entwickelten Artefakten (WMBPROs) ein Prozess geschaffen, der die quasistatischen Parameter automatisiert aktualisiert und an eine veränderliche Umwelt anpasst. Im Speziellen werden dadurch die Zustandsabhängigkeiten (vgl. Phase 2), die Einflussfaktoren (vgl. Phase 3) und die Meta-Parameter der Optimierungsalgorithmen (vgl. Phase 3) thematisiert.
- **WMBPRO-Scheduling:** Das Phasenmodell entwickelt Optimierungsmodelle für eine lokale Optimierung der Produktionsreihenfolgen an einer Anlage, es löst somit ein Einmaschinenproblem. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Verallgemeinerung des Phasenmodells, um auch die Abbildung von Mehrmaschinenproblemen zu ermöglichen. Die Modellierung eines WMBPRO-Netzwerkes ist in diesem Zusammenhang denkbar: In einer zunehmend vernetzten Welt wird die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Systemen zum entscheidenden Wettbewerbsvorteil (vgl. z.B. Zhang et al., 2017). Durch die Vernetzung mehrerer lokaler WMBPROs können Informationen über optimierte Produktionsreihenfolgen zwischen den Systemen ausgetauscht werden – so kann ein Arbeitsplatz A_i die Planungsentscheidungen weiter optimieren, indem die Informationen des vorgelagerten Arbeitsplatzes A_{i-1} im Entscheidungsprozess genutzt werden.

8 Literaturverzeichnis

- Aalaei, A. und Davoudpour, H. (2016). Revised multi-choice goal programming for incorporated dynamic virtual cellular manufacturing into supply chain management: A case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 47:3–15.
- Abdelrahim, E. H. und Vizvári, B. (2017). Simultaneous scheduling of production and preventive maintenance on a single machine. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(7):2867–2883.
- Abedinnia, H., Glock, C. H., und Schneider, M. D. (2017). Machine scheduling in production: A content analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 50:279–299.
- acatech (2015). Smart maintenance für smart factories: Mit intelligenter Instandhaltung die Industrie 4.0 vorantreiben. *acatech POSITION*.
- Adams, T. (2018). Allergen management in food processing operations: Keeping what is not on the package out of the product. in food allergens. *Springer, Cham.*, Seiten 117–130.
- Adeyeri, M. K. und Mpofu, K. (2017). Development of system decision support tools for behavioral trends monitoring of machinery maintenance in a competitive environment. *Journal of Industrial Engineering International*, 13(2):249–264.
- Aghdam, B. H. und Cigeroglu, E. (2016). Functional series tarma models for non-stationary tool vibration signals representation and wear estimation. In *Structural Health Monitoring, Damage Detection & Mechatronics, Volume 7*, Seiten 141–151. Springer.
- Ahmad, M., Nuawi, M. Z., Abdullah, S., Wahid, Z., Karim, Z., und Dirhamsyah, M. (2015). Development of tool wear machining monitoring using novel statistical analysis method, i-kaz™. *Procedia Engineering*, 101:355–362.
- Al-Najjar, B. (2016). Determination of potential failure initiation time using cumulative sum chart. *IFAC-PapersOnLine*, 49(28):43–48.
- Ali, J. B., Fnaiech, N., Saidi, L., Chebel-Morello, B., und Fnaiech, F. (2015). Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals. *Applied Acoustics*, 89:16–27.
- Amari, S. V., McLaughlin, L., und Pham, H. (2006). Cost-effective condition-based maintenance using markov decision processes. *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2006*, Seiten 464–469.
- Ambhore, N., Kamble, D., Chinchankar, S., und Wayal, V. (2015). Tool condition monitoring system: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5):3419–3428.
- Amelian, S., Sajadi, S. M., und Alinaghian, M. (2015). Optimal production and preventive maintenance rate in a failure-prone manufacturing system using discrete event simulation. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 20(4):483.

- Amelian, S. S., Sajadi, S. M., Navabakhsh, M., und Esmaelian, M. (2018). Multi-objective optimization of stochastic failure-prone manufacturing system with consideration of energy consumption and job sequences. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4):483.
- Ansari, F., Glawar, R., und Sihm, W. (2017). Prescriptive maintenance of cpps by integrating multimodal data with dynamic bayesian networks.
- Aramon Bajestani, M. und Beck, J. C. (2015). A two-stage coupled algorithm for an integrated maintenance planning and flowshop scheduling problem with deteriorating machines. *Journal of Scheduling*, 18(5):471–486.
- Arazola, P. J., Özel, T., Umbrello, D., Davies, M., und Jawahir, I. S. (2013). Recent advances in modelling of metal machining processes. *CIRP Annals*, 62(2):695–718.
- Aruvaeli, T., Serg, R., Kaare, K., und Otto, T. (2012a). Monitoring system framework and architecture over supply chain: Researchers' and scientists' conference] ; the 1st daaam international doctoral school was held parallel to the symposium.
- Aruvaeli, T., Serg, R., und Otto, T. (2012b). Machinery utilization monitoring and pause identification prototype model design.
- Asadzadeh, S. M. und Azadeh, A. (2014). An integrated systemic model for optimization of condition-based maintenance with human error. *Reliability Engineering & System Safety*, 124:117–131.
- Atluru, S., Huang, S. H., und Snyder, J. P. (2012). A smart machine supervisory system framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5-8):563–572.
- Ayed, S., Sofiene, D., und Nidhal, R. (2012). Joint optimisation of maintenance and production policies considering random demand and variable production rate. *International Journal of Production Research*, 50(23):6870–6885.
- Baccar, D. und Söffker, D. (2015). Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis. *Mechanical systems and signal processing*, 60-61:198–207.
- Bajestani, A. M., Banjevic, D., und Beck, C. J. (2014). Integrated maintenance planning and production scheduling with markovian deteriorating machine conditions. *International Journal of Production Research*, 52(24):7377–7400.
- Baresel, A., Sthamer, H., und Schmidt, M. (2002). Fitness function design to improve evolutionary structural testing. *Proceedings of the 4th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, Seiten 1329–1336.
- Becker, J., Holton, R., Knackstedt, R., und Niehaves, B. (2003). Forschungsmethodische positionierung in der wirtschaftsinformatik: Epistemologische, ontologische und linguistische leitfragen. *Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster*, (93).

- Beheshti-Fakher, H., Nourelfath, M., und Gendreau, M. (2016). Joint planning of production and maintenance in a single machine deteriorating system. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12):745–750.
- Beheshti Fakher, H., Nourelfath, M., und Gendreau, M. (2017). A cost minimisation model for joint production and maintenance planning under quality constraints. *International Journal of Production Research*, 55(8):2163–2176.
- Bernstein, H. (2014). Messelektronik und sensoren.
- Bhuiyan, M. S. und Choudhury, I. A. (2014). 13.22—review of sensor applications in tool condition monitoring in machining. *Comp. Mater. Process*, 13:539–569.
- Biedermann, H. (2014). Anlagenmanagement im zeitalter von industrie 4.0. *Instandhaltung im Wandel. Industrie*, Seiten 23–32.
- Biedermann, H. (2016a). Lean smart maintenance.
- Biedermann, H. (2016b). Optimierung der instandhaltungsstrategie durch datenanalytische risikoklassifikation und störungsprognose. *GITO-Verlag*, Seiten 71–88.
- Biedermann, H. und Kinz, A. (2019). Lean smart maintenance—value adding, flexible, and intelligent asset management. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 164(1):13–18.
- Blum, C. und Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys (CSUR)*, 35(3):268–308.
- Boudjelida, A. (2017). On the robustness of joint production and maintenance scheduling in presence of uncertainties. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(5–6):541.
- Boukas, E. K. und Liu, Z. K. (2001). Production and maintenance control for manufacturing systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(9):1455–1460.
- Brecher, C., Jeschke, S., Schuh, G., Aghassi, S., Arnoscht, J., Bauhoff, F., Fuchs, S., Jooß, C., Karmann, W. O., und Kozielski, S. (2012). Integrative production technology for high-wage countries. In *Integrative production technology for high-wage countries*, Seiten 17–76. Springer.
- Caili, J., Zhiqiang, L., und Weiwei, C. (2016). Heuristics for the identical machine scheduling problem with preventive maintenances. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 21(1):112–120.
- Chacon, L., Kappatos, V., Balachandran, W., und Gan, T.-H. (2015). A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique. *Applied Acoustics*, 89:88–100.
- Chantrapornchai, C. und Sathapanawat, T. (2011). Heuristic for paper roll selection for corrugation process simulation. *International Conference on U-and E-Service, Science and Technology*.

- Chaudhry, I. A. und Khan, A. A. (2016). A research survey: Review of flexible job shop scheduling techniques. *International Transactions in Operational Research*, 23(3):551–591.
- Chen, W. und Cui, Z. (2011). Pass schedule design for flat-tool forging based on upper bound analysis. *International Journal of Materials and Product Technology*, 40(3/4):199.
- Chen, W.-J. (2008). Sequencing heuristic for scheduling jobs with dependent setups in a manufacturing system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(1-2):176–184.
- Chen, Y.-C. (2006). Optimal inspection and economical production quantity strategy for an imperfect production process. *International Journal of Systems Science*, 37(5):295–302.
- Choudhary, A. K., Harding, J. A., und Tiwari, M. K. (2009). Data mining in manufacturing: A review based on the kind of knowledge. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(5):501–521.
- Claassen, G. D. H. und Hendrix, E. M. T. (2014). On modelling approaches for planning and scheduling in food processing industry. 8580:47–59.
- Contreras, L. R. (2002). Integrating simulation modeling and equipment condition diagnostics for predictive maintenance strategies - a case study - winter simulation conference, 2002. proceedings of the. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*.
- Cooper, C. (1998). Integrated system for mill maintenance. *Pulp and Paper International*, 40(12):19–21.
- Cooper, H. (2016). *Research synthesis and meta-analysis: A step-by-step approach*. Sage publications.
- Cooper, H. M. (1988). Organizing knowledge syntheses: A taxonomy of literature reviews. *Knowledge in society*, 1:104–126.
- D’Addona, D. M., Ullah, A. M. M. S., und Matarazzo, D. (2017a). Tool-wear prediction and pattern-recognition using artificial neural network and dna-based computing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6):1285–1301.
- D’Addona, D. M., Ullah, A. S., und Matarazzo, D. (2017b). Tool-wear prediction and pattern-recognition using artificial neural network and dna-based computing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6):1285–1301.
- Dalvand, F., Kalantar, A., und Safizadeh, M. S. (2016). A novel bearing condition monitoring method in induction motors based on instantaneous frequency of motor voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1):364–376.
- Dehghanian, P. und Kezunovic, M. (2013). Cost/benefit analysis for circuit breaker maintenance planning and scheduling. *North American Power Symposium (NAPS), 2013*.

- Delgado-Arredondo, P. A., Morinigo-Sotelo, D., Osornio-Rios, R. A., Avina-Cervantes, J. G., Rostro-Gonzalez, H., und de Jesus Romero-Troncoso, R. (2017). Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical systems and signal processing*, 83:568–589.
- Denkena, B., Kršninga, S., und Doreth, K. (2012). Operational planning of maintenance measures by means of event-driven simulation. *Procedia CIRP*, 3:61–66.
- Descartes, R. und Cassirer, E. (1996). *Philosophische Schriften: In einem Band. Und" Descartes' Wahrheitsbegriff"*. Meiner.
- Desforges, X., Diévert, M., und Archimède, B. (2017). A prognostic function for complex systems to support production and maintenance co-operative planning based on an extension of object oriented bayesian networks. *Computers in Industry*, 86:34–51.
- Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., und Nacke, L. (2011). From game design elements to gameness: defining gamification.
- Deutsches Institut für Normung (2012). Din 31051:2012-09, grundlagen der instandhaltung.
- Díaz Ramírez, J. und Huertas, J. I. (2018). A continuous time model for a short-term multiproduct batch process scheduling. *Ingeniería e Investigación*, 38(1):96–104.
- Dimla, D. E. und Lister, P. M. (2000a). On-line metal cutting tool condition monitoring.: I: force and vibration analyses. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(5):739–768.
- Dimla, D. E. und Lister, P. M. (2000b). On-line metal cutting tool condition monitoring.: Ii: tool-state classification using multi-layer perceptron neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(5):769–781.
- Do, H. H., Rode, J., Bildmayer, R., und Allee, D. H. (2006). "down with the downtime!": Towards an integrated maintenance and production management process based on predictive maintenance techniques. *GI Jahrestagung*, 2:36–42.
- Doleschal, D. und Klemmt, A. (2015). Yield integrated scheduling using machine condition parameter. *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, Seiten 2953–2963.
- Eglese, R. W. (1990). Simulated annealing: a tool for operational research. *European journal of operational research*, 46(3):271–281.
- Ekkehard, E., Merola, R., und Samaan, D. (2018). The economics of artificial intelligence: Implications for the future of work. *ILO Future of Work Research Paper Series*, 5(41).
- Emami-Mehrgani, B., Nadeau, S., und Kenné, J.-P. (2014). Optimal lockout/tagout, preventive maintenance, human error and production policies of manufacturing systems with passive redundancy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 20(4):453–470.

- Ertel, W. (2016). *Grundkurs Künstliche Intelligenz*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Feng, S., Fan, B., Mao, J., und Xie, Y. (2015). Prediction on wear of a spur gearbox by on-line wear debris concentration monitoring. *Wear*, 336-337:1–8.
- Feng, Y., Huang, X.-d., Hong, R.-j., und Chen, J. (2017). Online residual useful life prediction of large-size slewing bearings—a data fusion method. *Journal of Central South University*, 24(1):114–126.
- Fu, X., Chan, F., Niu, B., Chung, S. H., und Bi, Y. (2017). Intelligent computing theories and application. 10361.
- Galar, D. und Morant, A. (2012). Integration of production data in cm for non-stationary machinery: A data fusion approach.
- Gao, R., Wang, L., Teti, R., Dornfeld, D., Kumara, S., Mori, M., und Helu, M. (2015). Cloud-enabled prognosis for manufacturing. *CIRP Annals*, 64(2):749–772.
- Gao, Y.-c., Feng, Y.-x., und Tan, J.-r. (2014). Multi-principle preventive maintenance: A design-oriented scheduling study for mechanical systems. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 15(11):862–872.
- Géhan, M., Castanier, B., und Lemoine, D. (2014). Integration of maintenance in the tactical production planning process under feasibility constraint. 438:467–474.
- Gendreau, M. und Potvin, J.-Y. (2005). Metaheuristics in combinatorial optimization. *Annals of Operations Research*, 140(1):189–213.
- Gendreau, M. und Potvin, J.-Y. (2010). *Handbook of metaheuristics*. Springer.
- Ghosh, N., Ravi, Y. B., Patra, A., Mukhopadhyay, S., Paul, S., Mohanty, A. R., und Chattopadhyay, A. B. (2007). Estimation of tool wear during cnc milling using neural network-based sensor fusion. *Mechanical systems and signal processing*, 21(1):466–479.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5):533–549.
- Gordon, V., Strusevich, V., und Dolgui, A. (2012). Scheduling with due date assignment under special conditions on job processing. *Journal of Scheduling*, 15(4):447–456.
- Gössinger, R. und Kaluzny, M. (2013). Release of maintenance jobs in a decentralized multi-stage production/maintenance system with continuous condition monitoring. *Journal of Business Economics*, 83(7):727–758.
- Gouriveau, R., Medjaher, K., und Zerhouni, N. (2016). *From prognostics and health systems management to predictive maintenance 1: Monitoring and prognostics*, volume volume 4 of *Reliability of multiphysical systems set*. Wiley, Hoboken, NJ.

- Goyal, D. und Pabla, B. S. (2016). The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(4):585–594.
- Goyal, V., Saini, A., Dhama, S. S., und Pabla, B. S. (2016). Intelligent predictive maintenance of dynamic systems using condition monitoring and signal processing techniques - a review. *ICACCA 2016 : 8-9 Apr. 2016, Tula's Institute, Dehradun, India : proceedings*.
- Graham, R. L. (1966). Bounds for certain multiprocessing anomalies. *Bell Labs Technical Journal*, 45(9):1563–1581.
- Grobler, J., Engelbrecht, A. P., Kok, S., und Yadavalli, S. (2010). Metaheuristics for the multi-objective fjsp with sequence-dependent set-up times, auxiliary resources and machine down time. *Annals of Operations Research*, 180(1):165–196.
- Gyulai, D., Pfeiffer, A., Gabor, N., Gallina, V., Sihm, W., und Monostori, L. (2018). Lead time prediction in a flow-shop environment with analytical and machine learning approaches. *IFAC-PapersOnLine*, (51.11):1029–1034.
- Haddad, H. (2014). Minimizing total weighted tardiness and earliness on a single machine production scheduling problem with multi-task maintenance policy and deteriorating jobs. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(8):6543–6553.
- Hadidi, L. A., Al-Turki, U. M., und Rahim, M. A. (2015). Practical implications of managerial decisions to integrate production scheduling and maintenance. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 6(3):224–230.
- Hadidi, L. A., Turki, U. M. A., und Rahim, M. A. (2012). Joint job scheduling and preventive maintenance on a single machine. *International Journal of Operational Research*, 13(2):174.
- Hajej, Z., Rezg, N., und Gharbi, A. (2017a). Ecological optimization for forecasting production and maintenance problem based on carbon tax. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(5-8):1595–1606.
- Hajej, Z., Rezg, N., und Gharbi, A. (2017b). Joint optimization of production and maintenance planning with an environmental impact study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4):1269–1282.
- Halim, E. B., Shah, S. L., Shoukat Choudhury, M., und Kadali, R. (2008). Application of bicoherence analysis on vibration data for condition based monitoring of rotating machinery. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):4517–4522.
- Hao, L., Bian, L., Gebrael, N., und Shi, J. (2017). Residual life prediction of multistage manufacturing processes with interaction between tool wear and product quality degradation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14(2):1211–1224.

- Helu, M. und Weiss, B. (2016). The current state of sensing, health management, and control for small-to-medium-sized manufacturers. *Proceedings of the ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference*.
- Hering, E. und Schönfelder, G. (2012). Sensoren in wissenschaft und technik. *Funktionsweise und Einsatzgebiete*.
- Herrmann, J. W. (2006). Handbook of production scheduling. 89.
- Herzog, K., Winter, G., Kurka, G., Ankermann, K., Binder, R., Ringhofer, M., Maierhofer, A., und Flick, A. (2017). The digitalization of steel production. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 162(11):504–513.
- Hevner, A. R. (2007). A three cycle view of design science research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19(2).
- Hevner, A. R., March, Salvatore, T., Park, J., und Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 28(1).
- Hirvikorpi, M., Knuutila, T., Leipälä, T., und Nevalainen, O. S. (2007). Job scheduling and management of wearing tools with stochastic tool lifetimes. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19(4):443–462.
- Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. *Ann Arbor, MI: University of Michigan Press and*.
- Honrubia, M. (2017). Industrial iot is booming thanks to a drop in sensor prices.
- Hu, C., Smith, W., Randall, R., und Peng, Z. (2016). Development of a gear vibration indicator and its application in gear wear monitoring. *Mechanical systems and signal processing*, 76:319–336.
- Hu, J., Jiang, Z., und Liao, H. (2017a). Preventive maintenance of a batch production system under time-varying operational condition. *International Journal of Production Research*, 55(19):5681–5705.
- Hu, J., Jiang, Z., und Liao, H. (2017b). Preventive maintenance of a single machine system working under piecewise constant operating condition. *Reliability Engineering & System Safety*, 168:105–115.
- Hume, D. (2016). An enquiry concerning human understanding. In *Seven Masterpieces of Philosophy*, Seiten 191–284. Routledge.
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in science & engineering*, 9(3):90–95.
- Husejnagić, D. und Sluga, A. (2015). A conceptual framework for a ubiquitous autonomous work system in the engineer-to-order environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12):1971–1988.

- Iravani, S. M. und Duenyas, I. (2002). Integrated maintenance and production control of a deteriorating production system. *IIE Transactions*, 34(5):423–435.
- Irfan, M., Saad, N., Ibrahim, R., und Asirvadam, V. S. (2017). Condition monitoring of induction motors via instantaneous power analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6):1259–1267.
- Lung, B., Levrat, E., und Thomas, E. (2007). ‘odds algorithm’-based opportunistic maintenance task execution for preserving product conditions. *CIRP Annals*, 56(1):13–16.
- Jacobs, J., Junker, A., und Letmathe, P. (2009). Zustandsorientierte maschinenzuordnungs- und instandhaltungsplanung. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 79(11):1259–1282.
- Jafari, L. und Makis, V. (2016). Joint optimization of lot-sizing and maintenance policy for a partially observable two-unit system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5-8):1621–1639.
- Jamshidi, R. und Seyyed Esfahani, M. M. (2015). Reliability-based maintenance and job scheduling for identical parallel machines. *International Journal of Production Research*, 53(4):1216–1227.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., und Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7):1483–1510.
- Javed, K., Gouriveau, R., Zemouri, R., und Zerhouni, N. (2012). Features selection procedure for prognostics: An approach based on predictability. *8th IFAC International Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*.
- Javed, K., Gouriveau, R., und Zerhouni, N. (2013a). Novel failure prognostics approach with dynamic thresholds for machine degradation. *2013 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, Seiten 4404–4409.
- Javed, K., Gouriveau, R., Zerhouni, N., und Nectoux, P. (2013b). A feature extraction procedure based on trigonometric functions and cumulative descriptors to enhance prognostics modeling. *IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, Seiten 1–7.
- Jemielniak, K. und Arrazola, P. J. (2008). Application of ae and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(2):97–102.
- Jeniak, A. und Rudek, R. (2010). Scheduling jobs under an aging effect. *Journal of the Operational Research Society*, 61:1041–1048.
- Jeon, S. M. und Kim, G. (2016). A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (ppc). *Production Planning & Control*, 27(5):360–377.

- Jin, X. und Ni, J. (2013). Joint production and preventive maintenance strategy for manufacturing systems with stochastic demand. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135.
- Jing, Z., Hua, J., und Yi, Z. (2017). Multi-objective integrated optimization problem of preventive maintenance planning and flexible job-shop scheduling. Seiten 137–141.
- Joo, J., Yi, G.-R., Cho, H., und Choi, Y.-S. (2001). Dynamic planning model for determining cutting parameters using neural networks in feature-based process planning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12:13–29.
- Kamlah, W. und Lorenzen, P. (1996). Wahrheit und Wirklichkeit. In *Logische Propädeutik*, Seiten 117–150. Springer.
- Kan, C., Yang, H., und Kumara, S. (2018). Parallel computing and network analytics for fast industrial internet-of-things (IIoT) machine information processing and condition monitoring. *Journal of Manufacturing Systems*, 46:282–293.
- Kao, Y.-T., Dauzère-Pérès, S., Blue, J., und Chang, S.-C. (2018). Impact of integrating equipment health in production scheduling for semiconductor fabrication. *Computers & Industrial Engineering*, 120:450–459.
- Karner, M., Glawar, R., Sihm, W., und Matyas, K. (2019). An industry-oriented approach for machine condition-based production scheduling. *Procedia CIRP*, 81:938–943.
- Karner, M. und Sihm, W. (2018). Zustandsüberwachungssysteme zur Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung: Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen zur Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung der variantenreichen Fertigung. *GITO-Verlag*.
- Kazaz, B. und Sloan, T. W. (2008). Production policies under deteriorating process conditions. *IIE Transactions*, 40(3):187–205.
- Kazaz, B. und Sloan, T. W. (2013). The impact of process deterioration on production and maintenance policies. *European Journal of Operational Research*, 227(1):88–100.
- Kenné, J.-P., Gharbi, A., und Beit, M. (2007). Age-dependent production planning and maintenance strategies in unreliable manufacturing systems with lost sale. *European Journal of Operational Research*, 178(2):408–420.
- Khamseh, A., Jolai, F., und Babaei, M. (2015). Integrating sequence-dependent group scheduling problem and preventive maintenance in flexible flow shops. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1-4):173–185.
- Khelifati, S. L. und Benbouzid-Sitayeb, F. (2011). A multi-agent scheduling approach for the joint scheduling of jobs and maintenance operations in the flow shop sequencing problem. *International Conference on Computational Collective Intelligence*, Seiten 60–69.
- Khoudi, A., Berrichi, A., und Yalaoui, F. (2015). Heuristics to maximize system availability on parallel machine scheduling problem. Seiten 1–6.

- Kian, R., Bektaş, T., und Ouelhadj, D. (2018). Optimal spare parts management for vessel maintenance scheduling. *Annals of Operations Research*, 245(2):506.
- Kiangala, K. S. und Wang, Z. (2018). Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9-12):3251–3271.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, D. C., und Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598):671–680.
- Konak, A., Coit, D. W., und Smith, A. E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(9):992–1007.
- Koomsap, P., Shaikh, N. I., und Prabhu *, V. V. (2005). Integrated process control and condition-based maintenance scheduler for distributed manufacturing control systems. *International Journal of Production Research*, 43(8):1625–1641.
- Korte, B. und Vygen, J. (2018). Kombinatorische Optimierung: Theorien und Algorithmen. *Springer-Verlag*.
- Kouedeu, A. F., Kenné, J.-P., Dejax, P., Songmene, V., und Polotski, V. (2015). Production and maintenance planning for a failure-prone deteriorating manufacturing system: A hierarchical control approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9-12):1607–1619.
- Kröning, S. und Denkena, B. (2013). Dynamic scheduling of maintenance measures in complex production systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(4):292–300.
- Kumar, S. und Lad, B. K. (2017). Integrated production and maintenance planning for parallel machine system considering cost of rejection. *Journal of the Operational Research Society*, 68(7):834–846.
- La Fata, C. M. und Passannanti, G. (2017). A simulated annealing-based approach for the joint optimization of production/inventory and preventive maintenance policies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9-12):3899–3909.
- Le, M. D. und Tan, C. M. (2013). Optimal maintenance strategy of deteriorating system under imperfect maintenance and inspection using mixed inspectionscheduling. *Reliability Engineering & System Safety*, 113:21–29.
- Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., und Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems—reviews, methodology and applications. *Mechanical systems and signal processing*, 42(1):314–334.
- Lee, S. und Ni, J. (2013). Joint decision making for maintenance and production scheduling of production systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8):1135–1146.

- Lee, T.-H. (2009). Optimal production run length and maintenance schedule for a deteriorating production system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(9-10):959–963.
- Lei, D. (2011a). Scheduling fuzzy job shop with preventive maintenance through swarm-based neighborhood search. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(9-12):1121–1128.
- Lei, D. (2011b). Scheduling stochastic job shop subject to random breakdown to minimize makespan. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(9-12):1183–1192.
- Lei, D. (2013). Multi-objective artificial bee colony for interval job shop scheduling with flexible maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9-12):1835–1843.
- Leturiondo, U., Salgado, O., Ciani, L., Galar, D., und Catelani, M. (2017). Architecture for hybrid modelling and its application to diagnosis and prognosis with missing data. *Measurement*, 108:152–162.
- Levrat, E., Thomas, E., und Iung, B. (2008). Odds-based decision-making tool for opportunistic production-maintenance synchronization. *International Journal of Production Research*, 46(19):5263–5287.
- Liao, G.-L. (2007). Optimal production correction and maintenance policy for imperfect process. *European journal of operational research*, 182(3):1140–1149.
- Liao, L., Minhas, R., Rangarajan, A., Kurtoglu, T., und de Kleer, J. (2014). A self-aware machine platform in manufacturing shop floor utilizing mtconnect data. *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2014*.
- Liao, W., Wang, Y., und Pan, E. (2012). Single-machine-based predictive maintenance model considering intelligent machinery prognostics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(1-4):51–63.
- Liberopoulos, G., Kozanidis, G., und Hatzikonstantinou, O. (2010). Production scheduling of a multi-grade pet resin plant. *Computers & Chemical Engineering*, 34(3):387–400.
- Lin, L. und Gen, M. (2017). Hybrid evolutionary optimisation with learning for production scheduling: State-of-the-art survey on algorithms and applications. *International Journal of Production Research*, 56(1-2):193–223.
- Lingitz, L., Gallina, V., Ansari, F., Gyulai, D., Pfeiffer, A., Sihm, W., und Monostori, L. (2018). Lead time prediction using machine learning algorithms: A case study by a semiconductor manufacturer. *Procedia CIRP*, 72:1051–1056.
- Liu, C. L. und Layland, J. W. (1973). Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment. *Journal of the ACM*, 20(1):46–61.

- Liu, P. H., Makis, V., und Jardine, A. K. S. (2001). Scheduling of the optimal tool replacement times in a flexible manufacturing system. *IIE Transactions*, 33(6):487–495.
- Locke, J., editor (2016). *Ein Versuch über den menschlichen Verstand: Alle vier Teile in einem Buch*. BoD–Books on Demand.
- Lödding, H., Riedel, R., Thoben, K.-D., Cieminski, G. v., und Kiritsis, D. (2017). *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*.
- Lorenzen, P. (2000). *Lehrbuch der konstruktiven Wissenschaftstheorie*. J.B. Metzler, Stuttgart.
- Lu, K.-Y. und Sy, C.-C. (2009). A real-time decision-making of maintenance using fuzzy agent. *Expert Systems with Applications*, 36(2):2691–2698.
- Macchi, M., Pozzetti, A., und Fumagalli, L. (2014). Industrial implementation of models for joint production and maintenance planning. 438:499–506.
- Maillart, L. M. (2006). Maintenance policies for systems with condition monitoring and obvious failures. *IIE Transactions*, 38(6):463–475.
- March, S. T. und Smith, G. F. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, 15(4):251–266.
- Marshall, C. und Rossman, G. B. (2014). *Designing qualitative research*. Sage publications.
- Martin, K. F. (1994). A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 34(4):527–551.
- März, M. (2017). Instandhaltungsmanagement für die fabrik der zukunft. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(10):690–694.
- Mays, N. und Pope, C. (2000). Qualitative research in health care: Assessing quality in qualitative research. *BMJ: British Medical Journal*, 320(7226):50.
- Mazidi, P., Sanz Bobi, M. A., Shayesteh, E., und Hilber, P. (2017). Impact of health indicators on maintenance management and operation of power systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 231(6):716–731.
- Mehrsai, A., Karimi, H. R., und Thoben, K.-D. (2013). Integration of supply networks for customization with modularity in cloud and make-to-upgrade strategy. *Systems Science & Control Engineering*, 1(1):28–42.
- Michalewicz, Z. (2013). Genetic algorithms + data structures = evolution programs.
- Miller, R. (2015). Cheaper sensors will fuel the age of smart everything.

- Mirabedini, S. N. und Iranmanesh, H. (2014). A scheduling model for serial jobs on parallel machines with different preventive maintenance (pm). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9-12):1579–1589.
- Mitchell, T. M. (1997). Machine learning. 1997. *Burr Ridge, IL: McGraw Hill*, 45(37):870–877.
- Moench, L. und Yugma, C. (2015). Scheduling jobs on parallel machines with qualification constraints. *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*.
- Moghaddass, R. und Ertekin, Ş. (2018). Joint optimization of ordering and maintenance with condition monitoring data. *Annals of Operations Research*, 263(1-2):271–310.
- Moore, G. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, Volume 38.
- Mourtzis, D., Doukas, M., Vlachou, A., und Xanthopoulos, N. (2014). Machine availability monitoring for adaptive holistic scheduling: A conceptual framework for mass customization. *Proceedia CIRP*, 25:406–413.
- Mourtzis, D., Vlachou, E., Zogopoulos, V., und Fotini, X. (2017). Integrated production and maintenance scheduling through machine monitoring and augmented reality: An industry 4.0 approach. 513:354–362,.
- Nandi, S., Toliyat, H. A., und Li, X. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review. *IEEE transactions on energy conversion*, 20(4):719–729.
- Newell, A. und Simon, H. A. (1956). The logic theory machine: A complex information processing system.
- Ni, J., Li, L., Al-Furjan, M. S., Xu, J., und Yang, X. (2017). Establishment and verification of a dynamic cutting force model for metal bandsawing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Seiten 1–10.
- Niu, B., Bi, Y., Chan, F. T. S., und Wang, Z. X. (2015). Srbo algorithm for production scheduling with mold and machine maintenance consideration. In Huang, D.-S., Jo, K.-H., und Hussain, A., editors, *Intelligent Computing Theories and Methodologies*, volume 9226 of *Lecture notes in computer science*, Seiten 733–741. Springer International Publishing, Cham.
- Njike, A. N., Pellerin, R., und Kenne, J. P. (2012). Simultaneous control of maintenance and production rates of a manufacturing system with defective products. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(2):323–332.
- Nodem, D. F. I., Kenne, J.-P., und Gharbi, A. (2011). Production planning and repair/replacement switching policy for deteriorating manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(5-8):827–840.
- Nouri, M., Fussell, B. K., Ziniti, B. L., und Linder, E. (2015). Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89:1–13.

- Oborski, P. (2014). Developments in integration of advanced monitoring systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(9-12):1613–1632.
- Ouaret, S., Kenné, J.-P., Gharbi, A., und Polotski, V. (2016). Age-dependent production and replacement strategies in failure-prone manufacturing systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(3):540–554.
- Ozturkoglu, Y. und Bulfin, R. L. (2011). A unique integer mathematical model for scheduling deteriorating jobs with rate-modifying activities on a single machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(5-8):753–762.
- Pan, E., Liao, W., und Xi, L. (2010). Single-machine-based production scheduling model integrated preventive maintenance planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1-4):365–375.
- Pan, E., Liao, W., und Xi, L. (2012a). A joint model of production scheduling and predictive maintenance for minimizing job tardiness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12):1049–1061.
- Pan, E., Liao, W., und Xi, L. (2012b). A single machine-based scheduling optimisation model integrated with preventive maintenance policy for maximising the availability. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(4):451.
- Panwalkar, S. S. und Iskander, W. (1977). A survey of scheduling rules. *Operations research*, 25(1):45–61.
- Passath, T. und Huber, C. (2019). Dynamische instandhaltungsstrategieanpassung durch anlagenkritikalitätsbewertung. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 164(1):7–12.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., und Thirion, B. (2011). Scikit-learn: Machine learning in python. *Journal of Machine Learning Research*, 12:2825–2830.
- Peirce, C. S. (1974). *Collected papers of charles sanders peirce*. Harvard University Press.
- Peng, H. und van Houtum, G.-J. (2016). Joint optimization of condition-based maintenance and production lot-sizing. *European journal of operational research*, 253(1):94–107.
- Peng, Z. und Kessissoglou, N. (2003). An integrated approach to fault diagnosis of machinery using wear debris and vibration analysis. *Wear*, 255(7-12):1221–1232.
- Perlman, Y., Crispil, E., und Kalir, A. (2015). Production planning and wip assignment for wafer fabrication tools with availability constraints. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 28(3):385–392.
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling*. Springer International Publishing, Cham.
- Powell, D. J. und Rødseth, H. (2013). Ict-enabled integrated operations: Towards a framework for the integration of manufacturing- and maintenance planning and control. *IFIP AICT 415*.

- Prieto, M. D., Cirrincione, G., Espinosa, A. G., Ortega, J. A., und Henao, H. (2013). Bearing fault detection by a novel condition-monitoring scheme based on statistical-time features and neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8):3398–3407.
- Prinzhorn, H., Richter, J., Langner, J., Stonis, M., und Nyhuis, P. (2017). Lot sizing in the forging industry considering lot size dependent tool wear. *Production Engineering*, 12(1):53–63.
- Purohit, B. S. und Kumar Lad, B. (2016). Production and maintenance planning: An integrated approach under uncertainties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9-12):3179–3191.
- Rahmati, S. H. A., Ahmadi, A., und Govindan, K. (2017). A novel integrated condition-based maintenance and stochastic flexible job shop scheduling problem: Simulation-based optimization approach. *Annals of Operations Research*, 153(3):534.
- Rahmati, S. H. A., Ahmadi, A., und Karimi, B. (2018). Multi-objective evolutionary simulation based optimization mechanism for a novel stochastic reliability centered maintenance problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 40:255–271.
- Ratava, J., Lohtander, M., und Varis, J. (2017). Tool condition monitoring in interrupted cutting with acceleration sensors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 47:70–75.
- Rebai, M., Kacem, I., und Adjallah, K. H. (2012). Evolutionary algorithm for scheduling production jobs and preventive maintenance activities. *LNBIP 100*, Seiten 152–161.
- Ringsquandl, M., Lamparter, S., und Lepratti, R. (2015). Estimating processing times within context-aware manufacturing systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3):2009–2014.
- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., und Kenné, J. P. (2013). Joint production and major maintenance planning policy of a manufacturing system with deteriorating quality. *International Journal of Production Economics*, 146(2):575–587.
- Rivera-Gómez, H., Lara, J., Montañó-Arango, O., Hernández-Gress, E. S., Corona-Armenta, J. R., und Santana-Robles, F. (2018a). Joint production and repair efficiency planning of a multiple deteriorating system. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 96(15):1411.
- Rivera-Gómez, H., Montañó-Arango, O., Corona-Armenta, J., Garnica-González, J., Hernández-Gress, E., und Barragán-Vite, I. (2018b). Production and maintenance planning for a deteriorating system with operation-dependent defectives. *Applied Sciences*, 8(2):165.
- Rødseth, H., Schjøberg, P., Wabner Markus, und Frieß, U. (2018). Predictive maintenance for synchronizing maintenance planning with production. 451.
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological review*, 65(6):386.
- Rosqvist, T. (2002). Stopping time optimisation in condition monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 76(3):319–325.

- Rostami, M., Nikraves, S., und Shahin, M. (2018). Minimizing total weighted completion and batch delivery times with machine deterioration and learning effect: A case study from wax production. *Operational Research*, 5(2):287.
- Ruiz-Cárcel, C., Jaramillo, V. H., Mba, D., Ottewill, und Cao, Y. (2016a). Combination of process and vibration data for improved condition monitoring of industrial systems working under variable operating conditions. *Mechanical systems and signal processing*, 66:699–714.
- Ruiz-Cárcel, C., Lao, L., Cao, Y., und Mba, D. (2016b). Canonical variate analysis for performance degradation under faulty conditions. *Control Engineering Practice*, 54:70–80.
- Rustogi, K. und Strusevich, V. A. (2014). Single machine scheduling with time-dependent linear deterioration and rate-modifying maintenance. *Journal of the Operational Research Society*, 66(3):500–515.
- Safari, E. und Sadjadi, S. J. (2011). A hybrid method for flowshops scheduling with condition-based maintenance constraint and machines breakdown. *Expert Systems with Applications*, 38(3):2020–2029.
- Saglam, H. (2011). Tool wear monitoring in bandsawing using neural networks and taguchi's design of experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(9):969–982.
- Salmasnia, A., Kaveie, M., und Namdar, M. (2018). An integrated production and maintenance planning model under vp-t 2 hotelling chart. *Computers & Industrial Engineering*, 118:89–103.
- Salmasnia, A. und Mirabadi-Dastjerd, D. (2017). Joint production and preventive maintenance scheduling for a single degraded machine by considering machine failures. *TOP*, 25(3):544–578.
- Sandelowski, M., Docherty, S., und Emden, C. (1997). Focus on qualitative methods qualitative metasynthesis: Issues and techniques. *Research in nursing and health*, 20:365–372.
- Schmidt, B., Gandhi, K., Wang, L., und Galar, D. (2017). Context preparation for predictive analytics – a case from manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 23(3):341–354.
- Schuh, G., Prote, J.-P., Luckert, M., und Sauermann, F. (2018a). Determination of order specific transition times for improving the adherence to delivery dates by using data mining algorithms. *Procedia CIRP*, 72:169–173.
- Schuh, G., Salmen, M., Kelzenberg, C., und de Lange, J. (2018b). Managing technological entrepreneurship: the engine for economic growth: Picmet' 18 : Portland international conference on management of engineering and technology.
- Schuh, G. und Stich, V. (2012a). *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Springer Vieweg Wiesbaden.

- Schuh, G. und Stich, V. (2012b). *Produktionsplanung und -steuerung 2*. Springer Vieweg Wiesbaden.
- Segreto, T., Simeone, A., und Teti, R. (2013). Multiple sensor monitoring in nickel alloy turning for tool wear assessment via sensor fusion. *Procedia CIRP*, 12:85–90.
- Selaouti, A., Baumgarten, S., und Nickel, R. (2010). Co-ordinated tool maintenance and production planning and control for an integrated production management in a process chain for precision forging. *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology*, Seiten 547–555.
- Shamsaei, F. und van Vyve, M. (2017). Solving integrated production and condition-based maintenance planning problems by mip modeling. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(2):184–202.
- Shanmukha Priya, V., Ramesh, V. R., und Naidu, V. P. (2014). Bearing health condition monitoring: Frequency domain analysis. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Seiten 260–268.
- Shao, H., Wang, H. L., und Zhao, X. M. (2004). A cutting power model for tool wear monitoring in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14):1503–1509.
- Simon, H. A. (1996). *The sciences of the artificial*. MIT press.
- Sinha, S. und Chandel, S. S. (2015). Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic–wind based hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50:755–769.
- Sloan, T. W. (2004). A periodic review production and maintenance model with random demand, deteriorating equipment, and binomial yield. *Journal of the Operational Research Society*, 55(6):647–656.
- Sloan, T. W. und Shanthikumar, G. J. (2000). Combined production and maintenance scheduling for a multiple–product, single–machine production system. *Production and Operations Management*, 9(4):379–399.
- Sloan, T. W. und Shanthikumar, G. J. (2002). Using in-line equipment condition and yield information for maintenance scheduling and dispatching in semiconductor wafer fabs. *IIE Transactions*, 34(2):191–209.
- Sobaszek, L., Gola, A., und Świć, A. (2018). Intelligent systems in production engineering and maintenance - ispem 2017: Proceedings of the first international conference on intelligent systems in production engineering and maintenance ispem 2017. 637.
- Srinivasan, R. und Parlikad, A. K. (2014). Semi-markov decision process with partial information for maintenance decisions. *IEEE Transactions on Reliability*, 63(4):891–898.

- Stich, V., Brosze, T., Bauhoff, F., Gläsner, F., Runge, S., und Groten, M. (2012). High resolution supply chain management – a structural model for optimized planning processes based on real-time data. 384:123–131.
- Suroliya, M., Dhaka, V. S., und Poonia, R. C. (2014). Metaheuristics for communication protocols: Overview and conceptual comparison. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 4.3:353–360.
- Talbi, E.-G. (2009). Metaheuristics: from design to implementation. *John Wiley & Sons*, (74).
- Tambe, P. P. und Kulkarni, M. S. (2014). A novel approach for production scheduling of a high pressure die casting machine subjected to selective maintenance and a sampling procedure for quality control. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 5(3):407–426.
- Tambe, P. P., Mohite, S., und Kulkarni, M. S. (2013). Optimisation of opportunistic maintenance of a multi-component system considering the effect of failures on quality and production schedule: A case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8):1743–1756.
- Taphorn, C. (2014). Factors for a decentralized production and sequence planning from the perspective of products and resources. *FAIM 2014-Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Capturing Competitive Advantage via Advanced Manufacturing and Enterprise Transformation*.
- Tate, A. (1986). *Planning and Condition Monitoring in a FMS*. Artificial Intelligence Applications Institute, University of Edinburgh.
- Thaler, T., Potočnik, P., Bric, I., und Govekar, E. (2014). Chatter detection in band sawing based on discriminant analysis of sound features. *Applied Acoustics*, 77:114–121.
- Tjahjono, B., Teixeira, E. L. S., und Alfaro, S. C. A. (2013). An online simulation to link asset condition monitoring and operations decisions in through-life engineering services. Seiten 159–168.
- Tomislav, S. (2017). Model of integrated system for monitoring and increasing availability and efficiency of production equipment. *MOTSP 2017 - 9th International Scientific Conference*.
- Tranfield, D., Denyer, D., und Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3):207–222.
- Tränkler, H.-R. und Reindl, L. M. (2015). *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Springer-Verlag.
- Turing, A. M. (1950). Turing. computing machinery and intelligence. *mind* lix, 2236: 433-460.

- van Aken, J. E. (2004). Management research based on the paradigm of the design sciences: The quest for field-tested and grounded technological rules. *Journal of management studies*, 41(2):219–246.
- van Aken, J. E. (2005). Management research as a design science: Articulating the research products of mode 2 knowledge production in management. *British Journal of Management*, 16(1):19–36.
- van der Walt, S., Colbert, S. C., und Varoquaux, G. (2011). The numpy array: a structure for efficient numerical computation. *Computing in science & engineering*, 13(2):22.
- Vogl, G. W., Weiss, B. A., und Donmez, M. A. (2015). A sensor-based method for diagnostics of machine tool linear axes. *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 6.
- Vogl, G. W., Weiss, B. A., und Helu, M. (2016). A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 63(1):135.
- Voisin, A., Levrat, E., Cocheteux, P., und Iung, B. (2010). Generic prognosis model for proactive maintenance decision support: Application to pre-industrial e-maintenance test bed. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(2):177–193.
- Vom Brocke, J., Simons, A., Niehaves, B., Reimer, K., Plattfaut, R., und Cleven, A. (2009). Reconstructing the giant: On the importance of rigour in documenting literature search process. *17th European Conference on Information Systems (ECIS 2009)*, Seiten 2206–2217.
- Wang, C.-H. und Lin, T.-W. (2010). Improved genetic algorithm for minimizing periodic preventive maintenance costs in series-parallel systems. Seiten 91–101.
- Wang, D.-J., Liu, F., Wang, J.-J., und Wang, Y.-Z. (2016a). Integrated rescheduling and preventive maintenance for arrival of new jobs through evolutionary multi-objective optimization. *Soft Computing*, 20(4):1635–1652.
- Wang, L. und Lu, Z. (2016). A predictive production planning with condition-based maintenance in a deteriorating production system. *2016 International Conference on Robotics and Automation Engineering, ICRAE 2016*, Seiten 35–38.
- Wang, W. und Zhang, W. (2008). An asset residual life prediction model based on expert judgments. *European journal of operational research*, 188(2):496–505.
- Wang, Y., Xiang, J., Markert, R., und Liang, M. (2016b). Spectral kurtosis for fault detection, diagnosis and prognostics of rotating machines: A review with applications. *Mechanical systems and signal processing*, 66:679–698.
- Wessels, W. R. (2003). : Cost-optimized scheduled maintenance interval for reliability-centered maintenanceusa, january 27-30, 2003. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*.

- Wolter, A. und Helber, S. (2016). Simultaneous production and maintenance planning for a single capacitated resource facing both a dynamic demand and intensive wear and tear. *Central European Journal of Operations Research*, 24(3):489–513.
- Wright, J. A. und Farmani, R. (2001). Genetic algorithms: A fitness formulation for constrained minimization.
- Xanthopoulos, A. S., Koulouriotis, D. E., und Botsaris, P. N. (2015). Single-stage kanban system with deterioration failures and condition-based preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 142:111–122.
- Xiang, Y. und Cassady, C. R. (2007). Comparing scheduled and condition-based maintenance policies for single-unit systems operated in markovian environments. *Proceedings of the 2007 Industrial Engineering Research Conference*.
- Yang, S.-J., Hsu, C.-J., und Yang, D.-L. (2012). Single-machine scheduling and slack due-date assignment with aging effect and deteriorating maintenance. *Optimization Letters*, 6(8):1855–1873.
- Yang, X.-S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press.
- Yildirim, M. B. und Nezami, F. G. (2014). Integrated maintenance and production planning with energy consumption and minimal repair. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(9-12):1419–1430.
- You, M.-Y. (2017). A predictive maintenance system for hybrid degradation processes. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(7):1123–1135.
- You, M.-Y., Liu, F., und Meng, G. (2011). Benefits from condition monitoring techniques: A case study on maintenance scheduling of ball grid array solder joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 225(3):205–215.
- Yugma, C., Blue, J., Dauzère-Pérès, S., und Obeid, A. (2015). Integration of scheduling and advanced process control in semiconductor manufacturing: Review and outlook. *Journal of Scheduling*, 18(2):195–205.
- Yulan, J., Zuhua, J., und Wenrui, H. (2008). Multi-objective integrated optimization research on preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9-10):954–964.
- Zandieh, M., Khatami, A. R., und Rahmati, S. H. A. (2017). Flexible job shop scheduling under condition-based maintenance: Improved version of imperialist competitive algorithm. *Applied Soft Computing*, 58:449–464.
- Zhai, S. und Reinhart, G. (2018). Predictive maintenance als wegbereiter für die instandhaltungsgerechte produktionssteuerung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(5):298–301.

- Zhang, C., Yao, X., Zhang, J., und Jin, H. (2016). Tool condition monitoring and remaining useful life prognostic based on a wireless sensor in dry milling operations. *Sensors*, 16(6):795.
- Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S., und Fu, J. (2017). Review of job shop scheduling research and its new perspectives under industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(3).
- Zhang, M., Lu, L., Wang, W., und Zeng, D. (2018). The roles of thread wear on self-loosening behavior of bolted joints under transverse cyclic loading. *Wear*, 394-395:30–39.
- Zheng, Y., Mesghouni, K., und Collart Deutilleul, S. (2013). Condition based maintenance applied to reduce unavailability of machines in flexible job shop scheduling problem. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9):1405–1410.
- Zhou, J.-H., Pang, C. K., Zhong, Z.-W., und Lewis, F. L. (2011). Tool wear monitoring using acoustic emissions by dominant-feature identification. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(2):547–559.
- Zhu, N., Tanaka, C., und Ohtani, T. (2002). Automatic detection of damaged bandsaw teeth during sawing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 60(3):197–201.
- Zulkaffi, N. I. und Kopanos, G. M. (2017). Integrated condition-based planning of production and utility systems under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 167:776–805.

9 Nomenklatur

ERP	Enterprise Ressource Planning
ACO	Ant Colony Optimization
Alg.	Algorithmus
ANN	Artificial Neuronal Networks
APC	Advanced Process Control
ARMA	autoregressive moving average
BZ	Bearbeitungszeit
bzw.	beziehungsweise
CA	Content Analysis
ca.	circa
CBM	condition-based maintenance
CM	Condition Monitoring
CMS	Condition Monitoring System
DS	Datensatz
EHI	Equipment Health Indicator
engl.	englisch
ERP	Enterprise Resource Planning
FFT	Fast Fourier Transformation

FIFO	First-In-First-Out
FLT	Frühester-Liefertermin
GA	Genetischer Algorithmus
GA	genetischer Algorithmus
GLS	Guided Local Search
GPS	Global Positioning System
GRAS	Greedy Randomized Adaptive Search
GUI	Graphical User Interface
HIC	Hill Climbing
HP	Healthpoints
ibid	ibidem
ILS	Iterated Local Search
IS	Informationssysteme
IT	Informationstechnik
IZ	Instandsetzungszeit
KI	künstlichen Intelligenz
KOZ	Kürzeste-Operationszeit
LIFO	Last-In-First-Out
LOZ	Längste-Operationszeit
LSM	Lean Smart Maintenance
MCSA	Motor-Current-Signature-Analysis
MES	Manufacturing Execution System
MIP	Mixed Integer Programming
ML	Machine Learning
MLO	Multi-Level-Optimierung
NP	Non-Deterministic Polynomial-Time
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PCA	principal component analysis
PHM	Prognostics and Health Management
PPS	Produktionsplanung und -Steuerung
PRP	Produktionsreihenfolgeplan
RUL	remaining useful life
SA	Simulated Annealing
StdAbw	Standardabweichung
TCM	Tool Condition Monitoring
TS	Tabu Search
TSA	time synchronious average
VNS	Variable Neighborhood Search
WMBPRO ...	Werkzeug- und maschinenzustandsbedingte Produktionsreihenfolgeoptimie- rung
ÜZ	Übergangszeit

10 Tabellenverzeichnis

2.1	Gegenüberstellung unterschiedlicher Zeitkomplexitäten	23
3.1	Schlüsselbegriffe der systematischen Literaturanalyse	37
3.2	Kategorien der systematischen Literaturrecherche	38
5.1	Repräsentativer Primärliteraturüberblick „Condition Monitoring“	58
5.2	Zustandsklassifizierung im eindimensionalen Fall	66
5.3	Zustandsklassifizierung im mehrdimensionalen Fall	68
5.4	Möglichkeiten zur Formulierung einer kostenbasierten Fitnessfunktion	75
5.5	Einteilung der Einflussfaktoren	76
6.1	Angewendete Regressionsalgorithmen (Fallstudie 1)	95
6.2	Beispielmesswerte Zustandsabhängigkeiten (Fallstudie 1)	99
6.3	Gegenüberstellung unterschiedlicher Metaheuristiken (Fallstudie 1)	108
6.4	Nutzenbewertung (Fallstudie 1)	110
6.5	Nutzenbewertung (Fallstudie 2)	124
6.6	Gegenüberstellung der Fallstudien	128
A.1	Ergebnisse der Literaturrecherche	169
A.2	Morphologische Literaturkategorisierung	172
A.3	Numerische Werte Regressionsmodell (Fallstudie 1)	191
A.4	Nutzenbewertung Monat D (Fallstudie 1)	193
A.5	Vom Autor der Dissertationsschrift betreute Bachelor- und Masterarbeiten	194

11 Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Aufbau der Dissertation	4
1.2	Ordnungsrahmen der Wissenschaftstheorie	5
1.3	Forschungsrahmenwerk nach March und Smith	9
1.4	Forschungsrahmenwerk	10
1.5	Forschungsdesign: Prozessdarstellung, Primärprozess	13
1.6	Forschungsdesign: Prozessdarstellung, Forschungsmethodologie	15
1.7	Forschungsdesign: Prozessdarstellung, Literaturanalyse	15

2.1	Einteilung der Optimierungsalgorithmen	22
2.2	Einteilung ML-Algorithmen	30
2.3	Venn-Diagramm: Forschungsbereiche	32
5.1	Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO	53
5.2	Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO als Flussdiagramm	54
5.3	Flussdiagramm Phase 1	56
5.4	Flussdiagramm Phase 2	64
5.5	Flussdiagramm Phase 3	73
5.6	Funktionale Darstellung Repräsentationsmodell	77
5.7	Sequentielle Abhängigkeit	77
5.8	Flussdiagramm Phase 4	81
5.9	Generischer Entscheidungsbaum	87
5.10	Beispielhafter Entscheidungsbaum ($k=2, m=3$)	87
5.11	Endknoten unterschiedlich komplexer Entscheidungsbäume	88
5.12	Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO, Phase 1	90
5.13	Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO, Phase 2	90
5.14	Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO, Phase 3	91
5.15	Phasenmodell zur Entwicklung einer WMBPRO, Phase 4	91
6.1	Fallstudie 1: Phase 1	94
6.2	Tafelblechscher ML-Modell, Metriken (Fallstudie 1)	96
6.3	Gemessene vs. prognostizierte HP (Fallstudie 1)	97
6.4	Anwendung des ML-Modells zur Zustandsberechnung (Fallstudie 1)	97
6.5	Fallstudie 1: Phase 2	98
6.6	Histogramm HP (Fallstudie 1)	100
6.7	Histogramm Verschleißeffekte (Fallstudie 1)	101
6.8	Fallstudie 1: Phase 3	102
6.9	Modellierung der Reihenfolgeabhängigkeit (Fallstudie 1)	103
6.10	Fallstudie 1: Phase 4	107
6.11	Boxplot: Gegenüberstellung Metaheuristiken (Fallstudie 1)	109
6.12	Zunehmende Walzeneinkerbung (Fallstudie 2)	112

6.13 Fallstudie 2: Phase 1	114
6.14 Fallstudie 2: Phase 2	115
6.15 Fallstudie 2: Phase 3	117
6.16 Abbildung des Produktionsreihenfolgeplanungsprozesses (Fallstudie 2)	119
6.17 Fallstudie 2: Phase 4	121
6.18 Entscheidungsbaum für 3 vorhandene HP-Gruppen (Fallstudie 2)	123
6.19 Temperaturdelta zwischen den Methoden	125
A.1 Visualisierung der Suchtreffer der systematischen Literaturrecherche	168
A.2 Überblick der häufigsten Journale und Konferenzen	170
A.3 Überblick der Publikationen der systematischen Literaturrecherche	177
A.4 Art der Publikation und Lösung	178
A.5 Fokus	179
A.6 Instandhaltungsstrategie	180
A.7 Planungsbereich	181
A.8 Art der Zustandsüberwachung und Evaluierungsform	182
A.9 Branche (System. Literaturrecherche)	182
A.10 Condition Monitoring, Messung (System. Literaturrecherche)	183
A.11 Condition Monitoring, Datenauswertung (System. Literaturrecherche)	184
A.12 Optimierungsalgorithmus (System. Literaturrecherche)	185
A.13 Legende Flussdiagramm	186
A.14 Abbildung des Produktionsprozesses (Fallstudie 1)	192

12 Formel- und Gleichungsverzeichnis

5.1 Zustandsabhängigkeit (WMBPRO)	66
5.2 Zustandsänderung (WMBPRO)	67
5.3 Maximierungsproblem	72
5.4 Minimierungsproblem	72
5.5 Gesamtkostenfunktion (WMBPRO)	75
5.6 Fitnessfunktion (WMBPRO)	75
5.7 Lösungsmöglichkeiten in der Multi-Level-Optimierung	87

6.1	Regressionsfunktion: Healthpoints (Fallstudie 1)	96
6.2	Postprocessing CM (Fallstudie 1)	97
6.3	Zuordnung der Produktgruppe (Fallstudie 1)	99
6.4	Berechnung der Verschleißeffekte (Fallstudie 1)	99
6.5	Berechnung der Fitness (Fallstudie 1)	102
6.6	Reihenfolgeabhängiger Folgezeitpunkt (Fallstudie 1)	104
6.7	Reihenfolgeabhängiger Folgemaschinenzustand (Fallstudie 1)	104
6.8	Terminverzugskosten eines Auftrages (Fallstudie 1)	104
6.9	Subzielfunktion: Termintreue (Fallstudie 1)	104
6.10	Fertigungskosten eines Auftrages im Detail (Fallstudie 1)	105
6.11	Fertigungskosten eines Auftrages (Fallstudie 1)	105
6.12	Subzielfunktion: Auslastung (Fallstudie 1)	105
6.13	Bestandskosten eines Auftrages (Fallstudie 1)	105
6.14	Subzielfunktion: Bestand (Fallstudie 1)	105
6.15	Instandsetzungskosten eines Auftrages (Fallstudie 1)	106
6.16	Subzielfunktion: Instandsetzung (Fallstudie 1)	106
6.17	Prozentuale Verbesserung der Fitness	110
6.18	Berechnung der Gesamttemperaturdifferenz (Fallstudie 2)	118
6.19	Temperaturdelta (Fallstudie 2)	118
6.20	Berechnung der Fitness (Fallstudie 2)	118
6.21	Kostenfunktion Aufheizen/Abkühlen (Fallstudie 2)	118
6.22	Alternative Fitnessfunktion (Fallstudie 2)	119

13 Algorithmenverzeichnis

5.1	Tabu Search	83
5.2	Simulated Annealing	84
5.3	Generieren einer Nachbarlösung	84
5.4	Genetischer Algorithmus	85
5.5	Kreuzungsoperator (Genetischer Algorithmus)	86

14 Sourcecodeverzeichnis

A.1	Tabu Search (Python)	186
A.2	Simulated Annealing (Python)	187
A.3	Generieren einer Nachbarlösung (Python)	187
A.4	Genetischer Algorithmus (Python)	188
A.5	Kreuzungsoperator, Genetischer Algorithmus (Python)	188
A.6	Generische Funktion zum Enummerieren der Lösungsstrategien (C++)	189

A Appendix

A.1 Detailausführungen zur Durchführung der systematischen Literaturrecherche

A.1.1 Diskussion und Auswahl vorhandener Recherchemethodologien

In der Fachliteratur werden unterschiedliche Vorgehensweisen und Methoden zur Literaturrecherche angewendet. Etabliert ist dabei eine Methode aus den 1980ern von Cooper (1988), die auch in aktuellen Werken noch häufig Anwendung findet.¹⁶⁴ Cooper präsentiert eine Taxonomie zur Wissenssynthese bestehend aus sechs Charakteristika. Jede Charakteristik kann eine aus mehreren vordefinierten Klassen annehmen (vgl. Cooper, 1988, S. 109):

- **Fokus:** Ergebnisse, Methoden, Theorien, Praktiken oder Anwendungen
- **Ziel:** kritische Beschreibung, Identifizieren zentraler Probleme, Integrieren bzw. Synthetisieren (Generalisierung, Konfliktregelung, Linguistik)
- **Perspektive:** neutrale Position, kritische Position
- **Abdeckungsgrad:** vollständig, vollständig selektiv, repräsentativ, rein selektiv
- **Organisation:** historisch, methodisch / konzeptionell
- **Publikum:** spezielles oder allgemeines Fachpublikum, praxisorientiertes Publikum, allgemeine Öffentlichkeit

Anhand der Positionierung innerhalb der Charakteristika, kann ein Recherchevorhaben definiert und begründet werden, wodurch die Interpretation der Ziele einer Literaturrecherche für den Leser intuitiv verständlicher wird.

Recherchemethoden unterscheiden sich in ihren Details je nach Forschungsbereich. Speziell im Bereich der Managementwissenschaften herrscht oft eine rein narrative Form der Literaturrecherche vor, wie Tranfield et al. (2003) in ihrer Arbeit kritisieren. Die Autoren ziehen in ihrer Publikation die Disziplin Medizin als Best Practice im Kontext von Literaturrecherchen heran und entwickeln einen evidenzbasierten Ansatz zur Durchführung systematischer Literaturrecherchen. Dabei modellieren sie einen Prozess, der aus drei Stufen (Orig.: „*Stages*“) besteht (vgl. Tranfield et al., 2003, S. 214):

Stage I – Planung der Literaturrecherche: Unter der ersten Stufe verstehen Tranfield et al. einen iterativen Prozess aus Definition, Klassifikation und Verfeinerung der Rechercheziele und dem Erstellen eines Rechercheplans. Dabei ist speziell das Formulieren einer Forschungsfragestellung (Was ist das Ziel der Literaturrecherche?) ein essentieller Schritt.¹⁶⁵ Das Rechercheplan dient der Sicherstellung der Objektivität der Recherche, indem darin alle wesentlichen Schritte

¹⁶⁴ u.a. Marshall und Rossman, 2014; Cooper, 2016; Vom Brocke et al., 2009

¹⁶⁵ Das kann, zum Beispiel, eine initiale Hypothese einer Forschungslücke (die z.B. aus Beobachtungen in der Praxis entstammt) sein, die es gilt mit einer systematischen Literaturrecherche nachzuweisen.

definiert und festgehalten werden. Im Speziellen werden darin Randbedingungen wie Zeiträume, Publikationsarten und Datenbanken festgelegt. Zudem werden Qualitätskriterien festgelegt, anhand derer Publikationen hinsichtlich ihrer Relevanz und Güte im Kontext der Rechercheaufstellung bewertet werden. Jeglicher Ausschluss von Publikationen kann somit objektiv bewertet werden. (Tranfield et al., 2003, S. 214 f.)

Stage II – Durchführung der Literaturrecherche: Eine comprehensive Recherche ohne Bias bildet den fundamentalen Unterschied zwischen einer traditionellen, narrativen und einer systematischen Literaturanalyse. Den Ausgangspunkt der Recherche stellt dabei die Auswahl zentraler Schlüsselwörter dar, die aus einer selektiven Voranalyse stammen. Die Suchbegriffe werden dann durch logische Kombinationen (und, oder, nicht etc.) aus den Schlüsselbegriffen gebildet. In Kombination mit den im Rechercheproposal festgelegten Randbedingungen (vgl. Stage I) kann die Literatursuche durchgeführt werden, deren Ergebnis eine Liste an Publikationen bildet – die Basis der Literaturanalyse. Die Publikationen werden hinsichtlich ihrer Qualität bewertet, wobei im Rechercheproposal definierte Qualitätskriterien als Bewertungskriterium dienen. Werden Mindestkriterien nicht erfüllt, führt dies zum Ausschluss der betroffenen Publikation aus der Liste.¹⁶⁶ Nach abgeschlossener Selektion der Publikationen, gilt es aus ihnen Daten und Informationen zu extrahieren. Neben generellen Informationen (Titel, Autoren, Publikationsdetails) werden dabei auch Features und spezifische Informationen (Details, Methoden) analysiert.¹⁶⁷ Die Features, die der Klassifikation der Publikationen dienen, werden zunächst initial festgelegt, bei fortlaufender Analyse kann eine Erweiterung um zusätzliche Features notwendig sein – der Prozess der Informationsextraktion ist iterativ. Ergebnis der Informationsextraktion ist eine aggregierte Repräsentation des in den Publikationen steckenden Wissens, die bis zu diesem Schritt unabhängig voneinander betrachtet wurden. In der Informationssynthese gilt es die unterschiedlichen Publikationen gegenüberzustellen. Im Bereich der Managementwissenschaften ist Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Publikationen aufgrund der starken Unterschiede in den Forschungsfragen oft erschwert, wodurch sich zur Informationssynthese speziell Metaanalysen eignen. Zur Beschreibung und inhaltlichen Gegenüberstellung unterschiedlicher Publikationen eignen sich zudem narrative Analysen, die jedoch oft einen stark subjektiven Einfluss aufweisen. (Tranfield et al., 2003, S. 215 ff.)

Stage III – Literaturanalyse und Präsentation der Ergebnisse: Qualitativ hochwertige Literaturanalysen zeichnen sich laut den Autoren Tranfield et al. dadurch aus, dass Ergebnisse aus der Primärliteratur synthetisiert werden und dadurch Anwendern einen besseren Einblick in den Forschungsgegenstand verleihen. Speziell für die Disziplin Managementwissenschaften heben die Autoren hervor, dass die Ergebnisse zweistufig analysiert werden sollten: (i) quantitativ-

¹⁶⁶Sind die zu Grunde liegenden Publikationen quantitativ bewertbar, so kann ein Ausschluss durch die Unterschreitung eines Mindestwertes an statistischer Signifikanz begründet werden. Die Bewertung qualitativer Studien gestaltet sich hingegen schwieriger. Zu deren Bewertung berufen sich Tranfield et al. (2003) auf Arbeiten aus der Medizin, wie z.B. von Sandelowski et al. (1997), Mays und Pope (2000). In den Managementwissenschaften dient, laut Tranfield et al., oft die Bewertung eines Journals der impliziten Bewertung der Qualität einer wissenschaftlichen Publikation.

¹⁶⁷Dabei werden die Features für alle Publikationen in der finalisierten Publikationsliste abgeleitet.

deskriptive Analyse der Rechercheergebnisse (Kategorisierung der Literatur anhand eines Sets an Features) und (ii) kritisch-inhaltliche Analyse der recherchierten Publikationen (z.B. narrative Literaturdiskussion). (Tranfield et al., 2003, S. 218 f.)

A.1.2 Detailübersicht der Kategorien

(1) Art der Publikation: Die Art der Publikation dient der Klassifikation des Publikationstyps.

- **Literaturüberblick:** In diese Kategorie fallen jene Publikationen, deren Fokus auf der Analyse und Diskussion vorhandener Ansätze liegt.
- **Konzipierung:** Publikationen fokussieren die konzeptionelle Vorstellung von Ansätzen, Modellen und Methoden zur Integration von Condition Monitoring und Produktionsplanung. Die Anwendung der Konzepte ist in dieser Kategorie nicht vorhanden bzw. spielt eine untergeordnete Rolle.
- **Fallstudie:** Jene Publikationen, deren Fokus auf der Anwendung bereits vorhandener Ansätze, Modelle und Methoden zur Integration von Condition Monitoring und Produktionsplanung liegt.

(2) Art der Lösung: Die Art der Lösung klassifiziert den Lösungsteil der Publikation. Die verschiedenen Lösungsarten sind dabei angelehnt an die Lösungsdimensionen nach March und Smith (1995) (vgl. Abschnitt 1.4).

- **Ansatz:** Ein Ansatz beschreibt eine wenig konkrete Idee zur Problemlösung. Darunter werden jene Publikationen eingeordnet, die das Problem identifizieren und konzeptionelle Ideen zu dessen Lösung präsentieren.
- **Modell:** Publikationen dieser Kategorie stellen Modelle vor, die anwendungsfallsspezifische Lösungen oder generische Modelle sein können.
- **Methode:** In diese Kategorie werden jene Publikationen eingeordnet, die eine Methode (bzw. eine Vorgehensweise) vorstellen, wie ein Modell eingesetzt werden kann.
- **Instanziierung:** Darin werden jene Publikationen eingeordnet, die ein Modell oder eine Methode anwenden und dabei auf die Beschreibung der Anwendung und deren Ergebnisse fokussieren.

(3) Anwendungsbereich: Der Anwendungsbereich beschreibt, ob eine Lösung generisch oder spezifisch ist.

- **Spezifisch:** Publikationen dieser Kategorie beinhalten die Entwicklung von Lösungen für spezifische Anwendungsfälle. Spezifisch bezieht sich dabei auf die initiale Problemstellung,

den Lösungsweg und die Restriktionen. Diese Lösungen können nur unter aufwendiger Rekonstruktion für andere Problemstellungen angewendet werden.

- **Allgemein:** Lösungen werden als allgemein betrachtet, wenn sie sich mit begrenztem Rekonstruktionsaufwand auch auf ähnlich Probleme anwenden lassen.

(4) **Fokus:** Im Rahmen der systematischen Literaturanalyse werden Arbeiten untersucht, die sowohl das Thema Condition Monitoring beinhalten, als auch die Produktionsplanung thematisieren. Der Fokus beschreibt welches der Themen im Vordergrund steht.

- **Condition Monitoring:** Die Publikation fokussiert das Thema CM.
- **Instandhaltung:** Die Publikation fokussiert nicht direkt das Thema CM, sondern Instandhaltung im Allgemeinen (z.B. Condition-based Maintenance).
- **Produktionsplanung:** Die Publikation fokussiert das Thema Produktionsplanung.
- **Integration Condition Monitoring und Produktionsplanung:** Die Publikation fokussiert sowohl CM als auch Produktionsplanung und thematisiert im Speziellen deren Integration.
- **Integration Instandhaltung und Produktionsplanung:** Die Publikation fokussiert Instandhaltung und Produktionsplanung und thematisiert im Speziellen deren Integration.

(5) **Instandhaltungsstrategie:** Die Instandhaltungsstrategie beschreibt die Art, wie die Instandhaltung modelliert wird. In der Literatur gibt es dabei grundsätzlich eine vierstufige Gliederung, die auch in der Klassifizierung übernommen wird. Die Kategorien sind dabei:

- Von **korrektiver Instandhaltung** wird dann gesprochen, wenn die Instandhaltungstätigkeiten erst nach einem Ausfall durchgeführt werden.
- Unter **präventiver Instandhaltung** wird eine zeitbasierte Strategie verstanden, die einfache Modelle (z.B. Betriebsstunden) verwendet, um Komponenten vor einem Ausfall auszutauschen.
- Als **prädiktive Instandhaltung** werden jene Strategien klassifiziert, die zur Auswahl des Instandhaltungszeitpunktes auch Prognosemodelle (Veränderung des Komponentenzustandes in der nächsten Zeit) beinhalten, um vorherzusagen wann eine bestimmte Komponente ausfallen wird.
- **Präskriptive Instandhaltung** ist eine Strategie, bei der nicht nur der Ausfallzeitpunkt prognostiziert wird, sondern bereits eine Handlung (Art der durchzuführenden Instandsetzungstätigkeit) abgeleitet wird.

(6) Planungsbereich: Produktionsplanung kann grundsätzlich in Grob- und Feinplanung unterteilt werden (unterschiedliche Planungszeithorizonte). Zudem ist eine weitere Aufteilung in Produktionssteuerung möglich (vgl. Schuh und Stich, 2012a). Die Klasse Planungsbereich beschreibt den fokussierten Planungsbereich.

- **Produktionsgrobplanung:** In diese Kategorie werden jene Publikationen eingeordnet, die CM-Systeme in die grobe (langfristige) Produktionsplanung miteinbeziehen.
- **Produktionsfeinplanung:** Publikationen dieser Kategorie behandeln die Integration von CM in die kurzfristige Produktionsfeinplanung.
- **Produktionssteuerung:** Diese Kategorie beinhaltet jene Publikationen, die CM im Rahmen der Produktionssteuerung (kurzfristig, ad hoc) integrieren.

(7) Condition Monitoring: Zustandsüberwachung kann in unterschiedlichen Formen erfolgen – während nicht-kontinuierliches CM bereits seit den 1980ern Einsatzbereiche findet (vgl. Lee et al., 2014), ist kontinuierliches CM erst seit dem rapiden Preisverfall der Sensorik (vgl. Honrubia, 2017; Miller, 2015) wirtschaftlich möglich. Die Klasse dient der Abgrenzung der beiden Formen von CM.

- **Kein CM:** In der Publikation wird das Condition Monitoring nicht explizit beschrieben. Der Zustand wird als gegeben betrachtet bzw. mathematisch modelliert.
- **Offline CM:** Die Bewertung der Zustände erfolgt nicht kontinuierlich (offline). Das kann z.B. eine manuelle Einschätzung sein oder eine Messung während eines Stillstandes.
- **Online CM:** Die Bewertung der Zustände erfolgt kontinuierlich (online).

(8) Evaluierung: Diese Klasse beschreibt die Evaluierungsform.

- **Keine Evaluierung:** Die vorgestellte Lösung wird in der Publikation nicht evaluiert.
- **Theoretisch:** Die vorgestellte Lösung wird mittels theoretischer Methoden (z.B. Simulation) evaluiert.
- **Praktisch:** Die vorgestellte Lösung wird anhand einer Fallstudie evaluiert.

(A) Branche: Die Branche zählt zu den kontinuierlichen Klassen und dient der Beschreibung der Branche in der die Lösung der Publikation entwickelt wurde. Ein Eintrag könnte, zum Beispiel, die „Metallverarbeitende Industrie“ sein.

(B) Messung: Wird in der Publikation Condition Monitoring (online oder offline) thematisiert, so wird in der Klasse „Messung“ das durch das CM erfasste Messsignal angeführt. Dabei können auch mehrere Einträge je Publikation existieren (z.B. wenn mehrere Signale aufgezeichnet werden).

(C) Datenauswertung: In dieser Kategorie wird angeführt, wie die messtechnisch erfassten Signale (vgl. Kategorie (B) Messung) zur Extraktion der Zustandsinformationen weiterverarbeitet werden. Das kann, zum Beispiel, „Machine Learning“ sein. Analog zu Klasse B ist es möglich, dass mehrere Einträge je Publikation existieren (z.B. wenn mehrere verschiedene Auswertungsmethoden angewendet werden).

(D) Optimierungsalgorithmus: Speziell im Rahmen der Produktionsfeinplanung werden häufig Optimierungsalgorithmen eingesetzt, um beispielsweise Produktionsreihenfolgen zu optimieren (vgl. Abschnitt 2.2). In der Kategorie (D) wird der in der Publikation angewendete Optimierungsalgorithmus angeführt, wobei auch Mehrfacheinträge möglich sind (wenn z.B. mehrere Algorithmen gegenübergestellt werden).

A.1.3 Durchführung Systematische Literaturrecherche

Die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche sind in Tabelle A.1 dargestellt.¹⁶⁸

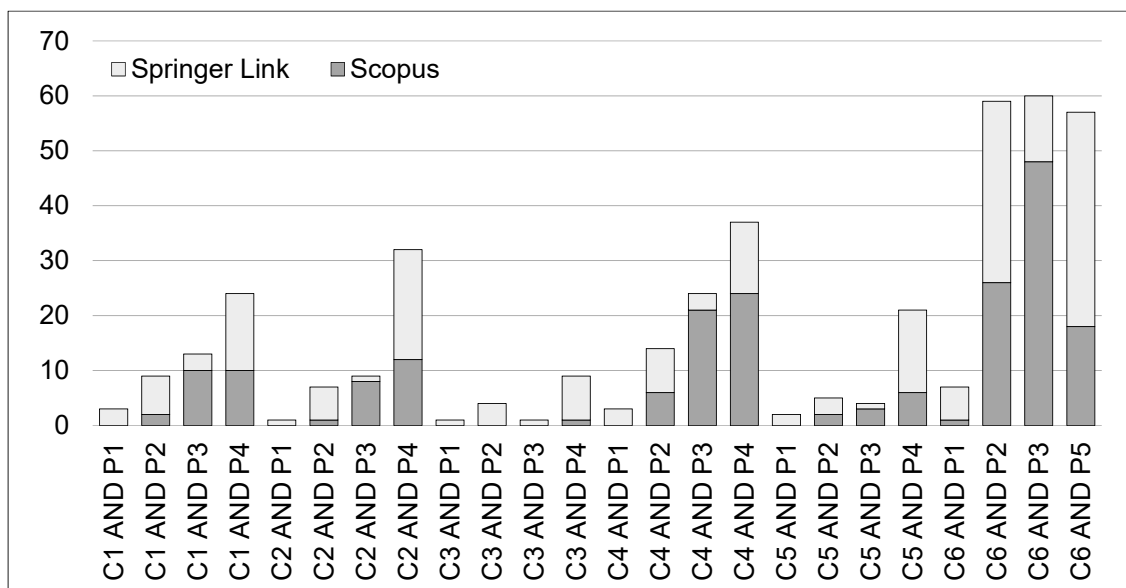


Abbildung A.1: Visualisierung der Suchtreffer der systematischen Literaturrecherche

Es ist zu erkennen, dass der Suchbegriff C5 („Condition based Monitoring“ OR „Condition-based Monitoring“) in allen Kombinationen mit den Suchbegriffen P deutlich weniger relevante Treffer als C4 („Condition Monitoring“) erzielt hat. Daraus lässt sich rückschließen, dass in der Literatur der Begriff „Condition Monitoring“ dominanter ist und im Allgemeinen zur Beschreibung von „Zustandsüberwachung“ verwendet werden sollte. Auffallend ist zudem, dass speziell die Suchbegriffe „C4 AND P4“ und „C6 AND P3“ in Scopus bzw. „C6 AND P2“ und „C6 AND P5“

¹⁶⁸Es sei hervorgehoben, dass die Suche (vgl. Tabelle A.1) mit der ID 24 von den Suchen 4, 8, 12, 16 und 20 abweicht, da der Suchterm *Condition Maintenance AND Scheduling* zu einer nicht bewältigbaren Anzahl an Treffern (dominiert von nicht relevanten Publikationen) geführt hätte. Insofern wurde der Term P4 („Scheduling“) weiter spezifiziert zu P5 („Production Scheduling“).

Tabelle A.1: Ergebnisse der Literaturrecherche (die Nomenklatur der Suchbegriffe ist in Tabelle 3.1 dargestellt)

ID	Suchbegriffe	Scopus			Springer Link		
		Treffer	1. Filter	1. Filter in %	Treffer	1. Filter	1. Filter in %
1	C1 AND P1	0	0	0,00%	68	3	1,45%
2	C1 AND P2	5	2	1,01%	91	7	3,38%
3	C1 AND P3	21	10	5,03%	53	3	1,45%
4	C1 AND P4	26	10	5,03%	278	14	6,76%
5	C2 AND P1	0	0	0,00%	18	1	0,48%
6	C2 AND P2	1	1	0,50%	90	6	2,90%
7	C2 AND P3	8	8	4,02%	16	1	0,48%
8	C2 AND P4	26	12	6,03%	304	20	9,66%
9	C3 AND P1	0	0	0,00%	6	1	0,48%
10	C3 AND P2	0	0	0,00%	31	4	1,93%
11	C3 AND P3	2	0	0,00%	12	1	0,48%
12	C3 AND P4	5	1	0,50%	110	8	3,86%
13	C4 AND P1	2	0	0,00%	29	3	1,45%
14	C4 AND P2	7	6	3,02%	113	8	3,86%
15	C4 AND P3	48	21	10,55%	36	3	1,45%
16	C4 AND P4	207	24	12,06%	805	13	6,28%
17	C5 AND P1	0	0	0,00%	2	2	0,97%
18	C5 AND P2	2	2	1,01%	5	3	1,45%
19	C5 AND P3	4	3	1,51%	1	1	0,48%
20	C5 AND P4	11	6	3,02%	50	15	7,25%
21	C6 AND P1	17	1	0,50%	290	6	2,90%
22	C6 AND P2	46	26	13,07%	1.228	33	15,94%
23	C6 AND P3	127	48	24,12%	405	12	5,80%
24	C6 AND P5	20	18	9,05%	709	39	18,84%
		585	199	100,00%	4.750	207	100,00%

in Springer Link sehr viele relevante Treffer erzielt haben, während die meisten Kombinationen von P1 („Production Planning and Control“ OR „PPC“) mit einem der Suchbegriffe aus C zu verhältnismäßig wenig relevanten Treffern geführt hat. Der Begriff PPC (deutsch: PPS, Produktionsplanung und -steuerung) wird in vielen Fällen für die gesamte Produktionsplanung (Grob- und Feinplanung) herangezogen. Eine mögliche Schlussfolgerung für die geringe Trefferzahl ist beispielsweise, dass Werkzeug- und Maschinenzustände im eher langfristigen Zeithorizont der Produktionsgrobplanung noch nicht mitberücksichtigt werden (können). In der kurzfristigeren Planung hingegen („Production Control“) ist deren Mitberücksichtigung aber möglich, wie die Trefferzahl der Suchen nach P3 („Production Control“) zeigt. Aber auch der Suchbegriff P2 („Production Planning“) liefert eine höhere Trefferzahl als P1.¹⁶⁹

In Abbildung A.2 sind die Top 15 Journale und Konferenzen (für das Thema „Integration von Condition Monitoring und Produktionsplanung“) angeführt. Dabei ist speziell das „International Journal of Advanced Manufacturing“ auffallend, das mit deutlichem Abstand das am häufigsten

¹⁶⁹In vielen Definition wird „Production Planning“ zwar eher als eine Art Grobplanung gesehen, grenzt den Zeithorizont der Planung aber nicht so deutlich ab, wie die deutsche Bezeichnung „Produktionsgrobplanung“. Insofern könnten die hohe Trefferzahl von P2 auch darauf zurückgeführt werden, dass der Term „Production Planning“ allgemein für Planungstätigkeiten in der Produktion verwendet wird und keine implizite zeitliche Abgrenzung beinhaltet.

vorkommende Journal darstellt (rund 15 % der identifizierten, relevanten Publikationen wurden in diesem Journal veröffentlicht). Im Folgenden werden die Kategorien, wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt, diskutiert und die Ergebnisse aus einer quantitativen Perspektive analysiert.

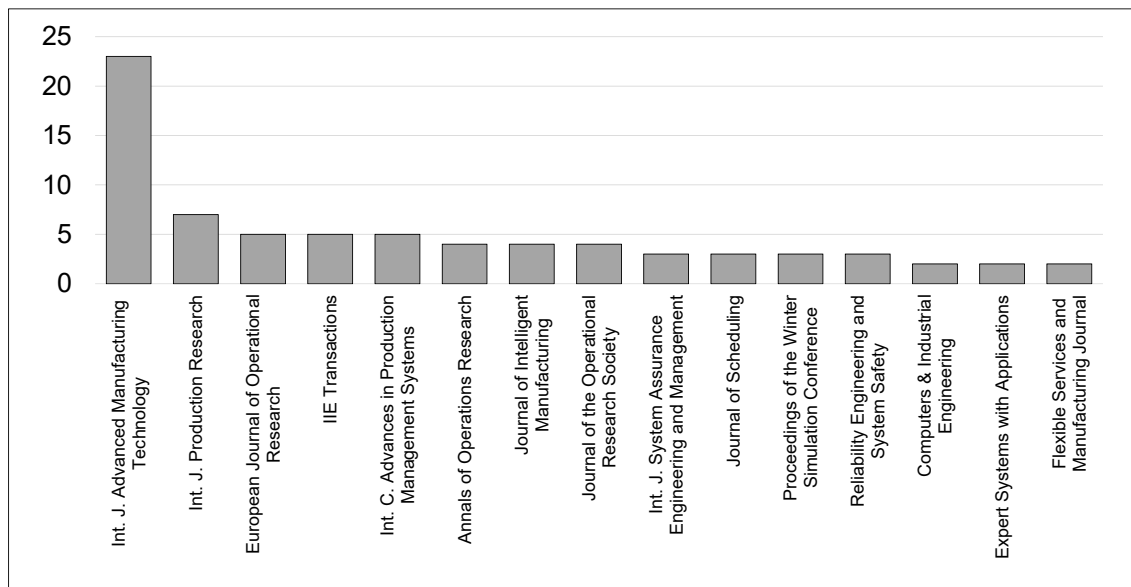


Abbildung A.2: Überblick der häufigsten Journale und Konferenzen

A.1.4 Morphologische Literaturkategorisierung

In Tabelle A.2 sind die Kategorisierungen aus Abschnitt A.1.5 dargestellt.¹⁷⁰ Die Nomenklatur für Tabelle A.2 ist im Folgenden dargestellt:

Branche	
CI	Chemieindustrie
FFS	Freiformschmiede
HI	Halbleiterindustrie
KI	Kunststoffindustrie
LAB	Laboranwendung
LI	Lebensmittelindustrie
MI	Metallverarbeitende Industrie
PI	Prozessindustrie
SI	Schmiedeindustrie
Sonst.	Sonstiges

Messung	
APC	Advanced Process Control
CCO	Stromaufnahme
ECO	Energieaufnahme
FLO	Durchfluss
FOR	Kraft
HUM	Luftfeuchtigkeit
PRO	Prozessmessungen
Sonst.	Sonstiges
TMO	Temperatur
TOR	Drehmoment
VCO	Spannungsaufnahme
VINB	Vibration

Optimierungsalgorithmus	
ABC	Artificial Bee Colony
ACO	Ant Colony Optimization
B&B	Branch and Bound
BRA	Bruss Algorithm
CGO	Constrained Global Optimization
COA	Eigenentwicklung (Customized or Own Algorithm)
CP	Constraint Programming
DSA	Disruption scheduling algorithm
EA	Evolutionary Algorithm
GA	Genetic Algorithm
HIC	Hill Climbing
HNSG-II	HEM-based NSGA-II
HSO	Harmony Search Optimization
ISPEA2	Improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm
NSGA-II	Non-dominated sorting Genetic Algorithm
PIM	Policy Improvement Method
PSO	Particle Swarm Optimization
RB	Rule Based
SMDP	Semi-Markov Decision Process
SNS	Swarm-based Neighborhood Search
SRBFO	SR-based Bacterial Foraging Optimization
SSA	Simultaneous Scheduling Algorithm
TS	Tabu Search

Datenauswertung	
ARIMA	AR-Integrated Moving Average
BIA	Bicoherence-Analyse
BN	Bayesian Networks
CLU	Clustering
CVA	Canonical Variate Analysis
DAT	Datenbasiert
DL	Deep-Learning
FB	Frequenzbereich
ML	Machine-Learning
NN	Neuronales Netzwerk
ZB	Zeitbereich
ML	Machine-Learning
NN	Neuronales Netzwerk
ZB	Zeitbereich

¹⁷⁰Ein Eintrag „X“ in Tabelle A.2 bedeutet eine explizite Zuordnung zu der jeweiligen Kategorie (die Kategorie ist direkt in der Publikation ersichtlich). Ein Eintrag „O“ in der Tabelle bedeutet eine implizite Zuordnung (die Kategorie ist nicht direkt in der Publikation ersichtlich, zur Kategorisierung ist somit die Interpretation des Autors nötig).

Tabelle A.2: Morphologische Literaturkategorisierung

ID	Quelle	(1)			(2)			(3)			(4)			(5)			(6)			(7)			(8)			(A)	(B)	(C)	(D)		
		Literaturüberblick	Konzipierung	Fallstudie	Ansatz	Modell	Methode	Instanzierung	spezifisch	allgemein	Condition Monitoring	Instandhaltung	Produktionsplanung	Integration a & c	Integration b & c	korrektiv	präventiv	prädiktiv	präskriptiv	Produktionsgroßplanung	Produktionsfeinplanung	Produktionssteuerung	kein	offline	online					keine	theoretisch
1	Amelian et al. (2018)	X			X				X			X			X			X	X				X								NSGA-II
2	Díaz Ramírez und Huertas (2018)		X		X			X			X			X			X	X							X	CI					MIP-Solver CPLEX
3	Kan et al. (2018)	X			X			X	X						X			X			X						ECO	DAT, CLU			
4	Kao et al. (2018)	X			X			X			X				X			X				X	X		HI	EHI	DAT			MIP-Solver	
5	Kian et al. (2018)		X		X			X			X				X			X			X			X	Sonst.	VIB	ZB			MIP-Solver CPLEX	
6	Kiangala und Wang (2018)		X				X	X			X				X			X			X			X	Sonst.	VIB	DAT, DL				
7	Moghaddass und Ertekin (2018)	X			X			X			X			X			X			X			X	X		Sonst.	Sonst.	DAT			
8	Rahmati et al. (2018)	X			X			X			X			X			X			X			X								EA
9	Rivera-Gómez et al. (2018a)	X			X			X			X			X			X			X			X								PIM
10	Rivera-Gómez et al. (2018b)	X			X			X			X			X			X			X			X								PIM
11	Rødseth et al. (2018)	X			X			X			X			X			X	X			X			X							
12	Rostami et al. (2018)		X			X	X				X			X			X	X			X	X			X						B&B, SA
13	Salmasnia et al. (2018)	X			X			X			X			X	X			X	X					X							PSO
15	Sobaszek et al. (2018)	X	X					X			X			X			X	X			X	X			X						RB
16	Abdelrahim und Vizvári (2017)	X			X			X			X			X			X			X			X								
17	Adeyeri und Mpofo (2017)		X			X	X		X					X			X			X			X		KI	TMP, VIB	ZB				
18	Beheshti Fakher et al. (2017)	X			X			X			X			X			X			X			X								GA, TS
19	Boudjelida (2017)	X	X					X			X			X	X			X			X			X							ACO, GA, TS, DSA
20	Desforges et al. (2017)	X			X			X			X			X	X			X			X	X				Sonst.	BN			COA	
21	Feng et al. (2017)		X			X	X		X					X			X			X			X			FOR, VIB, TMP	ZB, FB, ML				
22	Fu et al. (2017)	X			X			X			X			X	X			X			X			X							PSO, GA
24	Hajej et al. (2017b)	X			X			X			X			X	X			X			X			X							COA
25	Hajej et al. (2017a)	X			X			X			X			X	X			X			X			X							CGO
26	Herzog et al. (2017)	X			X			X	X					X			X	X			X	X		X							
27	Hu et al. (2017b)	X		O				X	X					X			X	X			X	X		X							COA
28	Hu et al. (2017a)	X			X			X	X					X			X	X			X	X		X							COA

Fortsetzung von Tabelle A.2

ID	Allgemein Quelle	(1)			(2)				(3)				(4)					(5)				(6)			(7)			(8)			(A)	(B)	(C)	(D)		
		a	b	c	a	b	c	d	a	b	c	d	e	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	a	b	c									
29	Jing et al. (2017)	X			X				X				X	X					X	X			X	X										GA		
30	Kumar und Lad (2017)	X	X						X				X	X				X		X			X											GA		
31	La Fata und Passannanti (2017)	X			X				X				X	X				X	X			X	X											SA		
32	Leturiondo et al. (2017)	X	X						X	X							X		X	X							X			VIB, TOR		ZB, FB				
33	Mazidi et al. (2017)	X	X					X		X						X			X	X			X	X												
34	Mourtzis et al. (2017)		X	X				X		X						X			X			X		X			X			CCO, VCO						
35	Prinzhorn et al. (2017)	X			X				X						X			X		X			X				SI									
36	Rahmati et al. (2017)	X			X				X				X	X				X	X			X	X											HSO		
35	Salmasnia und Mirabadi-Dastjerd (2017)	X			X				X				X	X				X	X			X	X											NSGA-II		
36	Shamsaei und van Vyve (2017)	X	X					X		X					X			X	X			X	X				CI							MIP-Solver Xpress		
37	You (2017)	X	X					X	X						X			X	X			X	X						VIB		ZB					
38	Zandieh et al. (2017)	X			X				X				X	X				X	X			X	X											(HN)NSGA-II		
39	Zulkafli und Kopanos (2017)		X	X				X					X	X				X	X			X	X			X	PI							MIP		
40	Aalaei und Davoudpour (2016)		X	X				X					X					X				X													COA	
41	Al-Najjar (2016)	X			X				X				X					X				X		X	X				VIB		ZB					
42	Beheshti-Fakher et al. (2016)	X			X				X				X	X				X	X			X	X												COA	
43	Caili et al. (2016)	X			X				X				X					X	X			X	X												COA	
44	Goyal et al. (2016)	X		O				X	X						X			X				X		X	X				VIB							
45	Helu und Weiss (2016)	X		O				X	X						X			X	X			X	X													
46	Jafari und Makis (2016)	X			X				X				X					X	X			X	X		X										SMDP	
47	Ouaret et al. (2016)	X			X				X	X					X			X	X			X	X												COA	
48	Peng und van Houtum (2016)	X			X				X				X					X	X			X	X													
49	Purohit und Kumar Lad (2016)	X			X				X				X					X				X	X												COA	
50	Ruiz-Cárcel et al. (2016b)	X			X				X	X					X			X				X		X	X		PI	PRO, FLO		CVA						
51	Vogl et al. (2016)	X		O				O	X						X			X	X			X	X		X											
52	Wang und Lu (2016)	X			X				X				X	X				X	X			X	X												COA	
53	Wang et al. (2016a)	X			X				X				X					X	X			X	X												NSGA-II	
54	Wolter und Helber (2016)	X			X				X				X					X	X			X	X												COA	
55	Amelian et al. (2015)	X			X				X				X	X				X	X			X	X												RB	
56	Aramon Bajestani und Beck (2015)	X			X				X				X	X				X	X			X	X												COA, PIM	
57	Doleschal und Klemmt (2015)	X			X				X				X	X				X				X		X	X		HI							MIP-Solver		
58	Gao et al. (2015)	X		O				X	X						X			X				X	X	X	X											
59	Hadidi et al. (2015)	X			X				X				X					X	X			X	X												COA	
60	Husejnagić und Sluga (2015)	X	X					X	X						X			X				X		X	X	MI	TMP, HUM		ZB							
61	Jamshidi und Seyyed Esfahani (2015)	X			X				X				X	X				X	X			X	X													
62	Khamseh et al. (2015)	X			X				X				X	X				X	X			X	X													GA, SA

Fortsetzung von Tabelle A.2

ID	Allgemein Quelle	(1)			(2)			(3)			(4)					(5)				(6)			(7)			(8)			(A)	(B)	(C)	(D)				
		a	b	c	a	b	c	d	a	b	a	b	c	d	e	a	b	c	d	a	b	c	a	b	c	a	b	c								
63	Khoudi et al. (2015)		X			X				X					X		X			X		X		X										COA		
64	Kouedeu et al. (2015)		X			X				X					X		X			X		X		X												
65	Moench und Yugma (2015)		X			X				X					X		X			X		X		X			HI							COA		
66	Niu et al. (2015)		X			X				X					X		X			X		X		X										SRBFO		
67	Perlman et al. (2015)		X			X				X					X		X			X		X		X										COA		
68	Xanthopoulos et al. (2015)		X			X				X					X		X			X		X		X										COA		
69	Yugma et al. (2015)	O			O					X					X				X		X				X	X		HI		APC						
70	Asadzadeh und Azadeh (2014)		X			X				X	X				X				X		X		X		X											
71	Bajestani et al. (2014)		X			X				X					X				X		X		X		X										CP-Solver	
72	Claassen und Hendrix (2014)	X			O					X					X				X		X		X		X											
73	Gao et al. (2014)		X			X				X	X				X				X		X		X		X										ISPEA2	
74	Géhan et al. (2014)		X			X				X					X				X		X		X		X											
75	Haddad (2014)		X			X				X					X				X		X		X		X										SA, HIC, GA	
76	Liao et al. (2014)		X			X				X	X				X				X		X		X		X		MI		PRO		ML					
77	Macchi et al. (2014)	X			O					X					X	X			X	X		X		X												
78	Mirabedini und Iranmanesh (2014)		X			X				X					X				X		X		X		X										GA, PSO	
79	Mourtzis et al. (2014)		X			X				X	X				X				X		X		X		X			CCO		ARIMA						
80	Oborski (2014)	X			O					X	X				X				X		X		X		X											
81	Rustogi und Strusevich (2014)		X			X				X					X				X		X		X		X										COA	
82	Srinivasan und Parlidak (2014)		X			X				X	X				X				X		X		X		X											
83	Tambe und Kulkarni (2014)		X			X				X					X				X		X		X		X			KI							SA	
84	Yildirim und Nezami (2014)		X			X				X					X				X		X		X		X										MIP-Solver LINGO	
85	Dehghanian und Kezunovic (2013)		X	X						X					X				X		X		X		X		Sonst.		CCO		ZB					
86	Gössinger und Kaluzny (2013)		X			X				X	X				X				X		X		X		X											
87	Jin und Ni (2013)		X			X				X					X				X		X		X		X		CI									
88	Kazaz und Sloan (2013)		X			X				X					X				X		X		X		X			HI								
89	Kröning und Denkena (2013)		X			X				X	X				X				X		X		X		X		MI								RB	
90	Le und Tan (2013)		X			X				X	X				X				X		X		X		X										RB	
91	Lee und Ni (2013)		X			X				X					X				X		X		X		X		HI									
92	Lei (2013)		X			X				X					X				X		X		X		X										ABC	
93	Powell und Rødseth (2013)	X			O					X					X				O		X	X		X												
94	Rivera-Gómez et al. (2013)		X			X				X					X	X			X		X		X		X										Kushner	
95	Tambe et al. (2013)			X						X					X				X		X		X		X		KI								GA, SA	
96	Tjahjono et al. (2013)		X	X						X	X				X				X		X		X		X										SSA, GA	
97	Zheng et al. (2013)		X			X				X					X				X		X		X		X											
98	Atluru et al. (2012)		X			X				X	X				X				X		X		X		X											

Fortsetzung von Tabelle A.2

ID	Allgemein Quelle	(1)			(2)			(3)			(4)				(5)				(6)			(7)			(8)			(A)	(B)	(C)	(D)			
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	d	e	a	b	c	d	a	b	c	a	b	c	a	b					c		
135	Wang und Zhang (2008)		X			X			X			X					X				X		X				X	LI						
136	Yulan et al. (2008)		X			X			X				X	X				X	X						X							GA		
137	Hirvikorpi et al. (2007)		X			X			X				X	X				X	X						X	MI						GA		
138	Iung et al. (2007)		X			X			X				X	X				X		X					X	LAB						BRA		
139	Kenné et al. (2007)		X			X			X				X	X				X		X					X							COA		
140	Liao (2007)		X			X			X				X	X				X		X					X									
141	Xiang und Cassady (2007)		X			X			X	X					X					X	X					X							COA	
142	Amari et al. (2006)		X			X			X	X					X					X	O					X								
143	Chen (2006)		X			X			X	X					X					X	X					X								
144	Do et al. (2006)	X				O			X					X		X				X	O				X									
145	Maillart (2006)		X			X			X	X					X					X	X					X							COA	
146	Koomsap et al. (2005)		X			X			X	X					X					X		X				X	FFS	PRO	ZB				COA	
147	Sloan (2004)		X			X			X		X				X					X	X					X							COA	
148	Wessels (2003)	X				O			X	X					X					X	X				X									
149	Contreras (2002)			X			X	X		X						X					X				X			VIB	DAT					
150	Iravani und Duenyas (2002)		X			X			X					X	X						X	X				X							COA	
151	Rosqvist (2002)		X			X			X	X					X					X	X					X								
152	Sloan und Shanthikumar (2002)		X			X			X					X		X					X				X	HI							RB	
153	Boukas und Liu (2001)		X			X			X					X	X						X	X			X								Kushner	
154	Joo et al. (2001)		X			X		X	X									O			X				X		FOR	NN						
155	Liu et al. (2001)		X			X			X						X					X	X					X	MI						COA	
156	Sloan und Shanthikumar (2000)		X			X			X					X	X						X	X					X	HI						COA

A.1.5 Morphologische Analyse der Rechercheergebnisse

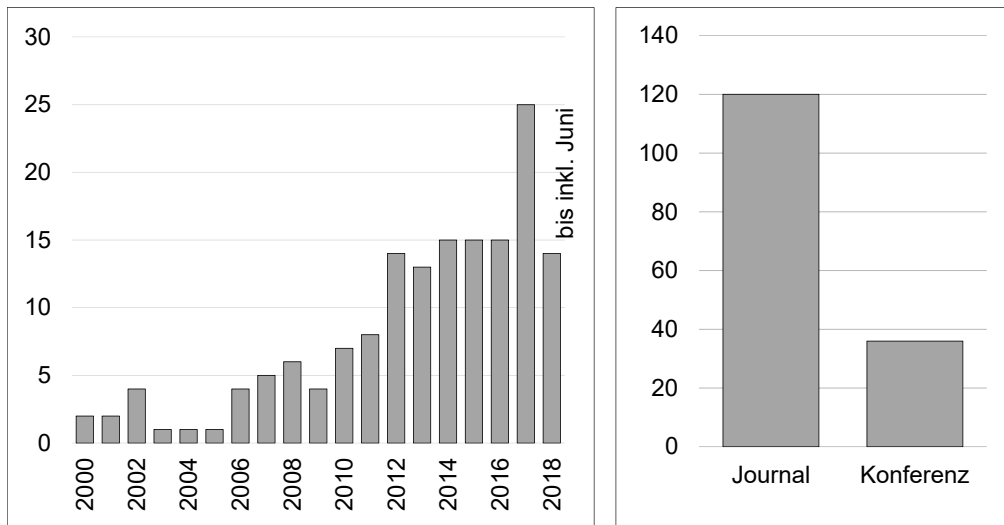


Abbildung A.3: Überblick der Publikationen der systematischen Literaturrecherche: links Publikationen pro Jahr, rechts Publikationstyp

Betrachtet man die relevanten Publikationen im zeitlichen Verlauf (vgl. Abbildung A.3), so ist zu erkennen, dass die Anzahl an relevanten Veröffentlichungen in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Während Anfang der 2000er Jahre noch verhältnismäßig wenige Publikationen veröffentlicht wurden, ist die Zahl der Veröffentlichungen seit Beginn der 2010er Jahre steigend. Ein deutlicher Sprung ist des Weiteren mit dem Jahr 2017 zu erkennen, wo besonders viele relevante Publikationen veröffentlicht wurden.¹⁷¹ Betrachtet man die Verteilung zwischen den beiden Typen Journal und Konferenz, so ist die Dominanz von Journalbeiträgen im Literaturdatenset zu erkennen. Bei einer detaillierteren Betrachtung (vgl. Tabelle A.2) fällt auf, dass der relative Anteil an Konferenzen in den früheren Jahren deutlich höher als in den letzten Jahren ist, was die zunehmende Reife des Forschungsthemas unterstreicht.¹⁷²

Im Folgendem werden die festgelegten Features (vgl. Abschnitt 3.1) im Detail analysiert.

(1) Art der Publikation: Auffallend ist die Dominanz von Modellen (in vorwiegend konzeptioneller Form) in der analysierten Literatur. Während über 80 % der Publikationen als Konzipierung (u.a. Kao et al., 2018; Ruiz-Cárcel et al., 2016a; Kazaz und Sloan, 2008) kategorisiert wurden, weisen die beiden anderen Kategorien jeweils nur einen Anteil von etwa 10 % auf. Nur in wenigen Publikationen steht die Anwendung (Fallstudien) von Modellen und Methoden im Vordergrund (vgl. u.a. Adeyeri und Mpofu, 2017; Zulkafi und Kopanos, 2017). Relevante Literaturanalysen sind ebenfalls unterrepräsentiert (vgl. Macchi et al., 2014; Gordon et al., 2012). Die Verteilung in der Kategorie „Art der Publikation“ ist in Abbildung A.4 dargestellt.

¹⁷¹Bezüglich des Kalenderjahres 2018 sei an dieser Stelle angemerkt, dass nur Publikationen berücksichtigt sind, die bis inklusive Juni 2018 (Zeitpunkt der Literaturrecherche) veröffentlicht wurden.

¹⁷²Im Zeitraum 2000 bis 2006 liegt der Anteil von Konferenzen bei rund 43 %, im Zeitraum 2012 bis 2018 bei nur mehr rund 20 %. Die Top Journale und Konferenzen sind in Abbildung A.2 dargestellt.

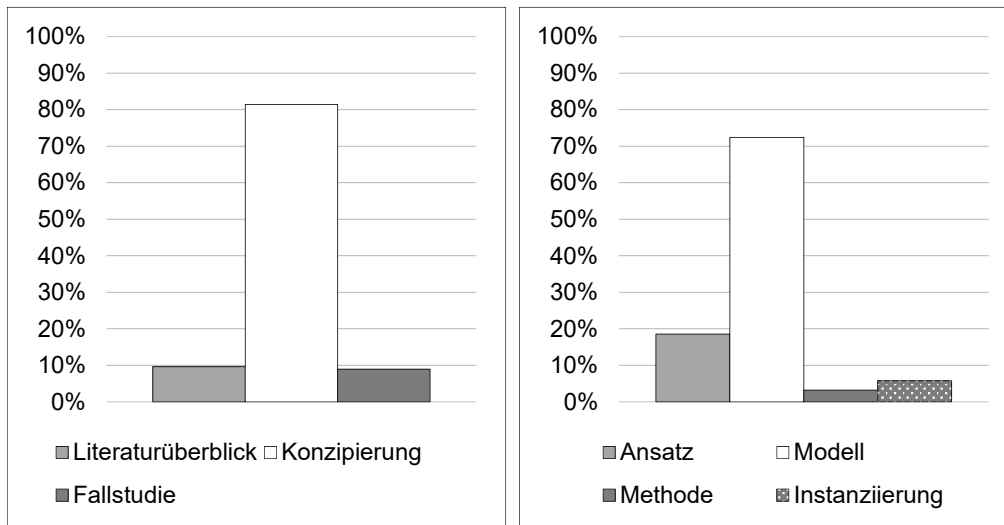


Abbildung A.4: links: Art der Publikation, rechts: Art der Lösung

(2) Art der Lösung: Betrachtet man die Art der Lösung, so ist die Dominanz der „Modelle“ auffallend. Mehr als 70 % der analysierten Publikationen lassen sich dieser Klasse zuordnen (vgl. u.a. Kao et al., 2018; Beheshti-Fakher et al., 2016). Ansätze weisen einen vergleichsweise geringen Anteil von 20 % auf, wobei dies jene Publikationen sind, die stark konzeptioneller Natur sind und vorwiegend als Basis für weitere Publikationen betrachtet werden können (vgl. u.a. Boudjelida, 2017; Husejnagić und Sluga, 2015). In Summe lediglich 10 % der Publikationen sind den Klassen „Methode“ und „Instanziierung“ (vgl. u.a. Moghaddass und Ertekin, 2018; Desforges et al., 2017) zuzuordnen. Diese Ergebnisse unterstreichen die Erkenntnisse bezogen auf (1). Die Verteilung in der Kategorie „Art der Lösung“ ist in Abbildung A.4 dargestellt.

(3) Anwendungsbereich: Der niedrige Anteil an Publikationen mit einem spezifischen Anwendungsbereich (nur knapp über 20 %) lässt sich auf die geringen Anteile an Fallstudien (vgl. (1) Art der Publikation) und Instanziierungen (vgl. (2) Art der Lösungen) zurückführen. In vielen Fällen werden Modelle in einem relativ generischen Rahmen entwickelt und in theoretischer Umgebung getestet (vgl. (8) Evaluierung). Im Speziellen betrifft das Publikationen aus dem Forschungsbereich „Operations Research“ – dabei werden die Modelle und Optimierungsalgorithmen validiert, jedoch erfolgt keine Aussage über die praktische Anwendbarkeit der Lösungen. Betrachtet man jene Publikationen, die als „spezifisch“ klassifiziert wurden, so sind im Speziellen die Branchen „Halbleiterindustrie“ (vgl. Kao et al., 2018; Doleschal und Klemmt, 2015; Moench und Yugma, 2015) und „Metallverarbeitende Industrie“ (vgl. Husejnagić und Sluga, 2015; Liao, 2007; Hirvikorpi et al., 2007) auffallend.

(4) Fokus: Trotz des Fokus auf das Thema „Integration von Werkzeug- und Maschinenzustandserfassung und Produktionsplanung“ in der Auswahl der Suchterme (vgl. Abschnitt 3.2.1), wurden vorwiegend Publikationen identifiziert (rund ein Drittel), die einen Fokus auf die Integration von

Instandhaltung (anstatt Condition Monitoring) und der kurz- bis mittelfristigen Produktionsfeinplanung legen (vgl. u.a. Amelian et al., 2018; Beheshti Fakher et al., 2017; Peng und van Houtum, 2016). Hinzu kommen Publikationen, deren Fokus nur auf Produktionsplanung liegt (die Instandhaltung bzw. CM wird nur am Rande oder in den Nebenbedingungen berücksichtigt, vgl. z.B. Kingala und Wang, 2018; Herzog et al., 2017; Liao et al., 2012). Auch Publikationen mit dem Fokus Instandhaltung sind im Datenset enthalten, die die Auswahl der geeigneten Instandhaltungsstrategie (vgl. Le und Tan, 2013; Maillart, 2006) bzw. der Planung von Instandhaltungstätigkeiten (vgl. Leturiondo et al., 2017; Srinivasan und Parlikad, 2014; Dehghanian und Kezunovic, 2013) erforschen; Produktionsplanung wird in diesen Arbeit jedoch nur am Rande betrachtet. Etwa 10 % der analysierten Literatur ist der Kategorie „Condition Monitoring“ zugehörig – diese Publikationen behandeln die Zustandsüberwachung von Werkzeugen und Maschinen. Die Themen Instandhaltung und PPS werden dabei lediglich angeschnitten oder im Ausblick thematisiert (vgl. Kan et al., 2018; Feng et al., 2017; Goyal et al., 2016). Überraschend ist, dass trotz der darauf ausgerichteten Suchbegriffe nur rund 4 % der analysierten Literatur tatsächlich einen Fokus auf die Integration von Condition Monitoring in die PPS legt (vgl. Kao et al., 2018; Doleschal und Klemmt, 2015; Gordon et al., 2012; Jacobs et al., 2009). Die Verteilung der Kategorie „Fokus“ ist in Abbildung A.5 dargestellt.

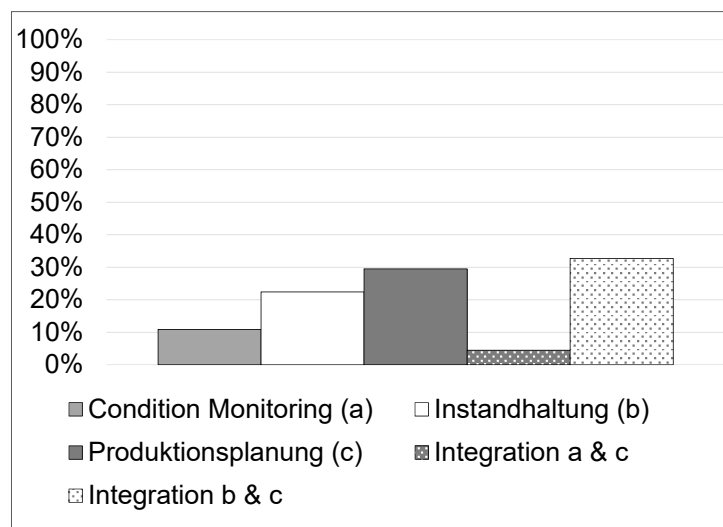


Abbildung A.5: Fokus

(5) Instandhaltungsstrategie: In der analysierten Literatur dominiert eine präventive Instandhaltungsstrategie mit einem Anteil von über 60 %, während eine rein korrektive Strategie nur noch in den seltensten Fällen angewendet wird.¹⁷³ Aber auch prädictive Instandhaltungsstrategien finden in rund 30 % der analysierten Publikationen Anwendung. Präskriptive Instandhaltung

¹⁷³Dabei sei hervorgehoben, dass Publikationen, die als „präventiv“ kategorisiert wurden, durchaus auch korrektive Instandhaltungsstrategien verwenden, aber als höchstentwickelte Form eine präventive Instandhaltungsstrategie aufweisen. Aufgrund der Exklusivität der Dimensionen wurde in diesen Fällen die höhere Entwicklungsstufe zur Klassifizierung herangezogen.

ist mit nur 2 Publikationen (vgl. Powell und Rødseth, 2013; Voisin et al., 2010)¹⁷⁴ stark unterrepräsentiert, was mit der Neuheit des Begriffes begründet werden kann. Der Publikationszeitpunkt hat keinen Einfluss auf die Art der Instandhaltungsstrategie – die Klassen sind über die analysierten Jahre hinweg gleichmäßig verteilt. In jenen Arbeiten, die eine korrektive oder präventive Instandhaltungsstrategie verfolgen, haben Zustandsüberwachungssysteme nur eine nachrangige Bedeutung, da die Instandhaltungstätigkeiten aufgrund von zeitlichen Planungen oder Maschinenausfällen ausgelöst werden. Bei der prädiktiven Instandhaltung hingegen sind Condition Monitoring Systeme (CMS) ausschlaggebend für gute Prognoseergebnisse, wobei online CMS bevorzugt werden.¹⁷⁵ Die Verteilung innerhalb der Kategorie „Instandhaltungsstrategie“ ist in Abbildung A.6 dargestellt.

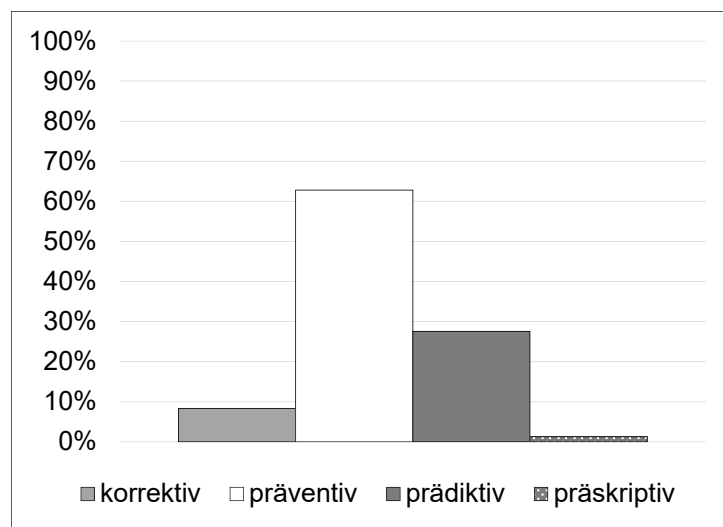


Abbildung A.6: Instandhaltungsstrategie

(6) Planungsbereich: Der Planungsbereich ist in der analysierten Literatur relativ gleichmäßig verteilt, wengleich die Produktionsgrobplanung mit rund 20 % leicht unterrepräsentiert ist. Dies ist insofern nicht verwunderlich, da Zustandsinformationen im längerfristigen Zeitbereich in vielen Fällen keine Hilfestellung leisten (Zustände sind eher im kurz- und mittelfristigen Zeithorizont relevant). Arbeiten dieser Klasse beschreiben in den meisten Fällen auch nicht die eingesetzten CMS und werden von einer präventiven Instandhaltungsstrategie dominiert. Inhaltlicher Fokus liegt auf den Klassen Produktionsplanung und Integration Produktionsplanung und Instandhaltung. Die Klasse Produktionsfeinplanung weist mit knapp über 40 % den höchsten Anteil der Kategorie auf. In diesem kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont, indem, beispielsweise, eine Produktionsreihenfolgeoptimierung durchgeführt wird, sind Werkzeug- und Maschinenzustände oft

¹⁷⁴Beide Publikationen verwenden nicht direkt den Begriff „präskriptiv“, thematisieren aber implizit eine präskriptive Instandhaltungsstrategie.

¹⁷⁵Im Teildatensatz gefiltert nach „prädiktiver“ Instandhaltung in der Kategorie „Instandhaltungsstrategie“ verwenden 31 % keine CMS (bzw. erwähnen nicht explizit welche Zustandsüberwachungssysteme eingesetzt werden vgl. z.B. Rødseth et al., 2018; Leturiondo et al., 2017), 25 % offline CMS (vgl. z.B. Kan et al., 2018; You, 2017) und rund 44 % setzen auf online Condition Monitoring (vgl. z.B. Kao et al., 2018; Moghaddass und Ertekin, 2018).

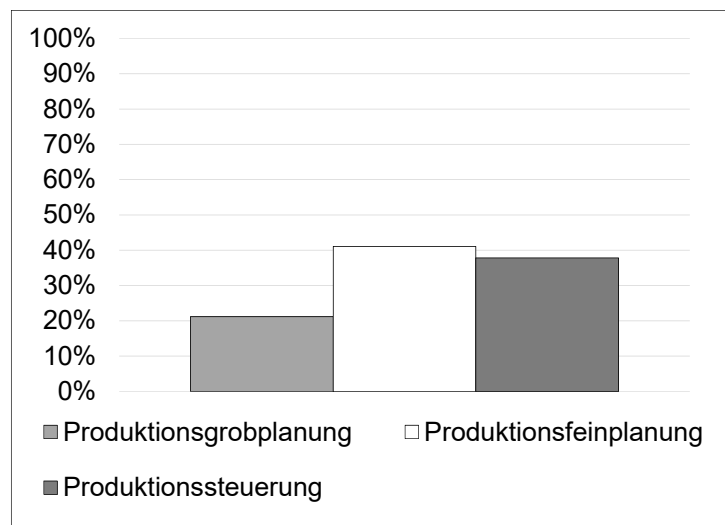


Abbildung A.7: Planungsbereich

entscheidende Faktoren, wie in der Literatur speziell zur Planung in der Halbleiterindustrie hervorgehoben wird (vgl. z.B. Kao et al., 2018; Yugma et al., 2015). Die kurzfristigere Produktionssteuerung weist einen Anteil von knapp unter 40 % auf und ist gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an Publikationen mit Fokus Condition Monitoring bzw. Instandhaltung.¹⁷⁶ Die Verteilung innerhalb der Kategorie „Planungsbereich“ ist in Abbildung A.7 dargestellt.

(7) Condition Monitoring: Trotz der Berücksichtigung des Begriffes „Condition Monitoring“ und seiner Synonyme innerhalb der Suchbegriffe (vgl. Abschnitt 3.2.1), wurden 70 % der analysierten Publikation der Klasse „kein Condition Monitoring“ zugeordnet. Dabei thematisieren die entsprechenden Arbeiten zwar CM, behandeln die Zustandsinformationen aber nur am Rande in der Modellbildung (vgl. u.a. Rahmati et al., 2018; Rivera-Gómez et al., 2018a,b). Dabei werden die Zustandsinformationen als gegeben betrachtet oder mit einem mathematischen (z.B. stochastischen) Modell abgebildet. Die beiden Klassen „offline“ und „online“ sind mit je 15 % gleich stark repräsentiert. Beim „online“ CM ist speziell die Halbleiterfertigung auffallend, die auf diese Form der CMS setzt (z.B. Kan et al., 2018; Yugma et al., 2015), aber auch die Metallverarbeitung ist vertreten (vgl. Husejnagić und Sluga, 2015). Die Verteilung innerhalb der Kategorie „Condition Monitoring“ ist in Abbildung A.8 dargestellt.

(8) Evaluierung: Die Evaluierung der Ansätze, Modelle und Methoden erfolgt in den meisten Fällen (60 %) in theoretischer Form. Dabei werden numerische Beispiele oder Simulationsmodelle eingesetzt (u.a. Rahmati et al., 2018; Moghaddass und Ertekin, 2018; Kumar und Lad, 2017). Eine „praktische“ Evaluierung ist gekennzeichnet durch den Einsatz von Echtdateien (z.B. aus der

¹⁷⁶Im Teildatensatz gefiltert nach „Produktionssteuerung“ in der Kategorie „Planungsbereich“ haben 22 % den Fokus Condition Monitoring (vgl. z.B. Adayeri und Mpofo, 2017; Feng et al., 2017), 56 % den Fokus Instandhaltung (vgl. z.B. Kiangala und Wang, 2018; Hu et al., 2017b), während sich der Rest recht gleichmäßig auf die anderen drei Klassen aufteilt.

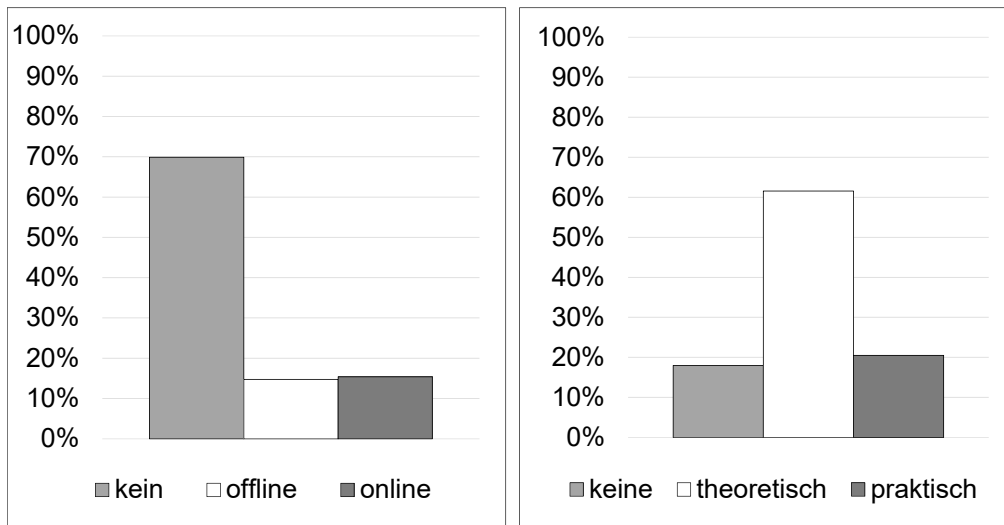


Abbildung A.8: links: Condition Monitoring (Art der Zustandsüberwachung), rechts: Evaluierung

Industrie, z.B. Kao et al., 2018), einem praktischen Experiment (z.B. Feng et al., 2017) oder durch die Instanziierung in einer realen industriellen Umgebung (z.B. Kiangala und Wang, 2018; Tambe und Kulkarni, 2014). Die Verteilung innerhalb der Kategorie „Evaluierung“ ist in Abbildung A.8 dargestellt.

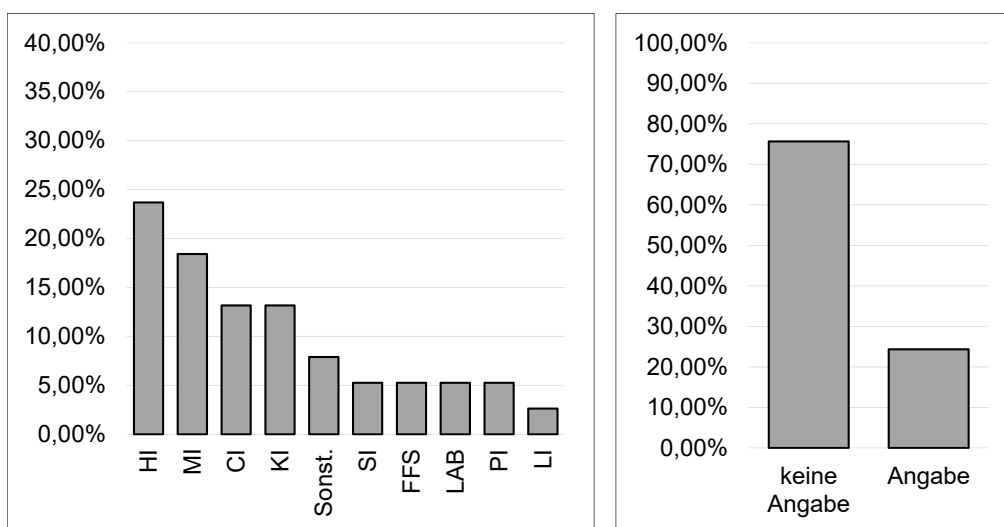


Abbildung A.9: links: Branche (Nomenklatur ist in Anhang A.1.4 dargestellt.), rechts: Anteil der Publikationen mit angegebener Branche

(A) Branche: Betrachtet man die kontinuierliche Klasse „Branche“ (vgl. Abbildung A.9), so fallen speziell die Halbleiterindustrie (u.a. Kao et al., 2018; Doleschal und Klemmt, 2015; Moench und Yugma, 2015) und die metallverarbeitende Industrie (u.a. Husejnagić und Sluga, 2015; Jeniak und Rudek, 2010; Hirvikorpi et al., 2007) auf, die die höchsten Anteile aufweisen. Vergleichsweise hohe Anteile weisen zudem die Chemieindustrie (z.B. Díaz Ramírez und Huertas, 2018) und

die Kunststoffindustrie (z.B. Adeyeri und Mpofo, 2017) auf, während andere Branchen deutlich unterrepräsentiert sind. Dabei sei hervorgehoben, dass speziell die Arbeiten aus der Halbleiterindustrie einen hohen Anteil an Publikationen mit dem Fokus „Integration Condition Monitoring und Produktionsplanung“ aufweisen.¹⁷⁷ Dies kann dadurch begründet werden, dass in der Halbleiterindustrie die Produktionsreihenfolgen zum Teil vom jeweiligen Maschinenzustand abhängig sind, wie die Autoren Kao et al. (2018, S. 450 f.) hervorheben. Zudem ist anzumerken, dass in vielen Publikationen die Branche nicht explizit erwähnt wird – dabei handelt es sich zum Großteil um Publikationen, die eine theoretische Evaluierung aufweisen.

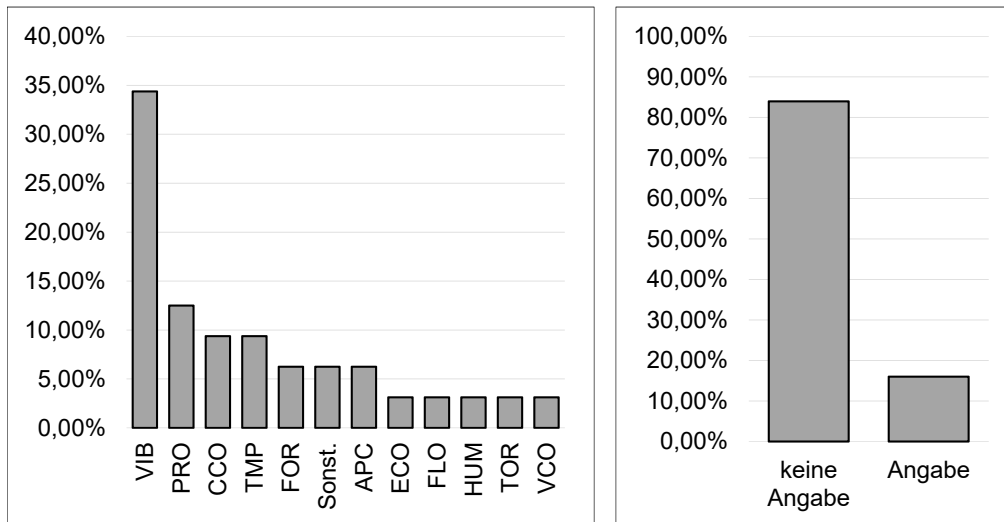


Abbildung A.10: links: Condition Monitoring, Messung (Nomenklatur ist in Anhang A.1.4 dargestellt.), rechts: Anteil der Publikationen mit angegebenen Sensoren bzw. Messsystemen

(B) Messung: Bei Betrachtung der im Rahmen des Condition Monitorings durchgeführten Messungen (vgl. Abbildung A.10),¹⁷⁸ dominiert mit einem Anteil von rund 34 % die Kategorie „Vibration“ (VIB). Mit dieser Kategorie wurden jene Publikationen klassifiziert, die physische Vibrationen (z.B. messbar mit einem Beschleunigungssensor, z.B. Kiangala und Wang, 2018; Adeyeri und Mpofo, 2017) zur Datenerfassung für ein Condition Monitoring nutzen.¹⁷⁹ Neben dieser Form der Messung werden die Verwendung von interner Prozesssensorik (PRO, z.B. Liao et al., 2014), Stromaufnahme (CCO, z.B. Mourtzis et al., 2014) und Temperaturmessung (TMP, z.B. Husejnagić und Sluga, 2015),¹⁸⁰ sowie zahlreiche andere Messmethoden erwähnt. Betrachtet man das Gesamtdatenset, so erfolgt eine Spezifizierung des Messprinzips nur in den seltensten Fällen – in mehr als 80 % der Publikationen wird das Messprinzip nicht erwähnt. Dies sind vorwiegend jene Veröffentlichungen, die den Zustand in einem rein mathematischen Modell berücksichtigen (vgl.

¹⁷⁷ Im Teildatensatz gefiltert nach „Halbleiterindustrie“ in der Branche sind rund 44 % der Publikationen der Kategorie „Integration Condition Monitoring und Produktionsplanung“ zugeordnet.

¹⁷⁸ Dabei sei hervorgehoben, dass in Publikationen zum Teil mehrere Messmethoden parallel angewendet werden.

¹⁷⁹ Darüber hinaus würden der Kategorie auch jene Publikationen zugeordnet werden, die akustische Schwingungen (z.B. messbar mit einem Mikrofon) zur Datenerfassung anwenden (vgl. z.B. Thaler et al., 2014). In den analysierten Arbeiten (vgl. Tabelle A.2) wurden aber keine derartigen Arbeiten identifiziert.

¹⁸⁰ Temperaturmessung erfolgt dabei im Allgemeinen nicht als alleinige Messmethode, sondern parallel zu anderen.

Jeniak und Rudek, 2010, S. 1042), ohne konkrete Messungen einfließen zu lassen oder Ausfälle unabhängig vom Zustand (z.B. zeitabhängig oder zufällig, z.B. Khoudi et al., 2015; Rivera-Gómez et al., 2013) zu betrachten.

(C) Datenauswertung: Die Datenauswertung (vgl. Abbildung A.11), der durch die in Kategorie (B) dargestellten Messsignale, wird in den meisten analysierten Publikationen im Zeit- (u.a. Hu-sejnagić und Sluga, 2015; Dehghanian und Kezunovic, 2013) bzw. im Zeit- und Frequenzbereich (vgl. Feng et al., 2017; Leturiondo et al., 2017) durchgeführt. Auch „datenbasierte“ Auswertungen weisen einen deutlichen Anteil auf, wogegen, beispielsweise, maschinelles Lernen unterrepräsentiert ist (z.B. Liao et al., 2014). Die Datenauswertung ist bei allen Publikationen konkretisiert, die eine spezifizierete Messung aufweisen – in die andere Richtung ist dies nicht der Fall, da Veröffentlichungen identifiziert wurden, wo zwar die Messungen spezifiziert werden, aber keine Aussage über die Datenauswertung möglich war (z.B. Mourtzis et al., 2014; Lee und Ni, 2013). Analog zu Kategorie (B) ist zudem der geringe Anteil an Publikationen auffallend, die die Datenauswertung spezifizieren, da die Zustandsinformation häufig lediglich modellbasiert berücksichtigt wird.

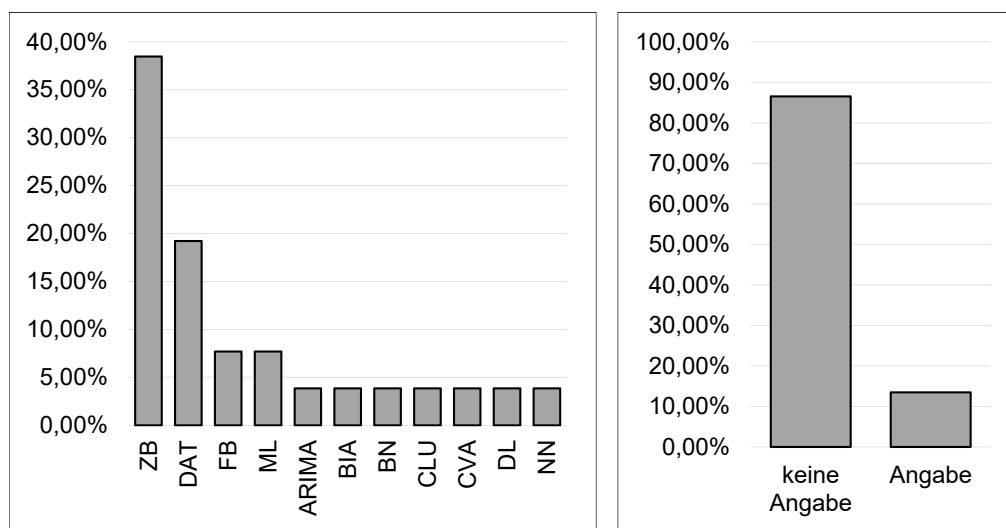


Abbildung A.11: links: Condition Monitoring, Datenauswertung (Nomenklatur ist in Anhang A.1.4 dargestellt.), rechts: Anteil der Publikationen mit angegebener Datenauswertungsmethode

(D) Optimierungsalgorithmus Bei den Optimierungsalgorithmen, dargestellt in Abbildung A.12), ist der verwendete Algorithmus in etwas mehr als der Hälfte der identifizierten Publikationen spezifiziert. In den meisten Fällen, mit 20 %, ist dies eine Eigenentwicklung (COA, „Customized or Own Algorithm“, u.a. Desforges et al., 2017). Danach folgt der genetische Algorithmus (GA, u.a. Jing et al., 2017) mit einem Anteil von 10 %, wobei die COA oft in ihren Grundkonzepten auf genetischen Algorithmen basieren. Der genetische Algorithmus wird in vielen Fällen mit anderen Algorithmen verglichen. Während die Autoren Beheshti Fakher et al. (2017), zum Beispiel, einen genetischen Algorithmus und eine Tabu-Suche gegenüberstellen, vergleichen Khamseh et al.

(2015) Simulierte Abkühlung (engl. Simulated Annealing, SA) mit einem genetischen Algorithmus. Die Simulierte Abkühlung stellt einen einfachen Algorithmus dar, der speziell bei umfangreichen Fitnesslandschaften gute Ergebnisse erzielt (vgl. La Fata und Passannanti, 2017; Tambe und Kulkarni, 2014). Generell ist auch in der systematischen Literaturanalyse die Dominanz der Metaheuristiken zu erkennen.¹⁸¹

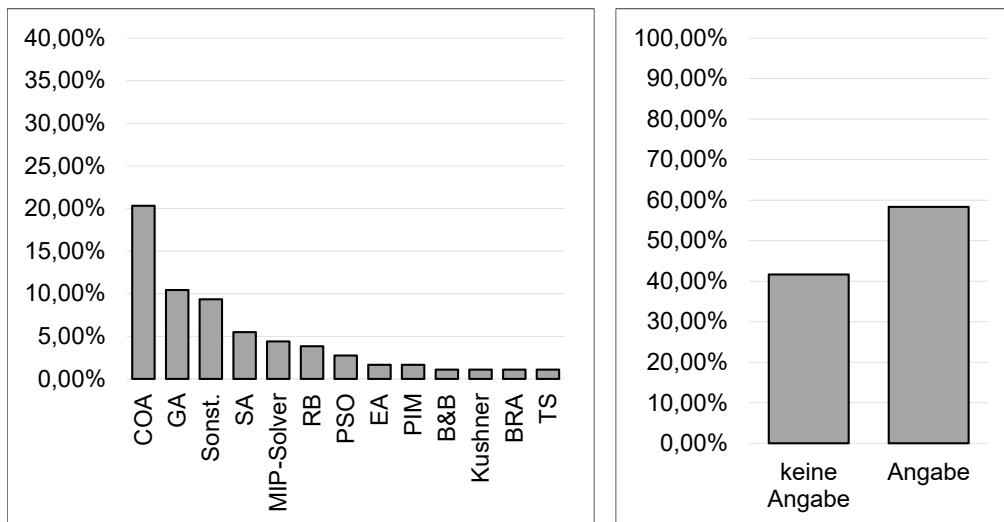


Abbildung A.12: links: Optimierungsalgorithmus (Nomenklatur ist in Anhang A.1.4 dargestellt.), rechts: Anteil der Publikationen mit angegebenem Optimierungsalgorithmus

Neben den problemspezifischen Algorithmen (COA), Genetische Algorithmen (GA) und Simulated Annealing (SA) sei noch die Kategorie „Sonst.“ hervorgehoben, die aus einer Reihe an Algorithmen besteht, die in der analysierten Literatur nur einmalig auftritt. Das sind, zum Beispiel, Artificial Bee Colony (ABC; Lei, 2013), Ant Colony Optimization (ACO; Boudjelida, 2017), Hill Climbing (HIC; Haddad, 2014), Harmony Search Optimization (HSO; Rahmati et al., 2017), Swarm-based Neighborhood Search (SNS; Lei, 2011a) und viele andere (vgl. Abschnitt A.1.4 für eine vollständige Darstellung).

¹⁸¹Im Abschnitt 2.2 wurde diese Dominanz bereits basierend auf der Arbeit von Abedinnia et al. (2017) dargestellt.

A.2 Detailausführungen zum Phasenmodell

A.2.1 Flussdiagramm Legende

In Abbildung A.13 ist die Legende für die Flussdiagramme in Abbildungen 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 und 5.8 dargestellt

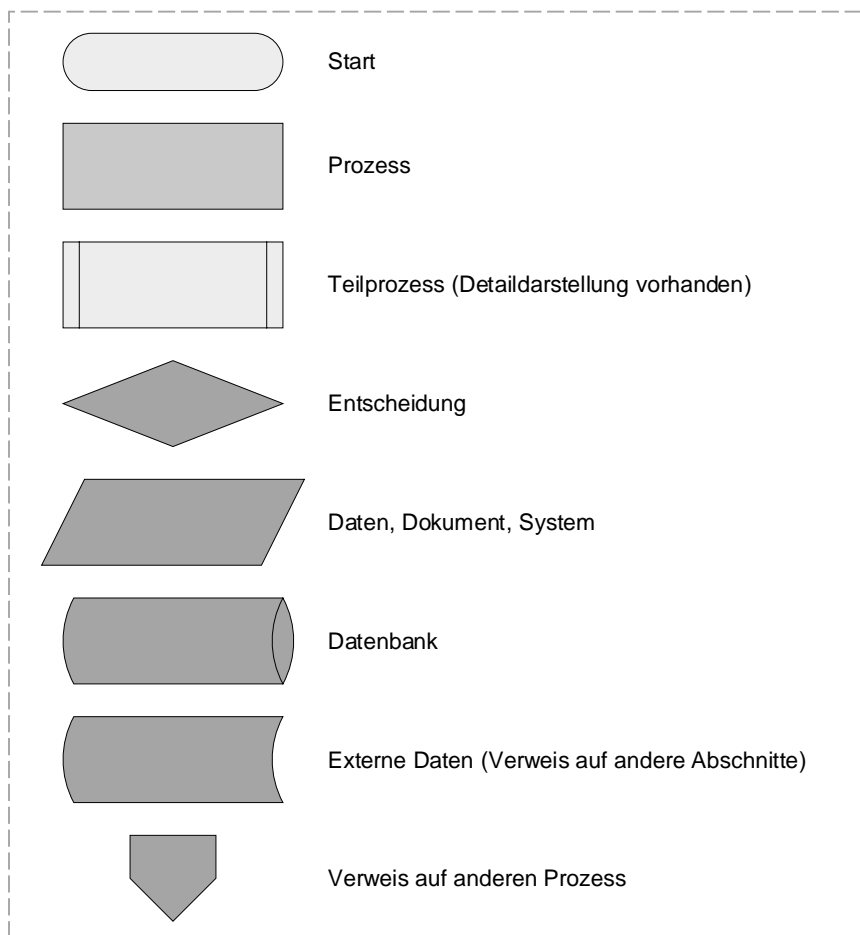


Abbildung A.13: Legende Flussdiagramm

A.2.2 Metaheuristiken Pseudocodes

In diesem Abschnitt werden die in Abschnitt 5.5.1 vorgestellten Metaheuristiken in Form von Pseudocodes dargestellt, um einen Einblick aus Implementierungssicht zu bieten. Der Syntax ist dabei angelehnt an Python.

```

1 x_best = Set_initial_solution()
2 x_best_glob = x_best # best global solution
3 tabulist = Set_initial_tabu_list()
4 tabulist.append(x0)
5 stopping_criterion = False

```

```

6
7 while (stopping_criterion == False):
8
9     solution_neighbours = get_neighbours(x_best)
10
11     for solution_candidate in solution_neighbours:
12
13         if (not (candidate in tabulist)): # allowed solution?
14             if( Calc_fitness(candidate) > Calc_fitness(x_best)):
15                 x_best = candidate
16
17         if( Calc_fitness(x_best) > Calc_fitness(x_best_glob)):
18             x_best_glob = x_best # did the global best change?
19
20     tabulist.append(x_best_candidate)
21     tabulist = reduce_tabulist_size(tabulist) # reducing size of tabulist
22
23     stopping_criterion = Check_stopping_criterion()

```

Algorithmus A.1: Tabu Search (Python)

```

1 x = Set_initial_solution()
2 T = Set_initial_temperature()
3 n_max = Set_repetitions_per_anneal()
4 stopping_criterion = False
5
6 while (stopping_criterion == False):
7
8     n = 0 # Set repetition counter
9     while (n <= n_max):
10
11         x_new = Generate_neighbour(x) # x_new is a neighbour of x
12         Fitness_x = Calc_fitness(x)
13         Fitness_x_new = Calc_fitness(x_new)
14         delta = Calculate_delta(Fitness_x, Fitness_x_new)
15
16         If (delta < 0): # did the fitness increase?
17             x = x_new
18
19         elif (random(0, 1) < exp(- delta / T)):
20             x = x_new
21
22         n = n + 1
23
24     T = Cool_Temperature(T)
25     stopping_criterion = Check_stopping_criterion()

```

Algorithmus A.2: Simulated Annealing (Python)

```

1 def Generate_neighbour(x):
2

```

```

3  while (True):
4      # Choose two random entries
5      index_1 = random_integer(0, len(x))
6      index_2 = random_integer(0, len(x))
7
8      if (index_1 != index_2):
9          break
10
11     x_new = x
12     # Change the two chosen entries
13     x_new[index_1, index_2] = x[index_2, index_1]
14
15     return x_new

```

Algorithmus A.3: Generieren einer Nachbarlösung (Python)

```

1  X = Set_initial_population()
2  # X is a vector of solutions (vector of vectors)
3  F = Calc_fitness(X)
4  stopping_criterion = False
5
6  while (stopping_criterion == False):
7
8      # Crossover
9      params_crossover = Get_crossover_parameters()
10     parents = Select_parents(X, params_crossover)
11     X_new = Crossover(parents, params_crossover)
12
13     # Mutation
14     params_mutation = Get_mutation_parameters()
15     children_to_mutate = Select_children(X_new)
16     X_new = Mutate(children_to_mutate, params_mutate)
17
18     # Fitness assignment
19     F_new = Calc_fitness(X_new)
20
21     # Selection
22     X = Selection(X, X_new, F, F_new)
23
24     stopping_criterion = Check_stopping_criterion()

```

Algorithmus A.4: Genetischer Algorithmus (Python)

```

1  def single_Crossover(parent_1, parent_2):
2      # both parents must have the same length
3
4      # Randomly generating a dividing index
5      cross_position = random_integer(0, len(parent_1))
6
7      # Dividing in heads and tails
8      head_1 = parent_1[0:cross_position]
9      head_2 = parent_2[0:cross_position]
10     # Tails are initialized as empty lists
11     tail_1 = list(len(parent_1) - cross_position)
12     tail_2 = list(len(parent_2) - cross_position)
13
14     tail_index_1 = 0
15     tail_index_2 = 0

```

```

16
17 # Iterating all elements
18 for (element in range(0, len(parent_1) + 1)):
19
20     # If element is not in head -> aepend to tail
21     if parent_2[element] not in head_1:
22         tail_1[tail_index_1] = parent_2[element]
23         tail_index_1 = tail_index_1 + 1
24
25     # If element is not in head -> aepend to tail
26     if parent_1[element] not in head_2:
27         tail_2[tail_index_1] = parent_1[element]
28         tail_index_2 = tail_index_2 + 1
29
30 # Create children by mixing heads and tails
31 child_1 = append(head_1, tail_1)
32 child_2 = append(head_2, tail_2)
33
34 return (child 1, child 2)

```

Algorithmus A.5: Kreuzungsoperator, Genetischer Algorithmus (Python)

A.2.3 C++ Implementierung Lösungsnummerierung für die MLO

```

1 void add_one_for_gmp(int &value, int &increment, int &k) {
2     // Helper-function for increasing the value by 1 in
3     // analogy to a binary counter.
4
5     if (value < k - 1) {
6         value++;
7         increment = 0;
8     }
9
10    else {
11        value = 0;
12        increment = 1;
13    }
14 }
15
16 void add_value_increment_for_gmp(vector <int> &single_permutation, int &idx
17     , int &n, int &k) {
18     // Recursive helper-function for treating increment = 1.
19
20     int value, increment; // Initializing variables locally
21     single_permutation[idx] = 0; // as increment == 1 -> value == 0
22
23     idx--; // stepping forward in index
24     if (idx >= 0) { // as long as the index is >= its minimum 0
25         value = single_permutation[idx]; // reading current value
26         add_one_for_gmp(value, increment, k); // increase value by 1
27     }
28     else { // otherwise, the Base-Case is reached -> function stops
29         return;
30     }
31
32     // If increment == 1, the function calls itself.
33     if (increment == 1) {
34         add_value_increment_for_gmp(single_permutation, idx, n, k);
35     }

```



```

35
36     else { // otherwise -> update value
37         single_permutation[idx] = value;
38     }
39
40     // re-setting index
41     idx = n - 1;
42 }
43
44 vector<vector<int>> generate_mult_permutations(int n, int k) {
45     // The function generates all possible permutation.
46     // with n = 2 and k = 2 e.g.: (0,0), (0,1), (1,0), (1,1)
47
48     vector<int> single_permutation(n, 0);
49     vector<vector<int>> all_permutations;
50     int value = 0; // counter
51     int increment = 0; // increment
52     int idx = n - 1;
53
54     for (int i = 0; i < pow(k, n); i++) {
55         // main loop -> enumerating all possible solutions
56
57         all_permutations.push_back(single_permutation);
58         value = single_permutation[idx];
59         add_one_for_gmp(value, increment, k);
60
61         if (increment == 1) { // if increment -> alternative path
62             add_value_increment_for_gmp(single_permutation, idx, n, k);
63         }
64         else { // otherwise -> update value
65             single_permutation[idx] = value;
66         }
67     } // next iteration (next solution)
68
69     return all_permutations; // return the vector-vector
70 }

```

Algorithmus A.6: Generische Funktion zum Enumerieren der Lösungsstrategien (C++)

A.3 Detailausführungen zu den Fallstudien

A.3.1 Normierte Fitnessfunktion

Um die Fitnessfunktionen unterschiedlicher Reihenfolgepläne gegenüberstellen zu können und das Verbesserungspotential, das durch eine WMBPRO erzielt werden kann, darzustellen, wird die Metrik F_{norm} definiert (vgl. Gleichung A.1). F_{norm} normiert die Fitness der historischen Produktionsreihenfolge auf die Fitness, die sich nach der Anwendung der WMBPRO ergibt. Ein $F_{norm} > 1$ bedeutet dabei eine Verbesserung der Fitness durch die WMBPRO, wogegen ein Wert $F_{norm} < 1$ einer Verschlechterung gegenüber dem historischen Produktionsplan bedeutet.

$$F_{norm} = 1 + \frac{F_{hist} - F_{WMBPRO}}{F_{WMBPRO}} = \frac{F_{hist}}{F_{WMBPRO}} \quad (\text{A.1})$$

mit

- F_{hist} ... Fitness der historischen Produktionsreihenfolge (pre-WMBPRO)
 F_{WMBPRO} ... Fitness der Produktionsreihenfolge (post-WMBPRO)

Es seien \vec{x}_{hist} der Reihenfolgevektor der historisch realisierten Produktionsreihenfolge und \vec{x}_{WMBPRO} der Reihenfolgevektor, der durch die Optimierung mittels WMBPRO entsteht. Die beiden Vektoren bestehen dabei aus denselben Aufträgen, sind jedoch im Allgemeinen unterschiedliche Permutationen. F_{hist} berechnet sich folglich, indem die Fitnessfunktion auf den historischen Produktionsreihenfolgevektor \vec{x}_{hist} angewendet wird, zu $F_{hist} = F(\vec{x}_{hist})$. F_{WMBPRO} berechnet sich durch Anwenden der Fitnessfunktion auf den optimalen Produktionsreihenfolgevektor \vec{x}_{WMBPRO} zu $F_{WMBPRO} = F(\vec{x}_{WMBPRO})$.

A.3.2 Fallstudie 1: Regressionsmodell

In Tabelle A.3 sind die numerischen Werte zum in Abschnitt 6.2.3 entwickelten Regressionsmodell (vgl. Gleichung 6.1) dargestellt.

Tabelle A.3: Numerische Werte Regressionsmodell (Fallstudie 1)

a_i	Bedeutung des Koeffizienten	Numerischer Wert
a_0	Unabhängiger Koeffizient (Intercept)	+1,0156
a_1	Koeffizient des Schwingungsmittelwertes	+8,1577 · 10 ⁻³
a_2	Koeffizient des Schwingungsmaximalwertes	+8,5660 · 10 ⁻²
a_3	Koeffizient der kumulierten Schnittanzahl	-5,7302 · 10 ⁻⁵

A.3.3 Fallstudie 1: Produktionsprozess

Der Produktionsprozess ist in Abbildung A.14 dargestellt. Die Bezeichnung „Rüst-“ kennzeichnet dabei die Instandsetzungstätigkeiten, die den Scherenmesserzustand erhöhen.

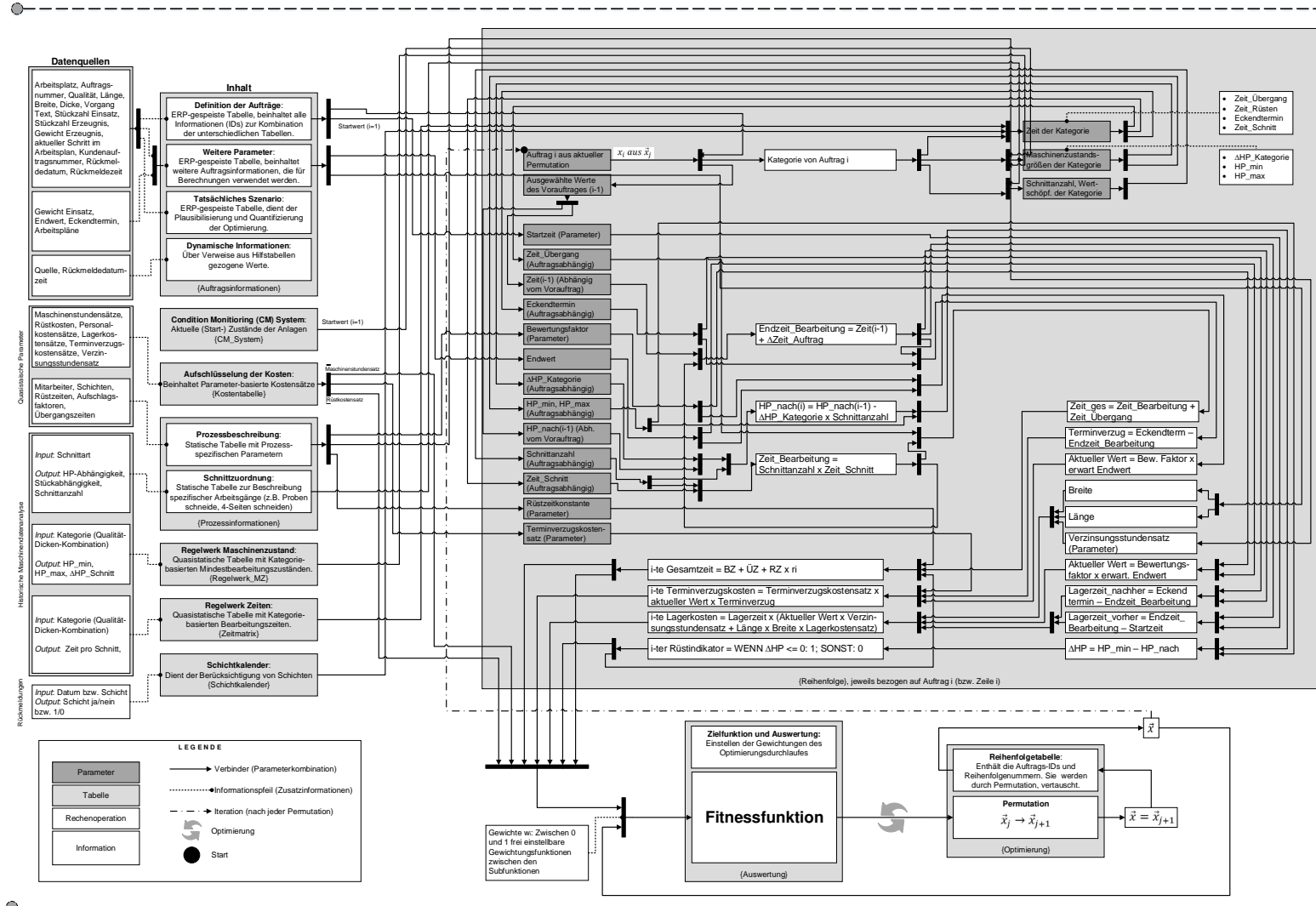


Abbildung A.14: Abbildung des Produktionsprozesses (Fallstudie 1)

A.3.4 Fallstudie 1: Nutzenbewertung

Die Gegenüberstellung der historisch realisierten Fitnesswerte mit jenen, die durch eine WMB-PRO erzielt werden können, wurde in Tabelle 6.4 jeweils lediglich zum Monatsersten dargestellt. Um einen feingranularen Einblick zu bieten, wird an dieser Stelle eine tägliche Gegenüberstellung für den Betrachtungszeitraum Monat D präsentiert (vgl. Tabelle A.4).

Tabelle A.4: Nutzenbewertung Monat D (Fallstudie 1)

Datensatz	Reichweite in Tagen	HP Start	F_{norm}
1	5,19	8,51	1,11964
2	4,80	8,25	1,10978
3	3,78	8,12	1,08692
4	3,57	8,05	1,07553
5	3,57	8,05	1,07293
6	4,74	8,02	1,10797
7	4,68	7,72	1,08291
8	5,41	7,52	1,09995
9	5,28	7,34	1,11414
10	6,28	7,26	1,12870
11	5,22	7,08	1,12420
12	7,14	6,78	1,15545
13	7,70	6,62	1,16658
14	7,98	6,60	1,16847
15	8,38	6,36	1,18301
16	7,93	5,17	1,17191
17	6,52	3,97	1,13196
18	5,40	9,99	1,11191
19	4,94	9,81	1,09900
20	5,41	9,68	1,10898
21	6,04	9,51	1,12905
22	5,58	9,42	1,10744
23	3,76	9,29	1,07331
24	3,04	9,23	1,05726
25	4,65	9,02	1,09553
26	4,74	8,85	1,09916
27	4,68	8,70	1,09937
28	5,38	8,61	1,10715
29	5,73	8,43	1,12175
30	5,52	8,20	1,11389

A.4 Verzeichnis betreuter Studentenarbeiten

Im Rahmen der Erstellung der vorliegenden Dissertation entstanden am Institut für Managementwissenschaften der Technischen Universität Wien die in Tabelle A.5 angeführten Bachelor- und Masterarbeiten, die unterschiedliche Fragestellungen in den Bereichen Condition Monitoring, PPS sowie Methoden des maschinellen Lernens im Kontext der Produktion behandelten. Die angeführten wissenschaftlichen Arbeiten sind unter wissenschaftlicher, fachlicher sowie inhaltlicher Anleitung des Autors der vorliegenden Dissertation entstanden. Teilergebnisse dieser wissenschaftlichen Arbeiten haben zur Definition der Forschungslücke sowie zur Abgrenzung des Forschungsbereiches beigetragen. Der Autor dankt hiermit allen Diplomandinnen und Diplomanden für ihr Engagement.

Tabelle A.5: Vom Autor der Dissertationsschrift betreute Bachelor- und Masterarbeiten

Name	Titel der wissenschaftlichen Arbeit
Fiel, A.	Machine specific Sensor Map for Condition Monitoring Systems, Masterarbeit, 2018
Hagenauer, J.	Planungsmethoden der Produktion in der metallverarbeitenden Industrie im Kontext der Digitalisierung, Bachelorarbeit, 2018
Heiner, M.	Eine systematische Literaturrecherche zur Abbildung des aktuellen Standes der Forschung hinsichtlich der Prognose von Durchlaufzeiten unter dem Einsatz von Machine Learning Methoden, Bachelorarbeit, 2019
Kremslehner, N.	Einsatz von Machine Learning zur Prognose der Durchlaufzeit, Bachelorarbeit, 2019
Mastalir, T.	Planungsmethoden der Produktion in der metallverarbeitenden Industrie im Kontext der Digitalisierung, Masterarbeit, 2019
Nenning, C.	Optimierungsmethoden in der Produktionsplanung: Eine systematische Literaturrecherche, Bachelorarbeit, 2018
Prätterhoffer, R.	Implementation of a Systematic Literature Review on Research Trends of Machine Scheduling Problems in Production applying Methods of Text Mining and Survey Research. Masterarbeit, 2019
Prochazka, A.	Systematic review of the current state of research in the field of lead time prog-nosis using machine learning. Bachelorarbeit, 2019

A.5 Änderungslog

Die vorliegende Version der Dissertation ist Version 2.2.

Änderungen Version 1.1 → Version 2.1: Diese Änderungen wurden nach der Erstbetrachtung durch den Betreuer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Sihm durchgeführt.

- **Formatierungen:**
 - Abbildung 1.1 wurde neu formatiert
 - Das Deckblatt wurde aktualisiert.
 - Die Schriftgröße wurde angepasst.
 - Die Sourcecodes wurden durch Pseudocodes ersetzt (vgl. Abschnitt 5.5.1: Algorithmen 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 und 5.5).
- **Abschnitt 2:**
 - Abschnitt 2.3 wurde erweitert.
 - Abschnitt 2.5 wurde erstellt.
- **Abschnitt 3:**
 - Der Abschnitt wurde neu strukturiert und der Subabschnitt 3.3 wurde angepasst.
 - Die Diskussion der zentralen Ergebnisse der Literaturanalyse (Subabschnitt 3.3.3) wurde intensiviert.
- **Abschnitt 5:**
 - Das Phasenmodell (Abbildung 5.1) wurde in ein Flussdiagramm (Abbildung 5.2) überführt. Des Weiteren wurden Subflussdiagramme für die einzelnen Phasen erstellt (Abbildungen 5.3, 5.4, 5.5 und 5.8).
 - Am Ende der Beschreibung jeder Phase wurden jeweils die Ergebnisse zusammengefasst (Abschnitte 5.2.4, 5.3.3, 5.4.4 und 5.5.3).
 - Die Zusammenfassung des Phasenmodells (Abschnitt 5.6) wurde erweitert.
- **Abschnitt 6:**
 - Analog zu Abschnitt 5 wurden auch in Abschnitt 6 Flussdiagramme zur Visualisierung der einzelnen Phasen ergänzt (Abbildungen 6.1, 6.5, 6.8 und 6.10 sowie 6.13, 6.14, 6.15 und 6.17).
 - Die Vergleichsbetrachtung der beiden Fallstudien (Subabschnitt 6.4) wurde neu formuliert.

Änderungen Version 2.1 → Version 2.2: Diese Änderungen wurden nach der Erstbetrachtung durch die Gutachter Univ.-Prof. Dr. mont. Hubert Biedermann und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper durchgeführt.

- **Formatierungen:**

- Abbildung 1.5 wurde neu formatiert, um die Übersichtlichkeit zu verbessern.
- Ein Formatierungsfehler der Pseudocodes in Subabschnitt 5.5.1 wurde behoben (Algorithmen 5.2 und 5.3).
- Zur Dokumentation der Änderungen wurde in Abschnitt A.5 ein Änderungslog erstellt.

- **Abschnitt 3:**

- In die Diskussion der zentralen Ergebnisse der Literaturanalyse wurden Erkenntnisse aus der deutschsprachigen Literatur integriert (Subabschnitt 3.3.1), die die identifizierte Forschungslücke weiter untermauern.
- Subabschnitt A.1.5 wurde in den Appendix verschoben.