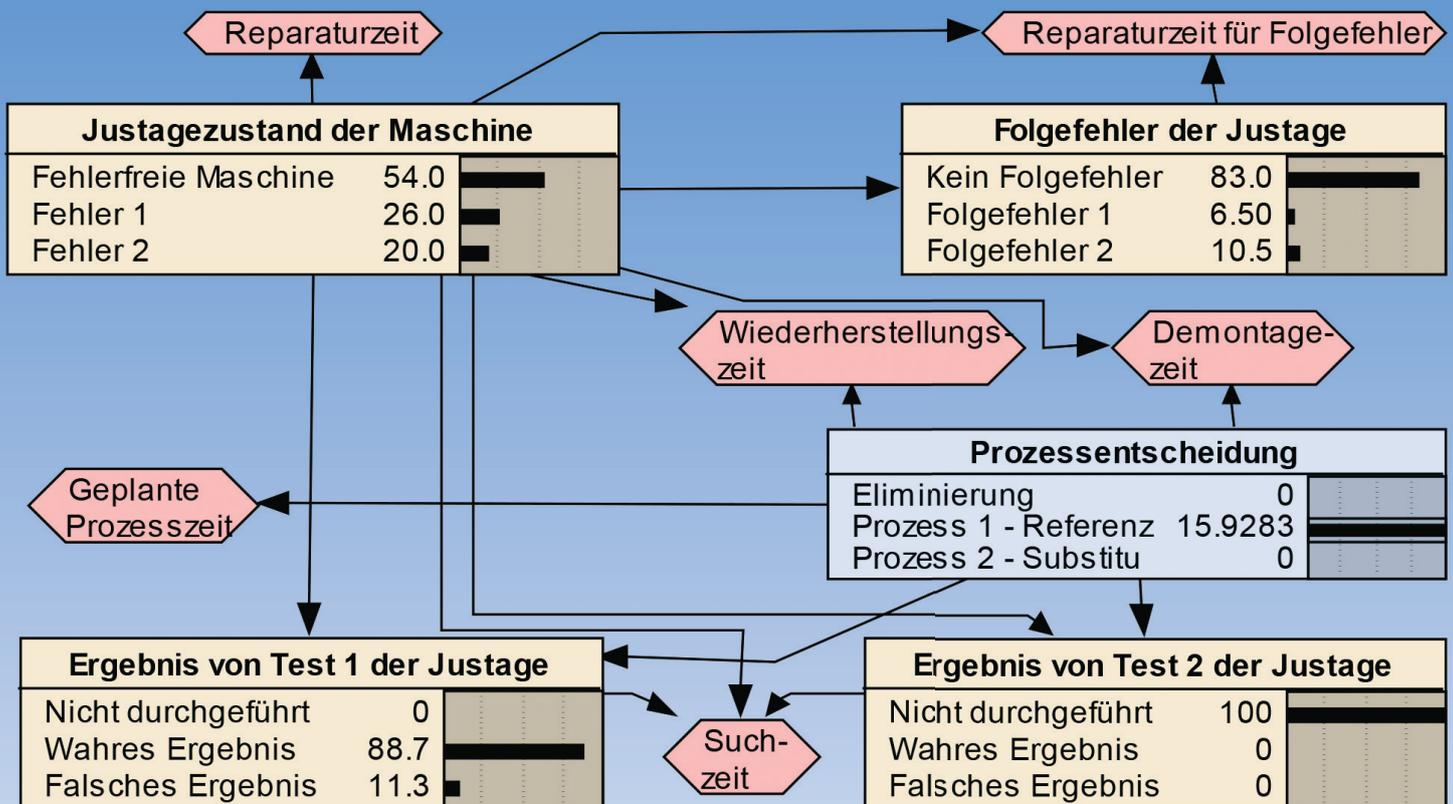


Prozessplanungsmodell für eine Effizienzsteigerung von Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau



STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 124

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a.D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Sebastian Pöschl

Prozessplanungsmodell für eine Effizienz- steigerung von Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11/970-11 01
info@ipa.fraunhofer.de; www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl^{1,2}
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke^{1,4}
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber^{1,2}
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer^{1,5}
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl³
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper^{1,2}

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

² Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

³ Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

⁴ Institut für Photovoltaik (IPV) der Universität Stuttgart

⁵ Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

Titelbild: © Sebastian Pöschl

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-8396-1734-2

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Druck und Weiterverarbeitung:
Fraunhofer Verlag, Mediendiensteleistungen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2021

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Prozessplanungsmodell für eine Effizienzsteigerung von Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau

Von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing
Engineering der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Sebastian Pöschl
aus Ludwigsburg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bauernhansl

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Februar 2021

Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering der
Universität Stuttgart

2021

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering GSaME der Universität Stuttgart. Herrn Professor Bauernhansl danke ich sehr für die Übernahme der Betreuung, die Unterstützung und die wertvollen Hinweise. Die gute Betreuung von Professor Bauernhansl haben den Aufbau und den Inhalt der Thesis sehr gefördert. Weiterhin möchte ich Frau Professorin Lanza als Mitberichterin und Herrn Professor Mitschang als Prüfungsvorsitzenden danken.

Besonders möchte ich Herrn Hans-Friedrich Jacobi danken. Die jahrelange Zusammenarbeit, die stets von gegenseitigem Respekt, Offenheit sowie Engagement geprägt war und weit über einen geschäftlichen Charakter hinausging, empfand ich als sehr bereichernd.

Der Geschäftsführung der TRUMPF Lasersystems for Semiconductor Manufacturing GmbH & Co KG, insbesondere Herrn Dr. Michael von Borstel, danke ich für die Ermöglichung der Arbeit und für die beratende Unterstützung.

Ich danke der Abteilung EUV Production, insbesondere Herrn Dr. Frank Wirth, ohne den die Arbeit nicht in dieser Form zu Stande gekommen wäre. Die fachlichen und ergebnisorientierten Diskussionen mit Herrn Dr. Frank Wirth ermöglichten den Umfang und den praktischen Bezug.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern Ute Lang-Pöschl und Wolfgang Pöschl. Zudem möchte ich meiner Frau Carolin Pfeiffer, meiner Tochter Victoria und meinem Sohn Jonah für die Unterstützung während der Arbeit danken.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XVI
Abkürzungsverzeichnis	XVII
Kurzzusammenfassung	XVIII
Abstract.....	XX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung.....	5
1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage	7
1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung	10
2 Charakteristika des Maschinenbaus.....	20
2.1 Bedeutung und Struktur der Branche Maschinenbau.....	20
2.2 Die Querschnittsfunktion Sondermaschinenbau	23
2.3 Vergleichbarkeit zum Serienanlauf und zur Wiederholproduktion	27
2.4 Produktentstehungsprozess im Maschinenbau	29
2.5 Grundsätzliche Herausforderungen im Maschinenbau	30

3	Inbetriebnahme	34
3.1	Bedeutung und Aufgabenstellung	34
3.2	Einflüsse des Sondermaschinenbaus und der Wiederholproduktion	38
3.3	Herausforderungen in der Inbetriebnahme.....	39
3.4	Reflexion bestehender Ansätze in der Inbetriebnahme.....	42
4	Prozessplanung	46
4.1	Bedeutung der Planung des Inbetriebnahmeprozesses.....	46
4.2	Herausforderungen in der Prozessplanung für die Inbetriebnahme	49
4.3	Reflexion bestehender Ansätze der Prozessplanungsmethoden	51
5	Analysemethoden für die Prozessplanung	60
5.1	Anforderungen an Analysemethoden in der Prozessplanung.....	60
5.2	Reflexion bestehender Ansätze in der Prozessplanung.....	61
5.3	Reflexion generischer Analysemethoden	63

6	Generisches Prozessmodell	75
6.1	Entwicklungsanforderungen an ein generisches Prozessmodell	75
6.2	Referenzschema der Prozessplanung	77
6.3	Deduktion der Modellierungsmethode und des Prozessmodells	78
6.4	Deduktion der Bewertungsmethode	82
6.5	Entwicklung des generischen Prozessplanungsmodells	83
6.6	Entwicklung einer Validierungsmethodik für den Modelltransfer	85
7	Instanziierung des Prozessplanungsmodells	89
7.1	Instanziierung des allgemeinen Prozessmodells	89
7.2	Instanziierung der Bewertungsmethode	93
7.3	Instanziierung des Prozessplanungsmodells	96
7.4	Instanziierung der Validierungsmethodik für den Modelltransfer	103
7.5	Anwendungsmethodik des Prozessplanungsmodells	104
8	Theoretische Validierung	110
8.1	Reflexion des generischen Modells	111
8.2	Sicherung der Anwendung der Axiome	112
8.3	Reduzierung der Validierungsfälle	114
8.4	Diskussion unterstützender Auswertungsmethoden	118

9 Fallbeispiele	119
9.1 Überblick über die Fallbeispiele.....	119
9.2 Fallbeispiel der Substitution und Eliminierung.....	120
9.3 Fallbeispiele für vernetzte Prozesspläne.....	124
9.4 Validität der Ergebnisse.....	128
9.5 Reflexion des Modells anhand der Analyse- und Gestaltungsanforderungen.....	130
10 Zusammenfassung	133
Literaturverzeichnis	136
Anhänge	172

Ausführliches Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XVI
Abkürzungsverzeichnis	XVII
Kurzzusammenfassung	XVIII
Abstract.....	XX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung.....	5
1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage	7
1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung	10
1.4.1 Systematische Einordnung	11
1.4.2 Entdeckungszusammenhang.....	13
1.4.3 Begründungszusammenhang.....	14
1.4.4 Verwendungszusammenhang	15
1.4.5 Aufbau der Arbeit.....	17

2	Charakteristika des Maschinenbaus	20
2.1	Bedeutung und Struktur der Branche Maschinenbau.....	20
2.2	Die Querschnittsfunktion Sondermaschinenbau	23
2.3	Vergleichbarkeit zum Serienanlauf und zur Wiederholproduktion	27
2.4	Produktentstehungsprozess im Maschinenbau.....	29
2.5	Grundsätzliche Herausforderungen im Maschinenbau	30
3	Inbetriebnahme	34
3.1	Bedeutung und Aufgabenstellung	34
3.2	Einflüsse des Sondermaschinenbaus und der Wiederholproduktion	38
3.3	Herausforderungen in der Inbetriebnahme.....	39
3.4	Reflexion bestehender Ansätze in der Inbetriebnahme.....	42
3.4.1	Virtuelle Inbetriebnahme	42
3.4.2	X-in-the-loop	43
3.4.3	Anlaufrobuste Produktionssysteme	44

4	Prozessplanung	46
4.1	Bedeutung der Planung des Inbetriebnahmeprozesses.....	46
4.2	Herausforderungen in der Prozessplanung für die Inbetriebnahme	49
4.3	Reflexion bestehender Ansätze der Prozessplanungsmethoden	51
4.3.1	Prozesslandschaften.....	51
4.3.2	Critical Path Planning.....	52
4.3.3	Heuristische Prozessoptimierungen	52
5	Analysemethoden für die Prozessplanung	60
5.1	Anforderungen an Analysemethoden in der Prozessplanung.....	60
5.2	Reflexion bestehender Ansätze in der Prozessplanung.....	61
5.3	Reflexion generischer Analysemethoden	63
5.3.1	Risikomanagement	64
5.3.2	Bayesche Netze.....	69
5.3.3	Datenerhebung	73

6	Generisches Prozessmodell	75
6.1	Entwicklungsanforderungen an ein generisches Prozessmodell	75
6.2	Referenzschema der Prozessplanung	77
6.3	Deduktion der Modellierungsmethode und des Prozessmodells	78
6.4	Deduktion der Bewertungsmethode	82
6.5	Entwicklung des generischen Prozessplanungsmodells	83
6.6	Entwicklung einer Validierungsmethodik für den Modelltransfer	85
7	Instanziierung des Prozessplanungsmodells	89
7.1	Instanziierung des allgemeinen Prozessmodells	89
7.2	Instanziierung der Bewertungsmethode	93
7.3	Instanziierung des Prozessplanungsmodells	96
7.3.1	Instanziierung der Prozessentscheidung	97
7.3.2	Instanziierung der Strategie zur Datenakquise	100
7.4	Instanziierung der Validierungsmethodik für den Modelltransfer	103
7.5	Anwendungsmethodik des Prozessplanungsmodells	104

8 Theoretische Validierung	110
8.1 Reflexion des generischen Modells	111
8.2 Sicherung der Anwendung der Axiome	112
8.3 Reduzierung der Validierungsfälle.....	114
8.4 Diskussion unterstützender Auswertungsmethoden	118
9 Fallbeispiele	119
9.1 Überblick über die Fallbeispiele.....	119
9.2 Fallbeispiel der Substitution und Eliminierung.....	120
9.3 Fallbeispiele für vernetzte Prozesspläne.....	124
9.4 Validität der Ergebnisse.....	128
9.5 Reflexion des Modells anhand der Analyse- und Gestaltungsanforderungen.....	130
10 Zusammenfassung	133
Literaturverzeichnis	136
Anhänge	172

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Trends im Maschinenbau (n=333) (VDMA-McKinsey, 2014, S. 40).....	2
Abbildung 1-2: Produktentstehungsprozess im Sondermaschinenbau nach (Wiendahl, Hegenscheidt und Winkler, 2002, S. 651).....	3
Abbildung 1-3: Aufgaben in der Inbetriebnahme und im Hochlauf nach (Wünsch, 2008, S. 14, Schuh und Lenders, 2013, S. 311) ..	3
Abbildung 1-4: Verteilung der Unternehmen auf Anbietertyp und Standardisierungskategorie (n=333) (VDMA-McKinsey, 2014, S. 30).....	4
Abbildung 1-5: Fehlerentstehung und -behebung nach (VDI-2247:1994).....	7
Abbildung 1-6: Einordnung der Zielsetzung auf technischer und organisatorischer Ebene (Hinrichsen, 2003, S. 22).....	8
Abbildung 1-7: Forschungsvorgehen	10
Abbildung 1-8: Wissenschaftssystematik (Ulrich und Hill, 1976, S. 305).....	12
Abbildung 1-9: Wissenschaftliche Grundprobleme der Betriebswirtschaftslehre (Ulrich und Hill, 1976, S. 307)	16
Abbildung 1-10: Angewandte Wissenschaft im Theorie- und Praxisbezug (nach Ulrich, 2001, S. 195).....	17
Abbildung 1-11: Verknüpfung der Kapitel mit den Teilzielen.....	19
Abbildung 2-1: Einordnung unterschiedlicher Produktionsarten (Bauernhansl, 2015, S. 131)	22

Abbildung 2-2: Vergleich des Order Penetration Points (OPP) im Engineer-to-Order (ETO) zum Make-to-Order (MTO) (Gosling und Naim, 2009, S. 752)	24
Abbildung 2-3: Produktionsmodell der Montage im Sondermaschinenbau nach (Schuh, 2006, S. 18, Lotter und Wiendahl, 2012, S. 147).....	26
Abbildung 2-4: Der Produktentstehungsprozess und Produktionsprozess von Maschinen (Wiendahl, Hegenscheidt und Winkler, 2002, S. 651, Schuh, 2012, S. 355)	30
Abbildung 2-5: Fehlerentstehung und Behebung (nach VDI-2247:1994, S. 5).....	33
Abbildung 3-1: Durchlaufzeit IBN - Liege- und Wartezeiten, störungsbedingte Bearbeitungszeiten, geplante Bearbeitungszeiten (Eversheim, 1990, VDW, 1997)	37
Abbildung 4-1: Reihenfolge von Aktivitäten ändern (Schlick, Luczak und Bruder, 2010, S. 487)	55
Abbildung 4-2: Eliminieren von Aktivitäten (Schlick, Luczak und Bruder, 2010, S. 487).....	55
Abbildung 4-3: Zusammenfassen von Aktivitäten (Schlick, Luczak und Bruder, 2010, S. 487)	56
Abbildung 4-4: Auslagern von Aktivitäten (Schlick, Luczak und Bruder, 2010, S. 487).....	57
Abbildung 4-5: Vereinfachen von Aktivitäten (Schlick, Luczak und Bruder, 2010, S. 487)	57
Abbildung 4-6: Abbau von Schnittstellen (Schlick, Luczak und Bruder, 2010, S. 487).....	58
Abbildung 4-7: Parallelisieren von Aktivitäten (Schlick, Luczak und Bruder, 2010, S. 487)	58

Abbildung 5-1: Der Risikomanagementprozess (31000:2011, S. 22)	65
Abbildung 5-2: Reduzierter Risikomanagementprozess (nach 31000:2011, S. 22).....	66
Abbildung 5-3: Strukturierung des Risikomanagements im Anlauf (Nagel, 2011, S. 142, Wiendahl, Hegenscheidt und Winkler, 2002, Schuh, 2012, S. 355).....	68
Abbildung 6-1: Entwicklungsanforderungen (1 bis 4) zur Reduzierung der Durchlaufzeit über den Produktentstehungsprozess.....	75
Abbildung 6-2: Modellreferenzsystem der heuristischen Prozessoptimierungen in Relation (in Anlehnung an (Schlick, Luczak und Bruder, 2010))	81
Abbildung 6-3: Lösungsmatrix mit Bestandteilen des generischen Modells zur Prozessplanung	84
Abbildung 6-4: Bezüge des generischen Modells auf Prozessfragmente	87
Abbildung 7-1: Modulbaustein der Analyse des Justagezustands	90
Abbildung 7-2: Übertrag der Analyse des Justagezustands in ein Bayesches Netz als Modulbaustein	92
Abbildung 7-3: Prozessmodell von beispielhaften Fehlerzuständen.....	94
Abbildung 7-4: Modellierung der Zeitanteile in einem Bayeschen Netz mit Nutzwerten	96
Abbildung 7-5: Instanziierung der Prozessplanungsmethode	98
Abbildung 7-6: Beispiel eines instanziierten generischen Modells in der Betrachtung des Referenzprozesses	100
Abbildung 7-7: Granulare interdisziplinäre Lösungsstrategie zur Gewinnung von nicht gemessenen Daten.....	102
Abbildung 7-8: Abstrahierung des Lösungsmodells	104

Abbildung 7-9: Übersicht über die Anwendungsmethodik des Prozessmodells (nach Poeschl, Wirth und Bauernhansl, 2018, S. 5).....	106
Abbildung 8-1: Bezüge des generischen Modells auf Prozessfragmente	112
Abbildung 8-2: Schema zur Reduzierung der Validierungsfälle	115
Abbildung 9-1: Auswahl an Prozessoptimierungen.....	121
Abbildung 9-2: Beispiel des Prozessplanungsmoduls.....	123
Abbildung 9-3: Modellierung der ersten Prozessmodule (Ausschnitt aus Abbildung 9-4)	125
Abbildung 9-4: Zustandsveränderungen über den Inbetriebnahmeprozess	126
Abbildung 0-1: Montieren (Lotter und Wiendahl, 2012, S. 2)	172

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Einordnung eines programmgebundenen Unternehmens im Ramp-up zwischen einem auftragsorientierten und einem programmgebundenen Unternehmen (Eversheim 1996; Schares 1999; Possel-Dölken; Schilke 2010; TCW - Transfer-Centrum Wildemann 2015; Poeschl u. a. 2016, S. 851).....	28
Tabelle 2-2. Herausforderungsanalyse Maschinenbau.....	31
Tabelle 3-1. Herausforderungsanalyse Inbetriebnahme	40
Tabelle 4-1: Abhängigkeit und Erläuterung von Prozessbildern (Schlick, Luczak, Bruder 2010, S. 490).....	54
Tabelle 5-1: Bayesche Netze in der Produktion 2000 – 2016 (Poeschl u. a. 2017a)	71
Tabelle 7-1: Zeitmatrix zu den verknüpften Knoten i mit zwei Zuständen mit dem Knoten j mit vier Zuständen.....	95
Tabelle 8-1: Validierung und Verifizierung des Modells	117
Tabelle 9-1: Robustheitsanalyse für das Entscheidungsmodell.....	129

Abkürzungsverzeichnis

ETO	Engineer-to-Order
DAG	Directed Acyclic Graph
DoE	Design of Experiments
MTO	Make-to-Order
OPP	Order Penetration Point
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V.
PDCA	Plan Do Check Act
SOP	Start of Production
WIP	Work in Process

Kurzzusammenfassung

Der Maschinenbau ist maßgeblich am Erfolg der produzierenden Industrie beteiligt, daher ist ein effizienter Produktentstehungsprozess besonders wichtig. Dabei weisen vor allem Inbetriebnahmeprozesse, die den größten Anteil an Fehlerentdeckungen im Gesamtprozess haben, ein großes Optimierungspotenzial auf. Der steigende Druck auf Unternehmen im Maschinenbau unterstreicht die Notwendigkeit, die Inbetriebnahme einer genaueren Betrachtung zu unterziehen.

Untersucht werden insbesondere Prüf- und Einstellprozesse, um die Justage zu verändern und nicht planbare Fehler zu finden. Während im Maschinenbau die Wahrscheinlichkeiten von Fehlern statistisch belegbar sind, muss in Neuentwicklungsprozessen und im Sondermaschinenbau auf Experten-erfahrungen zurückgegriffen werden.

Der Forschungsansatz dieser Arbeit verdeutlicht das Potenzial der Prozessplanung unter der Berücksichtigung von Fehlerrisiken während der Inbetriebnahme. Damit wird in der Prozessplanung erstmals eine Risikoanalyse in die Berechnung der Durchlaufzeit integriert. Mithilfe eines Bayeschen Netzes kann die Struktur eines Prozessplans modelliert und mit Fehlerwahrscheinlichkeiten hinterlegt werden. Wegen der unsicheren Datenlage, insbesondere im Maschinenbau, sollte eine Robustheitsanalyse in die Auswertung integriert und damit die Wahrscheinlichkeit der Auswahl des effizientesten Prozesses erhöht werden. Weiterhin werden für die Verbesserung der Datenqualität Akquisekonzepte für den Maschinenbau in den Planungsprozess eingeführt.

Auf diese Weise ist es erstmals möglich, nicht nur die Durchlaufzeit eines Projektes zu betrachten, sondern gleichzeitig die wahrscheinlichste Durchlaufzeit und das resultierende Fehlerrisiko für den Kunden zu errechnen. In Fallbeispielen wird eine Prozessoptimierung beschrieben und die Durchlaufzeit um bis zu 40% reduziert.

Der Ansatz dieses Prozessplanungsmodells für eine Effizienzsteigerung in Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau leistet damit einen entscheidenden Beitrag, eine Forschungslücke in der Inbetriebnahme zu schließen. Zudem unterstützt er den Planungsprozess, indem er Risiken transparent darstellt.

Abstract

The decisive contribution of the manufacturing industry to the success of German economy increases the importance of an efficient product development process. In particular, commissioning processes, which contain the largest proportion of error detections in the overall process, have great optimization potential. The increasing pressure on machinery equipment companies underlines the necessity of considering commissioning.

The commissioning process is primarily characterized by test and adjustment processes to change the adjustment and detect errors and is therefore subject to the influence of unplannable errors in the machine. While in engineering the probabilities of errors can be statistically proven, in new development processes and in special machine construction expert experience must be drawn upon.

The research approach illustrates the potential of process planning, taking into account the risk of errors during commissioning. For the first time, a risk analysis is integrated into the calculation of the throughput time in process planning. Using a Bayesian network, the structure of a process plan can finally be modeled and stored with error probabilities. Due to the uncertain data situation, which is particularly present in engineering, a robustness analysis must be integrated into the evaluation and thus the probability of selecting the most efficient process can be increased. Furthermore, acquisition concepts for mechanical engineering are adapted to the planning process in order to improve data quality.

This makes it possible for the first time not only to consider the lead time of a project, but also to calculate the statistically most probable lead time and the resulting error risk for the customer using the same approach. In case studies, process optimization is described and the lead time is reduced by up to 40%.

The approach of the process planning model for increasing efficiency in commissioning processes in mechanical engineering thus makes a decisive contribution to closing a research gap in commissioning. In addition, it supports the planning process by transparently representing risks.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die produzierende Industrie leistet einen maßgeblichen Beitrag zur Produktivität und damit zum Erfolg von Volkswirtschaften (Manyika, J., S. vi; Bauernhansl, T., S. 8). Sie erwirtschaftet 15% (2017) des Bruttoweltproduktes und sogar 21% (2018) des Bruttoinlandsproduktes in Deutschland (The World Bank Group). Deutschland beteiligt sich im europäischen Vergleich mit einem Anteil von 35% (2018) an der Produktion von Maschinen und ist zugleich mit 11% (2017) an der weltweiten Maschinenproduktion beteiligt (VDMA, S. 32).

Unternehmen erfahren einen erhöhten Wettbewerbsdruck durch die Notwendigkeit, die Lieferzeiten zu reduzieren, gleichzeitig die Liefertreue zu erhöhen und die große Produktvielfalt bei schwer vorhersehbarer Marktvolatilität sicherzustellen (Wiendahl, H.-P. & Lutz, S., S. 573). Aus diesem Grund ist die kompetente Reaktionsfähigkeit auf wiederkehrende und unerwartete Ereignisse für den Erfolg einzelner Unternehmungen, aber auch für den gesamtwirtschaftlichen Erfolg, unerlässlich (Wiendahl, H.-P. & Lutz, S., S. 573; Bauernhansl, T. & Dombrowski, U., S. 39).

Dabei nimmt die Bedeutung des Sondermaschinenbaus und individueller Integrationslösungen stark zu. Abbildung 1-1 verdeutlicht, dass 74% (2014) der Unternehmen im Maschinenbau dieses Feld als führenden Trend im Maschinenbau bestätigen (VDMA-McKinsey, S. 40). Auch Gosling und Naim nennen den erhöhten Bedarf an Engineer-to-Order-Lösungen (ETO) aufgrund der steigenden Nachfrage an kundenindividuellen Produktlösungen als wichtigen Trend im Maschinenbau (Gosling, J. & Naim, M.M., S. 752).

Trends im Maschinenbau

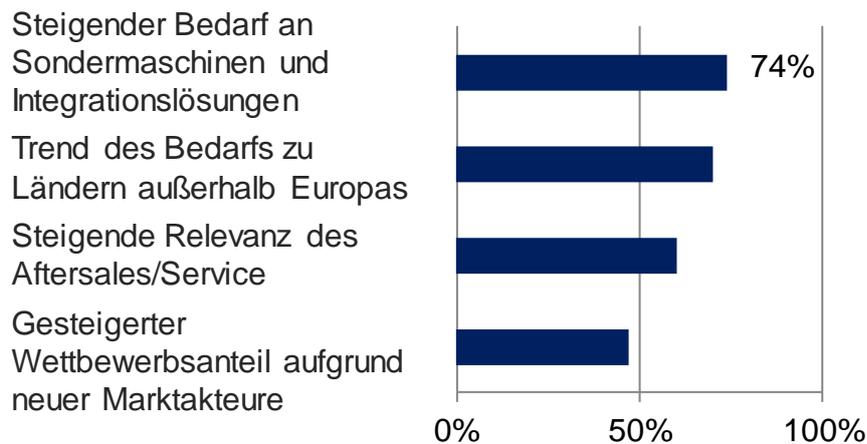


Abbildung 1-1: Trends im Maschinenbau (n=333) (VDMA-McKinsey, S. 40)

Bauernhansl und Dombrowski weisen darauf hin, dass besonders in volatilen Märkten eine reaktionsschnelle Anpassung der Produktion durch digitale Techniken und eine stärkere Vernetzung maßgebend für den Erfolg von Unternehmungen sind (Bauernhansl, T. & Dombrowski, U., S. 39). Ein klassisches Beispiel eines Produktentstehungsprozesses im Maschinenbau ist in Abbildung 1-2 dargestellt und von Wiendahl, Hegenscheidt und Winkler erforscht. Sie beschreiben diesen Prozess als Projekt, welches mit der Entwicklung bzw. Konstruktion beginnt und über die Fertigung bis hin zur Montage der Maschine reicht (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651).

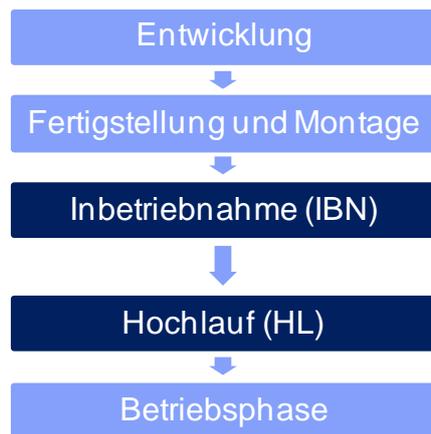


Abbildung 1-2: Produktentstehungsprozess im Sondermaschinenbau nach (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651)

Nach der Montage der Maschine kann die Inbetriebnahme durchgeführt werden und anschließend der Hochlauf erfolgen (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651). Der zeitliche Anteil der Inbetriebnahme im Produktentstehungsprozess ist seit einigen Jahren leicht angestiegen und beträgt in den meisten Fällen zwischen 10-25% der Projektdauer (Weck, M. & Assmann, S; Zäh, M.F. & Wünsch, G., S. 699; Wünsch, G., S. 1)



Abbildung 1-3: Aufgaben in der Inbetriebnahme und im Hochlauf nach (Wünsch, G., S. 14; Schuh, G. & Lenders, M., S. 311)

Das Aufgabenspektrum der Inbetriebnahme besteht vor allem aus der Kombination von Justage- und Prüfprozessen, die oftmals in Optimierungszyklen durchgeführt werden (Wünsch, G., S. 14; Schuh, G. & Lenders, M., S. 311).

Die Justage ist nach Hansen ein Prozess, bei welchem Bauelemente so bewegt werden, dass sie für die gewünschte Funktion des gesamten technischen Gebildes die notwendige Lage bekommen (Hansen, F.).

Abbildung 1-4 zeigt, dass der deutsche Maschinenbau einen hohen Anteil an individualisierten Maschinen hat. Mischformen sind ebenfalls häufig. Dabei teilt sich der Markt in Anbieter auf, die Komplettlösungen oder Einzelmaschinen und Komponenten herstellen. Ein großer Teil des deutschen Maschinenbaus konzentriert sich demnach auf nicht standardisierte Maschinen, welche zu einem großen Anteil Komplettlösungen sind. Damit entstehen Herausforderungen für die Inbetriebnahme.

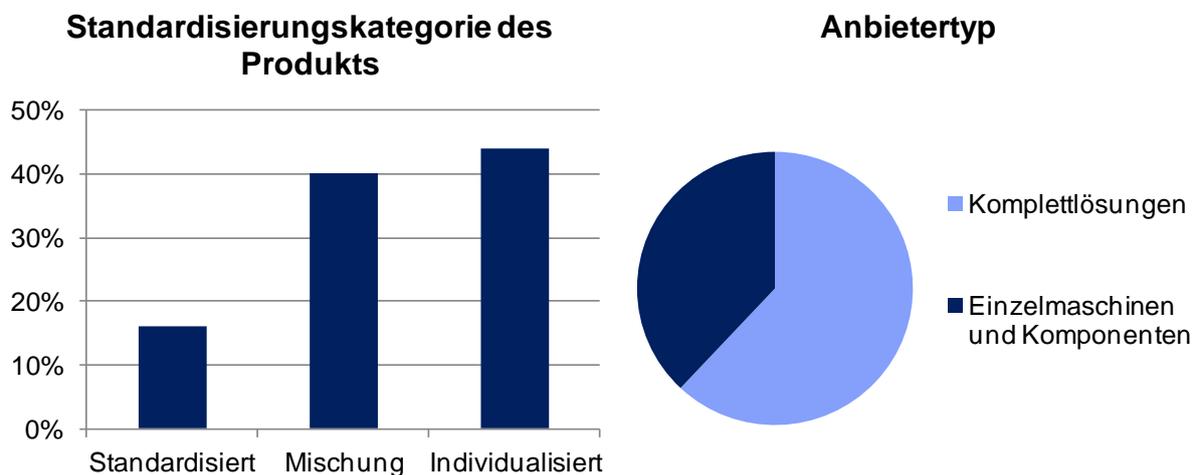


Abbildung 1-4: Verteilung der Unternehmen auf Anbietertyp und Standardisierungskategorie (n=333) (VDMA-McKinsey, S. 30)

Die zeitliche Zunahme des Inbetriebnahmeanteils am Produktentstehungsprozess und die steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten unterstreichen den Stellenwert der Inbetriebnahme in der gesamten Industrie. Zudem verdeutlichen Wiendahl, Hegenscheidt und Winker, dass eine Lücke zwischen der Entwicklung und den realisierten Produktionssystemen existiert (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 655). Als Teil der Produktion gilt diese Aussage auch für die Inbetriebnahme und den Hochlauf.

Der Maschinenbau ein weltweit entscheidender Wirtschaftsfaktor mit einer besonderen Stellung innerhalb der deutschen Industrie. Dabei spielt die Inbetriebnahme und der Hochlauf aufgrund des hohen zeitlichen Anteils eine maßgebende Rolle im Produktentstehungsprozess. Die Inbetriebnahme kann aufgrund fehlender Modelle nicht ausreichend aus dem Entwicklungs- und Konstruktionsprozess definiert werden.

1.2 Problemstellung

Im Kapitel Ausgangssituation wurde in Bezug auf die Inbetriebnahme im Maschinenbau auf eine methodische Forschungslücke in der Umsetzung der Produktion innerhalb industrieller Entwicklungsprozesse hingewiesen. Die nachfolgende Literaturrecherche über den Maschinenbau und verschiedene Prozessbeobachtungen verdeutlichen diese Problemstellung. Die Ergebnisse aus den Studien der Wirtschafts-förderung Region Stuttgart, des VDMA und der Unternehmensberatung McKinsey konkretisieren die Problemstellung. Nach diesen Studien sind vor allem die Standardisierung und Modularisierung von Produkten und ein risikosensibles Projektmanagement mögliche Handlungsfelder für die Entwicklung und Produktion von Maschinen (VDMA-McKinsey, S. 30). Wie von Wiendahl angemerkt, fehlen außerdem Übergangsprozesse zwischen der Entwicklung und der Realisierung des Produktionssystems

(Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 655). Als Problemfelder sind demnach die Adaption und Präzisierung von Spezifikationen des Produktes sowie in der Folge auch die Inbetriebnahme und die Hochlaufprozesse zu nennen.

Zudem nehmen die spezifischen Anforderungen der Kunden zu, wodurch die Tendenz zu komplizierteren Lösungen steigt (VDMA-McKinsey, S. 40). Dadurch wächst zugleich die Aufgabenteilung in den Bereichen Entwicklung und Produktion, was zur Folge hat, dass sich die Schnittstellen zwischen Prozessen, die sich auch gegenseitig beeinflussen können, ausweiten. Der menschliche Einfluss auf das Produkt ist in der Inbetriebnahme, bedingt durch die geringe Standardisierung und den damit einhergehenden geringen Automatisierungsgrad, im Vergleich zu Bauteilproduktionen hoch (WRS - Wirtschaftsförderung Region Stuttgart, S. 101).

Die wesentlichen Fehler im allgemeinen Produktentstehungsprozess sind nach VDI in der Konstruktions- und Entwicklungsphase zu erwarten, wohingegen die Fehlerbehebung in der Fertigung, Montage, Inbetriebnahme und im Hochlauf erfolgt .

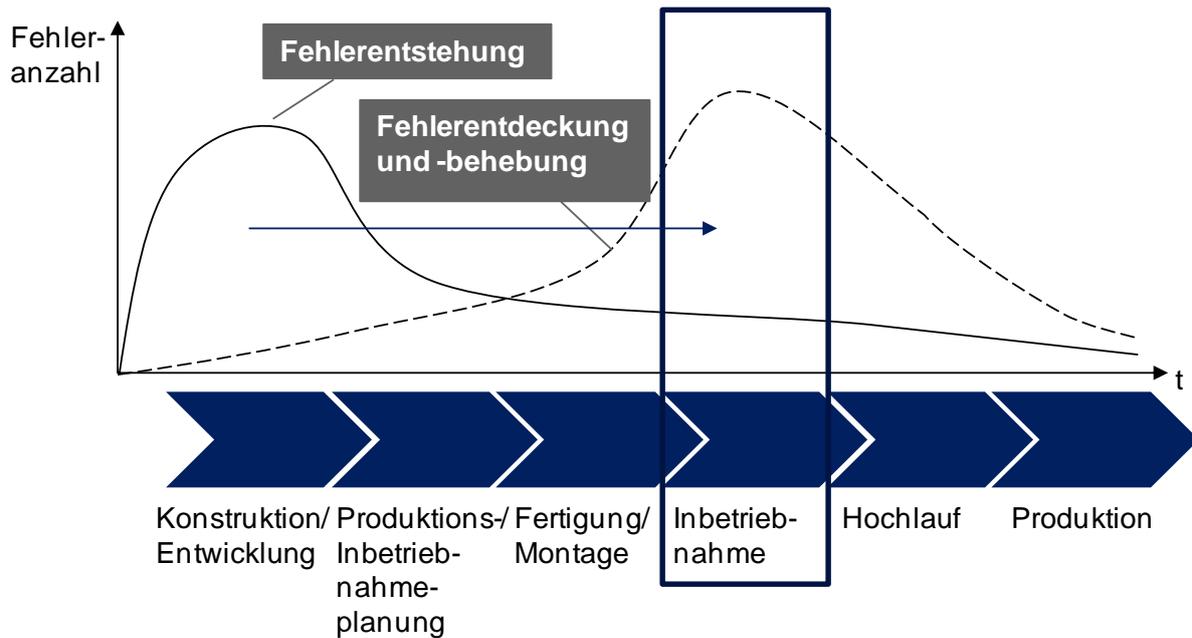


Abbildung 1-5: Fehlerentstehung und -behebung nach (VDI 1990)

Dadurch entsteht im Vergleich zur Fertigung und Montage ein hoher Engineeringaufwand in Inbetriebnahme- und Hochlaufprozessen. Dadurch sind diese Prozesse weniger effizient.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage

Die in der Problemstellung erörterte Effizienzmindering kann auf verschiedenen Ebenen erforscht werden. Eine Kategorisierung der möglichen Ebenen liefert Hinrichsen und nennt eine technische, eine organisatorische und eine personelle Ebene (vgl. Abbildung 1-6). Die Effizienzmindering von Inbetriebnahme- und Hochlaufprozessen wird aktuell nur mit einem erhöhten Personaleinsatz ausgeglichen. Das Ziel ist es, eine organisatorische und technische Lösung für die Effizienzmindering zu finden.

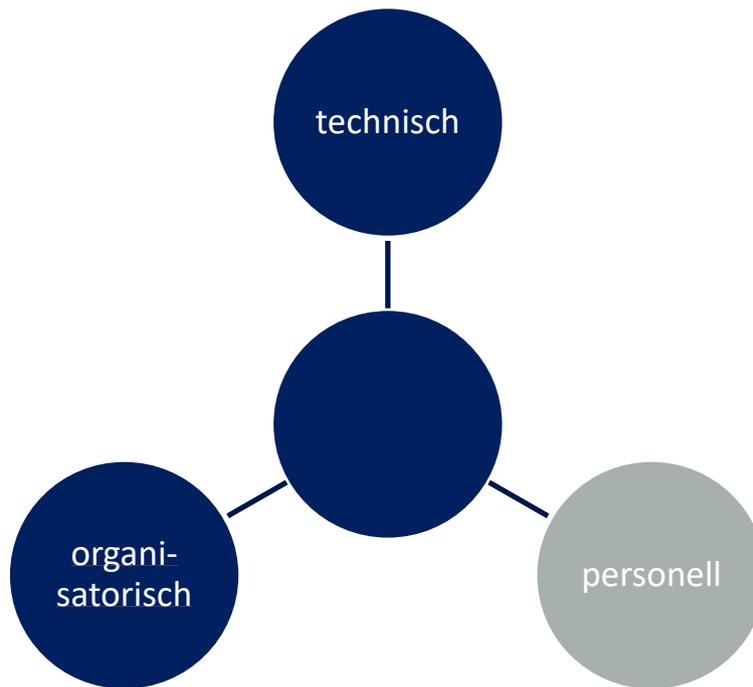


Abbildung 1-6: Einordnung der Zielsetzung auf technischer und organisatorischer Ebene (Hinrichsen, S., S. 22)

Im Gegensatz zur Serienproduktion wirkt sich die Effizienzminderung bei Hochlauf- und Inbetriebnahmeprozessen als Reduzierung der Prozessproduktivität aus. Daraus resultiert eine Erhöhung der Durchlaufzeit. Dies führt zu kurzfristigen Umplanungen, die auch Varianzen in nachfolgenden Prozessen erhöhen.

Zielsetzung:

Es soll ein Modell zur Gestaltung von anforderungsgerechten Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau entwickelt werden. Damit soll ein wissenschaftlicher Beitrag zur Steigerung der Prozessproduktivität, zur Verkürzung der Durchlaufzeit sowie zur Verringerung der Prozessvarianzen geleistet werden.

Ziel ist es, ein Prozessmodell zu entwickeln, das sich an existierende Ansätze zur Modellierung von Prozessen anlehnt. Der Anwendungsbereich dieser Forschung ist die Inbetriebnahme, wobei die Anforderungen der Inbetriebnahme in die Modellentwicklung einfließen müssen. Damit soll ein Beitrag zur Effizienzsteigerung in den Inbetriebnahmeprozessen des Maschinenbaus geleistet werden. Die erste Forschungsfrage beschäftigt sich mit den Gestaltungsanforderungen an das Modell.

Erste Forschungsfrage

Wie können justageintensive Inbetriebnahmeprozesse im Maschinenbau effizienter gestaltet werden?

Das Ergebnis der ersten Forschungsfrage soll ein konkreter Ansatz sein, bei dem alle relevanten Eigenschaften der Inbetriebnahme abgebildet und im Hinblick auf die Zielsetzung effizienter gestaltet werden. Um die Ausgangssituation modellieren zu können, muss eine strukturierte Analysemethodik entwickelt werden, da individuelle Inbetriebnahmeprozesse standardisiert ausgewertet werden müssen. Daraus folgt, dass der Kern der zweiten Forschungsfrage die Entwicklung dieser Analysemethode ist.

Zweite Forschungsfrage

Welche Methoden können den Inbetriebnahmeprozess und die dafür notwendigen Prozessplanungen unterstützen?

Zunächst wird die Prozessplanung im Maschinenbau analysiert, um anschließend unter Einsatz geeigneter Methoden ein Prozessmodell zu erstellen. In Abbildung 1-7 wird die Vorgehensweise zusammengefasst.

Die oben beschriebene Problemstellung bildet die Basis für die Erforschung dieses Problembereichs. Ausgehend von den Forschungsfragen soll ein Modell entwickelt werden, das die Zielsetzung erfüllt und den Inbetriebnahmeprozess begleitet.

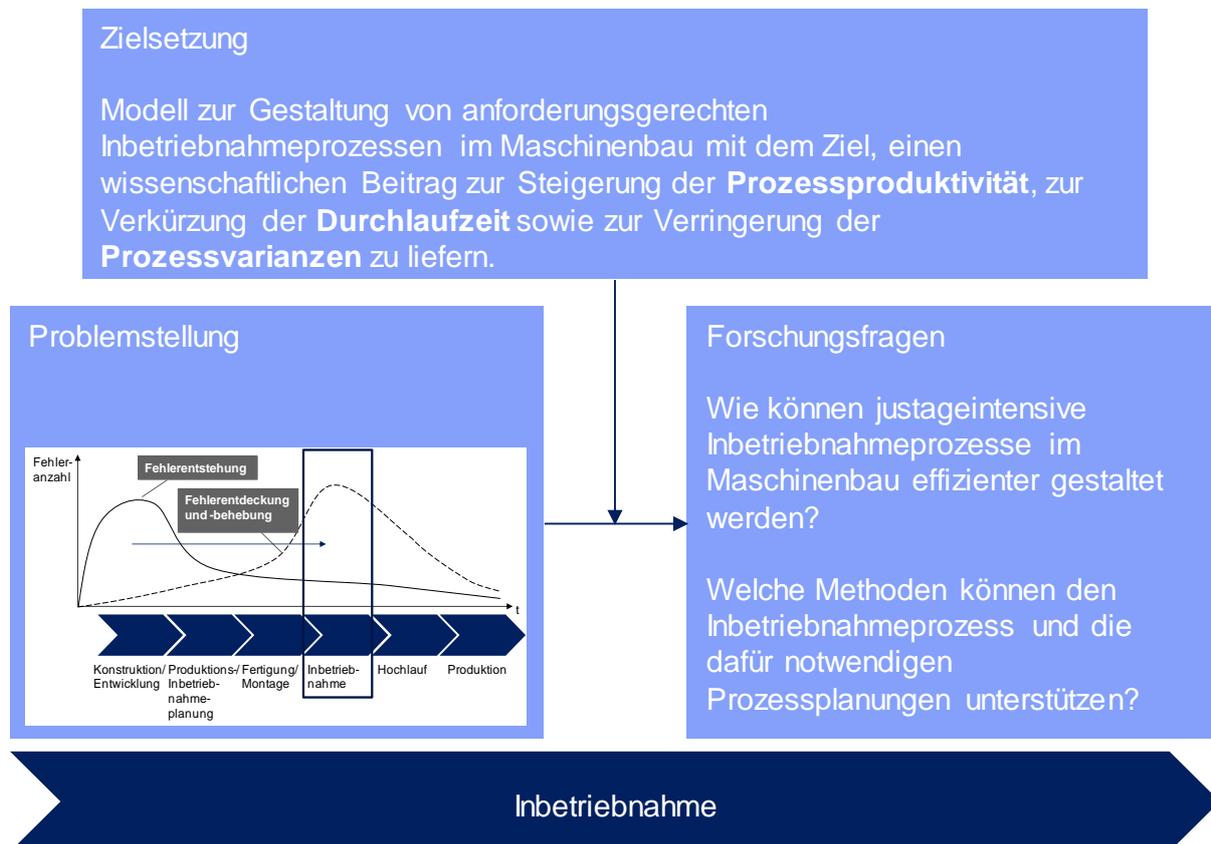


Abbildung 1-7: Forschungsvorgehen

1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung

Die Wissenschaftstheorie, die als Oberbegriff für verschiedene Disziplinen verwendet wird, ist nach Ulrich und Hill keine abgeschlossene Disziplin (Ulrich, P. & Hill, W., S. 305). Vielmehr zeichnet „sich wissenschaftliches Denken durch eine bewusste Bereitschaft zur ständigen, kritischen Überprüfung der Richtigkeit der getroffenen Aussagen“ (Ulrich, P. & Hill, W., S. 305) aus. Zusammenfassend ist Wissenschaft eine gesellschaftliche Erscheinung unter dem Einfluss der

jeweiligen soziokulturellen Zusammenhänge (Ulrich, P. & Hill, W., S. 305). Daraus resultieren Probleme hinsichtlich Subjektivität und Kommunikation, die sich jedoch unter der Berücksichtigung des Entdeckungszusammenhangs, des Begründungszusammenhangs und des Verwendungszusammenhangs lösen lassen (Ulrich, P. & Hill, W., S. 306). Im Folgenden sollen diese drei Aspekte adressiert und zuvor das Forschungsthema systematisch eingeordnet werden.

1.4.1 Systematische Einordnung

Ulrich und Hill teilen verschiedene Disziplinen in eine Wissenschaftssystematik ein (Ulrich, P. & Hill, W.). Auf erster Ebene können Formal- und Realwissenschaften unterschieden werden (Abbildung 1-8). Wobei sich Formalwissenschaften mit der Konstruktion von Zeichensystemen beschäftigen und von Philosophie und Mathematik repräsentiert werden. Realwissenschaften hingegen lassen sich in reine Grundlagenwissenschaften und angewandte Handlungswissenschaften aufteilen. Grundlagenwissenschaften erklären empirische Wirklichkeitsausschnitte und sind vor allem durch Naturwissenschaften vertreten. Handlungswissenschaften umfassen vor allem die Ingenieurs- und Sozialwissenschaften und haben die Analyse menschlicher Handlungsalternativen als Ziel. Die Disziplinen der Realwissenschaften beinhalten jedoch zugleich auch Zielkomponenten der Grundlagen- bzw. Handlungswissenschaften in unterschiedlich starken Ausprägungen. (Ulrich, P. & Hill, W., S. 305)

Als Aufgabe von Grundlagenwissenschaften beschreibt Sandig et al. die Erklärung von beobachteten Zuständen und Ereignissen durch Rückführung der Beobachtungen in allgemeine Hypothesen (Sandig, C., Geist, M.N. & Köhler, R., S. 3). Realwissenschaften hingegen beschreiben und erklären durch die Sinne wahrgenommene Wirklichkeits-

ausschnitte (Ulrich, P. & Hill, W., S. 305). Popper beschreibt dies als Erkenntnistheorie des Alltagsverstandes, welche besagt, dass alle von Menschen generierten Erkenntnisse über Sinne wahrgenommen werden (Popper, K.R., S. 15).

Diese Arbeit ist in den Handlungswissenschaften verankert und nutzt die Formalwissenschaften für den Aufbau eines Modells mithilfe von Bayesischen Netzen. Da jedoch der grundlegende Forschungsinhalt dieser Arbeit nicht in der Weiterentwicklung Bayescher Netze liegt, sondern den aktuellen Stand der Forschung in der Modellbildung widerspiegelt, bilden die Handlungswissenschaften den Bezugsrahmen der wissenschaftstheoretischen Methodik.

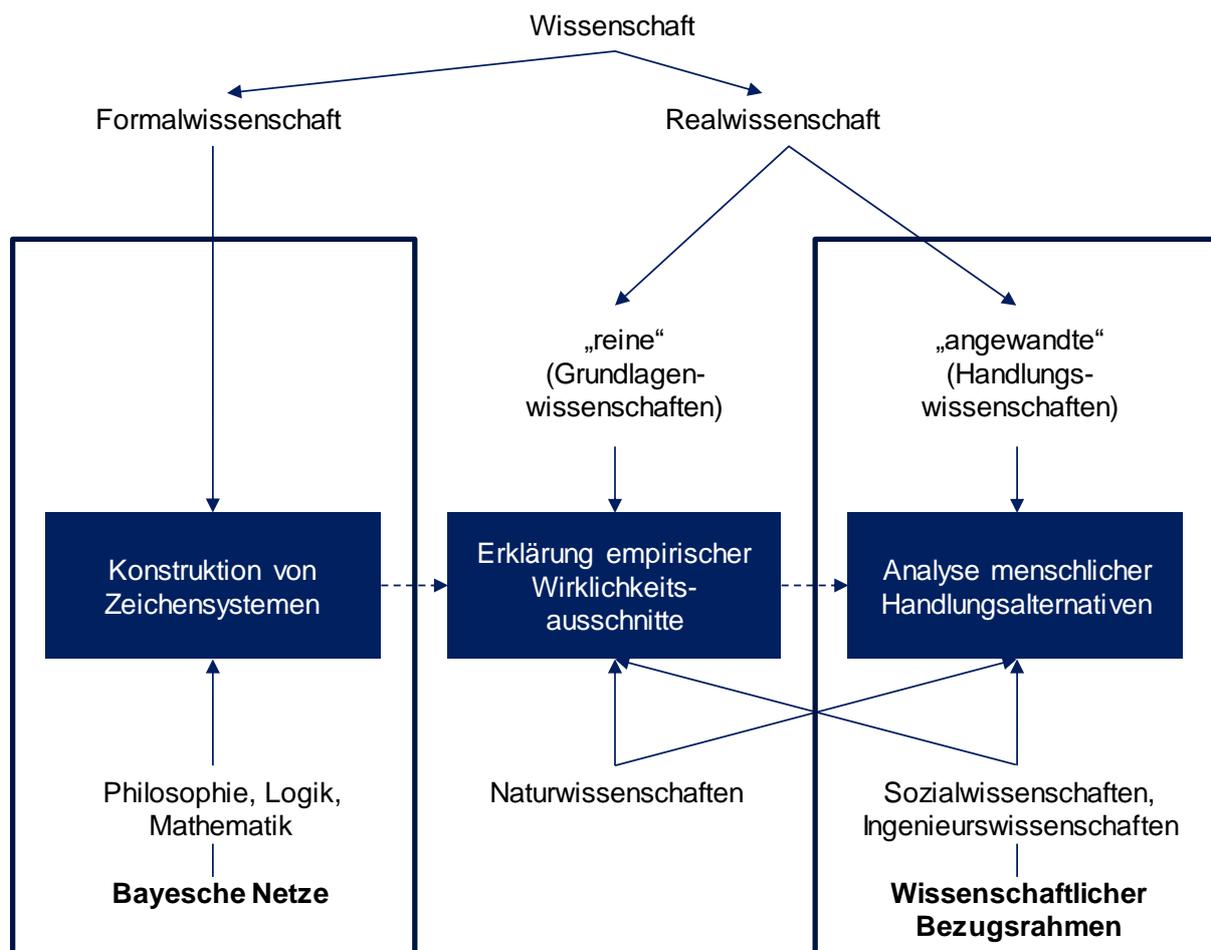


Abbildung 1-8: Wissenschaftssystematik (Ulrich, P. & Hill, W., S. 305)

Aufgrund der geringen Forschungsdurchdringung der Inbetriebnahme in Bezug auf Prozessplanungsmodelle basiert die Arbeit auf grundlegenden Forschungsarbeiten zur Prozessplanung und deren Analysemethoden. Basierend auf der kritischen Pfad-Planung in Prozesslandschaften von Kelley und Walker (Kelley, J.E. & Walker, M.R., S. 160) wurden Ansätze zur Planung von Aufträgen in Werkstattfertigungen, wie zum Beispiel der von Suwa und Sandoh, entwickelt (Suwa, H. & Sandoh, H.). Weil die Risikobewertung und die subjektiven Einflüsse von Experten in diesen Ansätzen fehlen, (Kiritsis, D., S. 259; Newman, S.T. *et al.*, S. 470) können die Risikobewertungen nach Kempf eingesetzt werden (Kempf, M. & Wahl, V; Kempf, M.).

1.4.2 Entdeckungszusammenhang

Der Entdeckungszusammenhang wird von Ulrich und Hill als die Bedingung definiert, unter welcher die Wissenschaftler zu erfolgreichen theoretischen Konzeptionen kommen (Ulrich, P. & Hill, W., S. 306). Sie beschreiben einen heuristischen Prozess, der, geprägt durch erfahrungsgestütztes Lernen, einen Bezugsrahmen ermöglicht (Ulrich, P. & Hill, W., S. 306; Kubicek, H., S. 28). Dementsprechend sind Erkenntnisse einem Zweckmäßigkeitkriterium zu unterwerfen (Ulrich, P. & Hill, W., S. 306).

Ulrich und Hill unterscheiden dabei drei Bezugsrahmen, den faktortheoretischen Ansatz nach Gutenberg (Gutenberg, E.), den systemtheoretischen Ansatz nach Ulrich (Ulrich, H.) und den entscheidungstheoretischer Forschungsansatz nach Heinen (Heinen, E.). Der faktortheoretische Ansatz ist ein für die quantitative Modellanalyse entwickelter Ansatz und lässt deswegen qualitative Aspekte außen vor. Dahingegen verfolgt der systemtheoretische Ansatz einen interdisziplinären Ansatz, „der alle Gestaltungs- und Führungsprobleme von

produktiven sozialen Systemen“ (Ulrich, P. & Hill, W., S. 308) betrachtet. Diese Aspekte greift der entscheidungstheoretische Ansatz auf, konzentriert sich aber vor allem auf deskriptive, praktisch-normative Entscheidungsprozesse. (Ulrich, P. & Hill, W., S. 308f)

Der gewählte Bezugsrahmen ist der systemtheoretische Ansatz nach Ulrich. Zwar werden in dem vorgestellten Modell, das auf den faktortheoretischen Ansatz hindeutet, rein mathematisch Entscheidungen ermittelt, aber das Modell selbst wird mit Expertenmeinungen gespeist und soll erlauben, praktische Situationen zu bewerten. Unterstützt wird diese Einordnung durch den Beitrag von Kubicek, der die empirische Forschung als Lernprozess charakterisiert und dessen heuristischen Bezugsrahmen erläutert (Kubicek, H., S. 28).

1.4.3 Begründungszusammenhang

Im Begründungszusammenhang soll mit methodischem Vorgehen der Bezugsrahmen überprüft und somit eine allgemeingültige Aussage bestätigt werden. (Ulrich, P. & Hill, W., S. 306). Ulrich und Hill präzisieren diese Aussage mit der Frage: „Unter welchen Bedingungen können singuläre Beobachtungen überprüft und verallgemeinert werden?“ (Ulrich, P. & Hill, W., S. 306) Die Frage zielt auf das Induktionsproblem, welches von Popper beantwortet wird. Der Kern des Induktionsproblems ist nach Popper die Aussage: „Es gibt keine Induktion durch Wiederholung.“ (Popper, K.R., S. 19) Somit stellt sich die Frage nach einer Möglichkeit der Bestätigung einer wissenschaftlichen Theorie.

Popper unterscheidet zunächst zwischen der empirischen Wissenschaft und anderen Aussagen und bezeichnet die Unterscheidung als Abgrenzungsproblem (Popper, K.R., S. 24). Die Lösung des Abgrenzungsproblems ist, dass es endlich viele Konjunktionen singulärer empirischer Aussagen geben muss, die einer empirischen Aussage

widersprechen (Popper, K.R., S. 24). Dementsprechend muss eine wissenschaftliche Aussage falsifizierbar sein und ist solange gültig, bis sie widerlegt wird (Popper, K.R., S. 26). Weiterhin kann gesagt werden, dass eine Theorie einer anderen vorzuziehen ist, wenn diese öfter bestätigt wurde (Popper, K.R., S. 26 f).

Zusammenfassend ist der Forschungsprozess ein iterativer Lernprozess, der als Ziel die Gewinnung von neuem Erfahrungswissen hat (Kubicek, H., S. 29). Die Annahme, dass neue, deduktiv erarbeitete Theorien bis zur Falsifikation Gültigkeit besitzen, ermöglicht somit einen effizienten Fortschritt wissenschaftlicher Erkenntnisse (Popper, K.R., S. 33 ff; Kubicek, H., S. 29).

1.4.4 Verwendungszusammenhang

„Der Verwendungszusammenhang ist die Frage nach dem Zweck oder der Verwendung wissenschaftlicher Aussagen.“ (Ulrich, P. & Hill, W., S. 306) Damit wird ein Problem umso wichtiger je größer der Einfluss des Problems ist und muss deshalb dem gesellschaftlichen Nutzenkriterium unterstellt sein (Ulrich, P. & Hill, W., S. 306 f).

Das in dieser Abhandlung verwendete Modell (vgl. Abbildung 1-9) soll eine Problemstellung in der Inbetriebnahme im Maschinenbau lösen. Wie in der Einleitung beschrieben, ist die produzierende Wirtschaft zu einem maßgeblichen Anteil am Erfolg von Volkswirtschaften beteiligt (Manyika, J., S. vi; Bauernhansl, T., S. 8). Der Maschinenbau ist besonders auch in Deutschland ein treibender Faktor der produzierenden Industrie (VDMA-McKinsey, S. 9).

Die entscheidende Phase des Maschinenbaus vor der Betriebsphase einer Maschine ist die Inbetriebnahme. Sie nimmt 7-25 % der Projektdauer ein (Sossenheimer, K., S. 3; Zäh, M.F. & Wunsch, G., S. 1). Nach Wunsch et al. erweist sich die Inbetriebnahme als ein wesentlicher Optimierungsfokus des Maschinenbaus (Zäh, M.F. et al., S. 595).

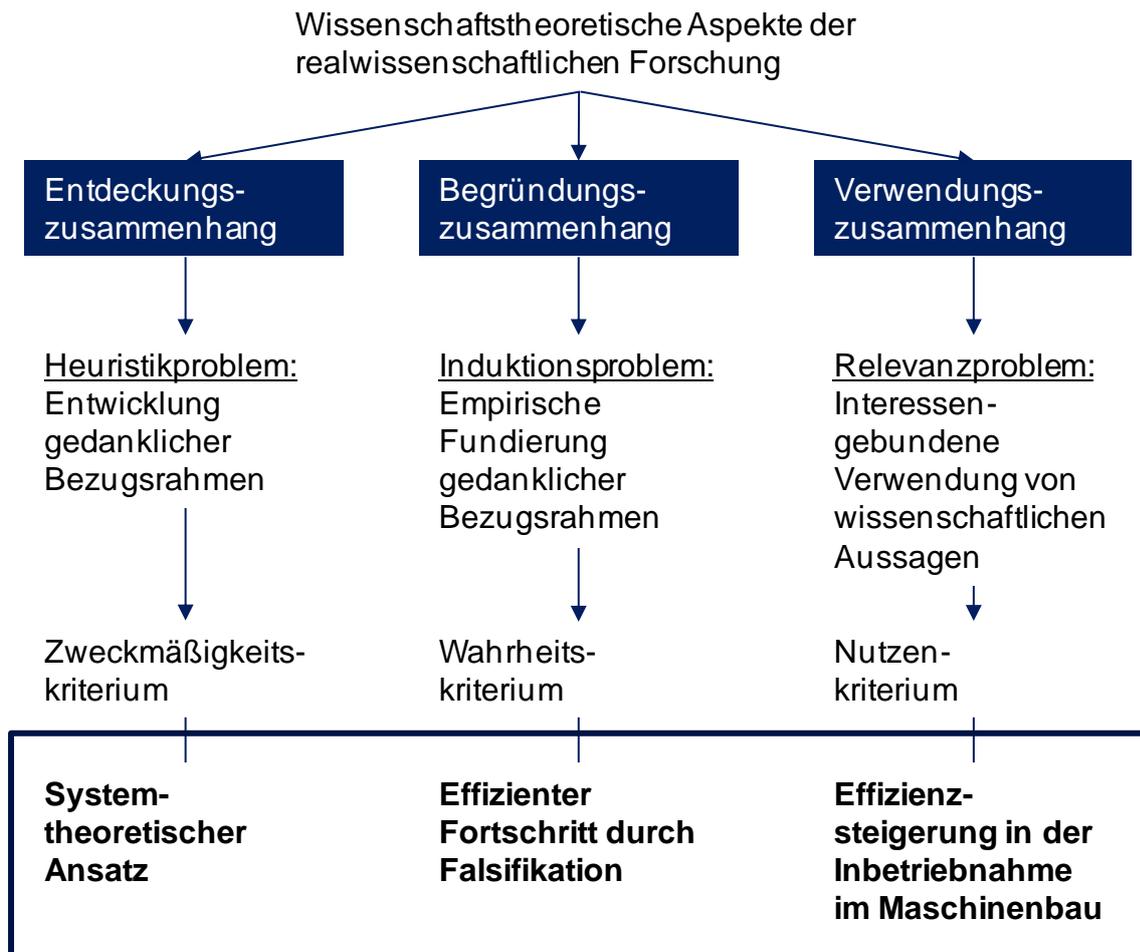


Abbildung 1-9: Wissenschaftliche Grundprobleme der Betriebswirtschaftslehre (Ulrich, P. & Hill, W., S. 307)

1.4.5 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich am Strukturierungsmodell für die angewandte Wissenschaft im Theorie- und Praxisbezug nach Ulrich (vgl. Abbildung 1-10). Zuerst werden die praxisrelevanten Probleme analysiert und mit problemrelevanten Theorien und Hypothesen der empirischen Grundlagenwissenschaften abgeglichen. Über die problemrelevanten Verfahren der Formalwissenschaften wird die Brücke zur Erforschung eines generischen Prozessmodells geschlagen, in welches der relevante Anwendungszusammenhang einfließt.

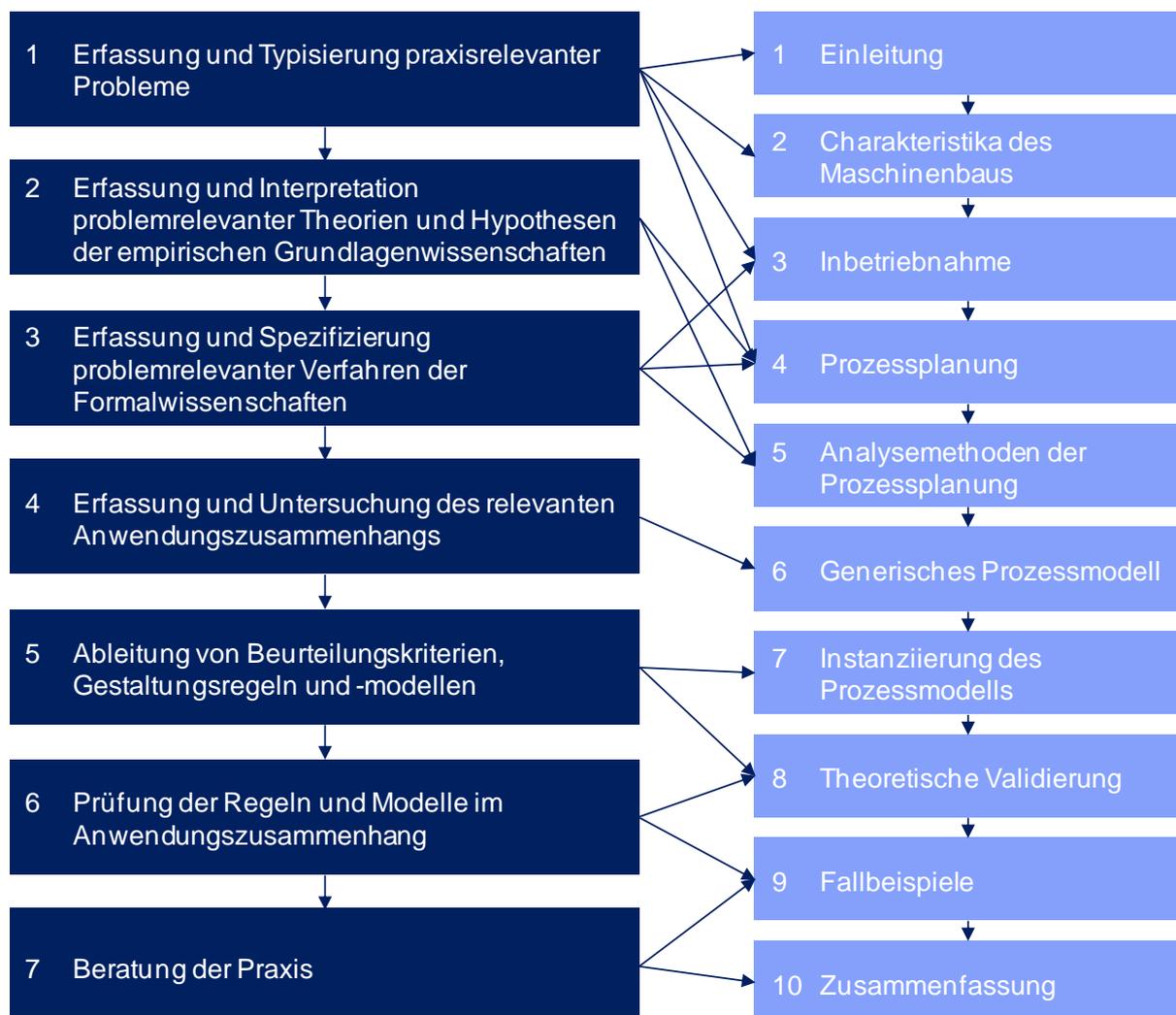


Abbildung 1-10: Angewandte Wissenschaft im Theorie- und Praxisbezug (nach Ulrich, H., S. 195)

Das generische Prozessmodell wird im Anschluss instanziiert und im Maschinenbau in Form von Beurteilungskriterien sowie einem Gestaltungsmodell angewandt. Aufgrund des breiten Anwendungsgebiets im Maschinenbau, wird das Modell im Anwendungszusammenhang zuerst theoretisch validiert und danach in Fallbeispielen reflektiert. Abschließend erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse mit einem Ausblick auf weitere Forschungsansätze.

Die Zielsetzung der Arbeit lässt sich in neun Teilziele unterteilen, die in Abbildung 1-11 mit dem jeweiligen Kapiteln verknüpft sind. Die *Einleitung* definiert die Problemstellung und die Forschungsfrage. Daraus abgeleitet werden der Maschinenbau und die Inbetriebnahme in den nächsten Kapiteln als Betrachtungsbereich von anderen Bereichen abgegrenzt.

Die Kapitel *Prozessplanung* und *Analysemethoden der Prozessplanung* beschäftigen sich mit der wissenschaftlichen Ableitung von Gestaltungs- und Analysemethoden. Anschließend zielt das Kapitel *Generisches Prozessmodell* auf die Modellierung der Problemstellung. Dieses Modell instanziiert das folgende Kapitel auf den oben ausgewählten Betrachtungsbereich. Aufgrund des großen Anwendungsbereichs muss ein theoretisches Konstrukt zur Reduzierung der Fallbeispiele gefunden werden. Um dem Praxiseinsatz des entwickelten Modells zu validieren, findet im neunten Kapitel die Anwendung des Modells statt. Diese ermöglicht im Kapitel *Zusammenfassung* einen Abgleich der Ziele mit dem entwickelten Modell.

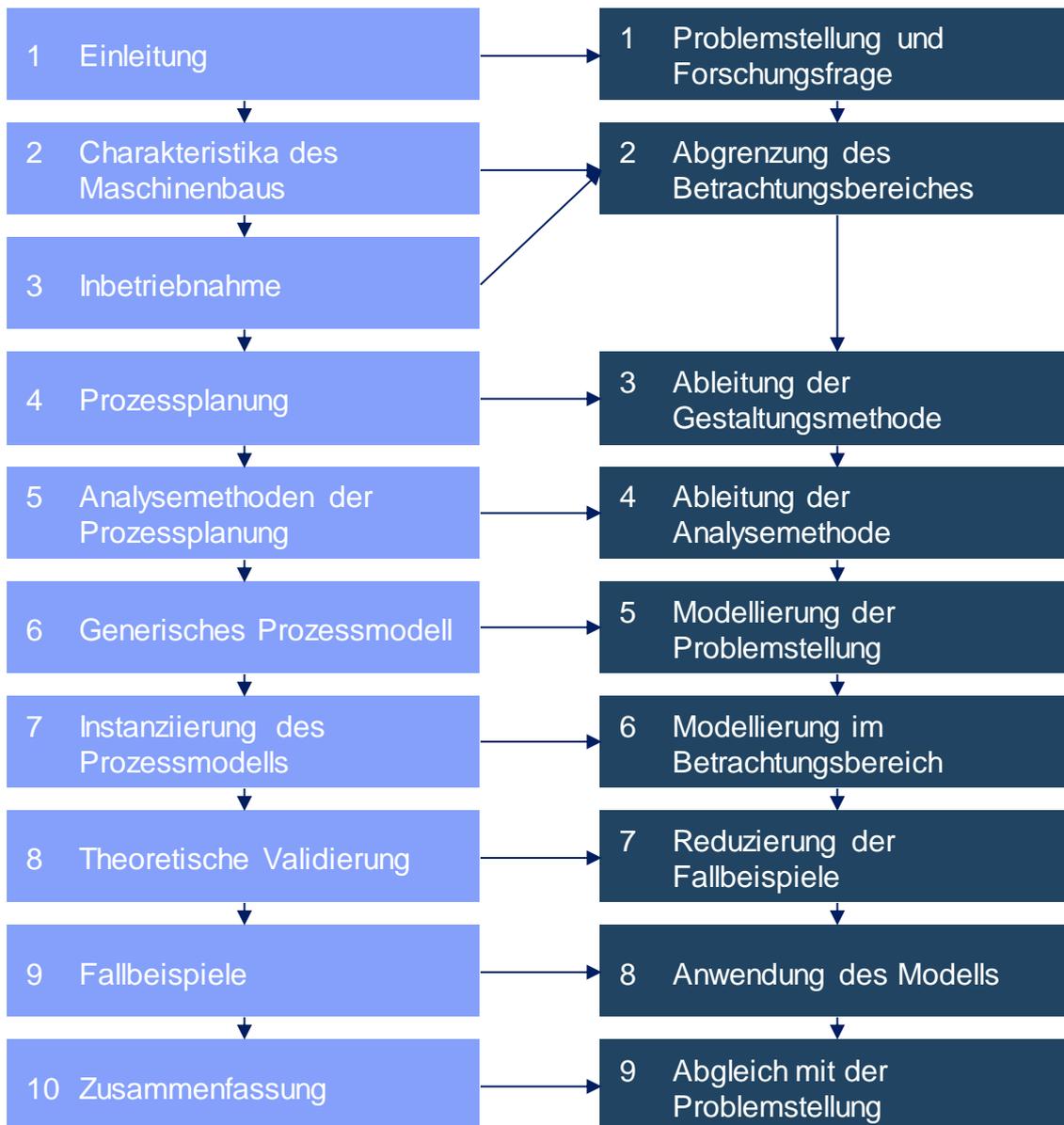


Abbildung 1-11: Verknüpfung der Kapitel mit den Teilzielen

2 Charakteristika des Maschinenbaus

Die Investitionsgüterindustrie ist einer der wichtigsten Industriezweige der volkswirtschaftlichen Wertschöpfung. Sie umfasst unter anderem den Stahlbau, den Maschinenbau, den Automobilbau und die Elektrotechnik (Lay, G.). Vor allem Deutschland zeichnet sich durch eine der konkurrenzfähigsten Industrien aus und ist in dieser Rolle führender Fabrikausrüster (Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J., S. 5).

Nachfolgend sollen die Bedeutung und die Struktur der Branche Maschinenbau analysiert werden. Es werden Querschnittsfunktionen wie der Sondermaschinenbau, der Serienanlauf und die Serie im Maschinebau einzeln untersucht und verglichen. Für das Verständnis der Branche ist der Produktentstehungsprozess, aufgrund des in der Problemstellung erläuterten Schwerpunktes für Fehlerentstehungen, von entscheidender Bedeutung.

2.1 Bedeutung und Struktur der Branche Maschinenbau

Der deutsche Maschinenbau nimmt einen Anteil von 11 % (2017) der weltweiten Maschinenproduktion ein, welcher sich im Jahr 2018 auf über 297 Mrd. € beläuft. Dabei sind Unternehmen im Maschinenbau im Jahr 2018 ungefähr 2,8 % gewachsen und haben eine durchschnittliche Rentabilität von 6 %. Allein in Deutschland beschäftigt der Maschinenbau ungefähr eine Millionen Menschen in 6400 Unternehmen. Davon sind ungefähr 10 % global agierende Unternehmen, 60 % Exporteure und 30 % im Inland aktiv. Die Mehrheit der Unternehmen ist im Premium-Segment vertreten und ungefähr die Hälfte davon ist familiengeführt. (VDMA-McKinsey, S. 6 f; VDMA, S. 32)

Für die Abgrenzung des Maschinenbaus zu anderen Industriezweigen ist es wichtig, als Unterscheidungsmerkmal den Begriff der Maschine zu

definieren. Das Deutsche Institut für Normung definiert den Maschinenbau als die „Gesamtheit von miteinander verbundenen Teilen oder Baugruppen, von denen mindestens [ein Teil oder eine Baugruppe] beweglich ist [...]“ (5) Zudem ist in der DIN EN ISO 12100-1 ausgeführt, dass der Begriff Maschine auch für Maschinenanlagen gilt, die als einheitliches Ganzes funktionieren (5).

Nach Hüttmann hat der Maschinenbau die Eigenschaft, mit dem Einsatz seines Produktes, der Maschine, weitere Produkte produzieren zu können. Damit ist eine eindeutige Eingruppierung in die Investitionsgüterindustrie belegbar (Hüttmann, A., S. 9). Weitere typische Felder der Investitionsgüterindustrie sind nach Lay der Stahlbau, der Straßenfahrzeugbau und die Elektrotechnik (Lay, G., S. 147). Der VDMA gliedert den Maschinenbau in 28 Fachverbände, die die einzelnen Branchen vertreten (VDMA). Weiter können die Branchen des Maschinenbaus zum Beispiel in Produktionsarten unterteilt werden.

Die Produktionsarten lassen sich in Einmal-, Wiederhol-, Varianten-, Serien- und Massenproduktionen untergliedern. In Abbildung 2-1 werden die Produktionsarten in die Kategorien Variantenvielfalt, Produktivität, Flexibilität und Stückzahl eingeordnet. Die Inbetriebnahme ist nach Eversheim vornehmlich in der Einmal- und Wiederholproduktion anzusiedeln (Eversheim, W., S. 1; Kinkel, S. & Som, O., S. 572).

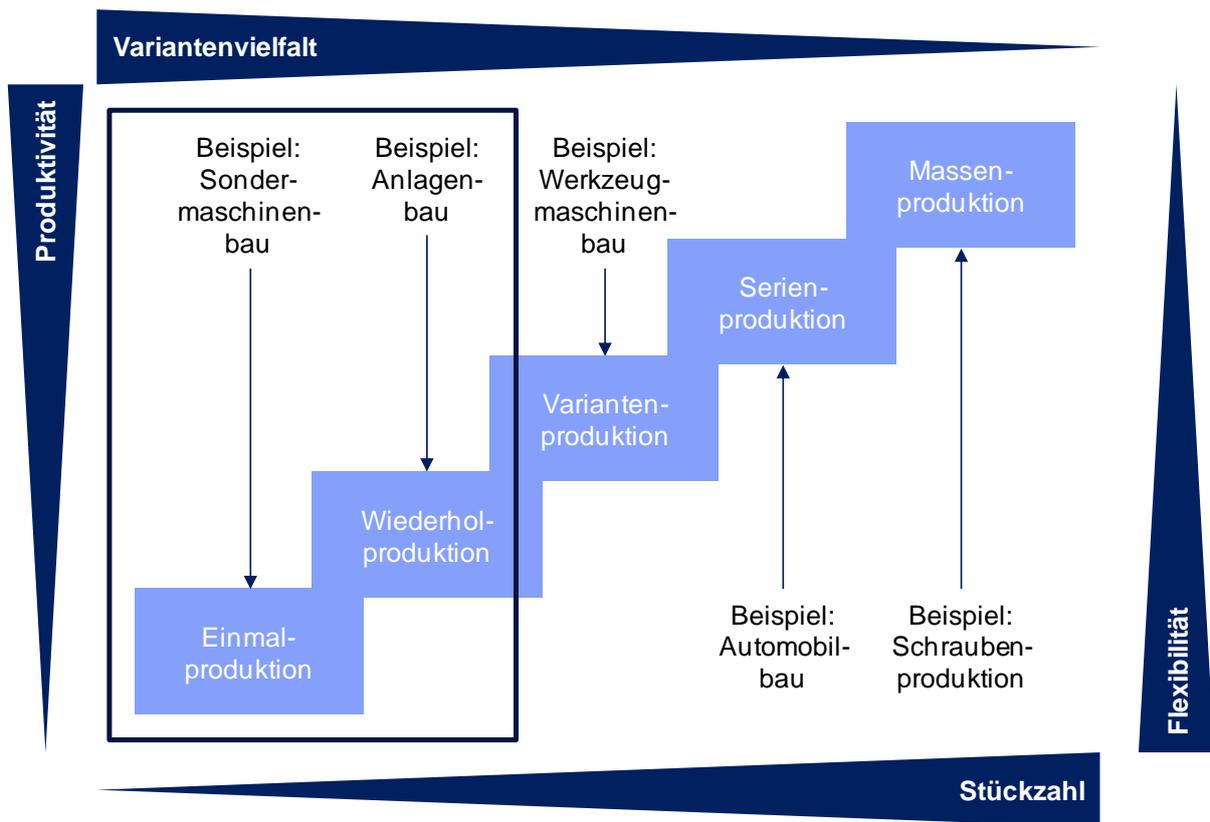


Abbildung 2-1: Einordnung unterschiedlicher Produktionsarten (Bauernhansl, T., S. 131)

Nach Bauernhansl ist die Einmal- und Wiederholproduktion durch eine hohe Variantenvielfalt und eine geringe Stückzahl gekennzeichnet. Die Produktionskennzahlen weisen eine im Vergleich zur Serien- und Massenproduktion verringerte Produktivität, mit gleichzeitig höherer Flexibilität auf. Als Beispiel kann für die Einmalproduktion der Sondermaschinenbau und für die Wiederholproduktion der Anlagenbau genannt werden. (Bauernhansl, T., S. 131)

Auch Kinkel und Som bestätigen, dass speziell der deutsche Maschinenbau stark auf kundenindividuelle Wünsche ausgerichtet ist (Kinkel, S. & Som, O., S. 572). Weiterhin verdeutlichen sie das Erfordernis von unterstützenden technischen und organisatorischen Konzepten im Produktentstehungsprozess. Damit ist es möglich, die vorhandenen

Innovationsressourcen effektiv und effizient zu nutzen (Kinkel, S. & Som, O., S. 572).

Aufgrund des hohen Zeitanteils der Inbetriebnahme in Einmal- und Wiederholproduktionen werden diese in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich beschrieben. Gleichwohl wird auch in der Varianten- und Serienproduktion die Inbetriebnahme durchgeführt. Deshalb wird in Kapitel 3 die Inbetriebnahme im Allgemeinen untersucht und die Herausforderungen dieses Prozesses beschrieben.

2.2 Die Querschnittsfunktion Sondermaschinenbau

Der Sondermaschinenbau wird nach Rocek, Schilke und Schloter selten definiert, sondern hauptsächlich durch die Nennung von Praxisbeispielen oder Eigenschaften beschrieben (Rocek, V; Schloter, W; Schilke, M.). Meier geht einen Schritt weiter und stellt fest, dass es keine allgemeingültige Definition des Begriffs Sondermaschinenbau gibt (Meier, G., S. 14).

Auszeichnende Eigenschaften des Sondermaschinenbaus sind die speziellen, technologisch anspruchsvollen Aufgabenstellungen und die Sonderanfertigungen für einzelne Kunden (Schloter, W., S. 5). „In der Regel entwickeln Sondermaschinenbauer grundlegende Verfahren zur Lösung eines technischen Detailproblems und verbauen diese Technologie als Kerntechnologie in ihren Anlagen und Maschinen [...].“ (Schloter, W., S. 5).

Das Ergebnis ist, dass Sondermaschinenbauer Unikate produzieren und in Ausnahmefällen sehr kleine Stückzahlen dieser Maschinen herstellen (Schloter, W., S. 6). Possel-Dölken beschreibt weiterhin einen hohen Personalaufwand aufgrund der geringen Automatisierbarkeit im Unikatumfeld (Possel-Dölken, F., S. 358).

Der Sondermaschinenbau lässt sich laut Schilke den auftragsorientierten Unternehmen zuordnen. Für Unternehmen im Sondermaschinenbau ist die Produktentwicklung damit Teil der Auftragsabwicklung. Weiterhin ist aufgrund der starken Kundenfixierung, selbst während der Produktion der Maschine, ein großer Änderungseinfluss gegeben. Der Aufwand, diese Änderungen in die bestehende Produktion zu integrieren, stellt auch wegen des hohen Anteils fremdbeschaffter Teile eine weitere Herausforderung dar. (Schilke, M., S. 81)

Auch Gosling und Naim bestätigen, dass im Sondermaschinenbau die Entwicklung Teil der Auftragsabwicklung ist und beschreiben das Prinzip Engineer-to-Order (ETO) (Gosling, J. & Naim, M.M., S. 752). Ebenso nennen sie die Supply-Chain als kritischen Faktor, da oftmals auch diese nach dem ETO-Prinzip arbeiten muss (Gosling, J. & Naim, M.M., S. 752).

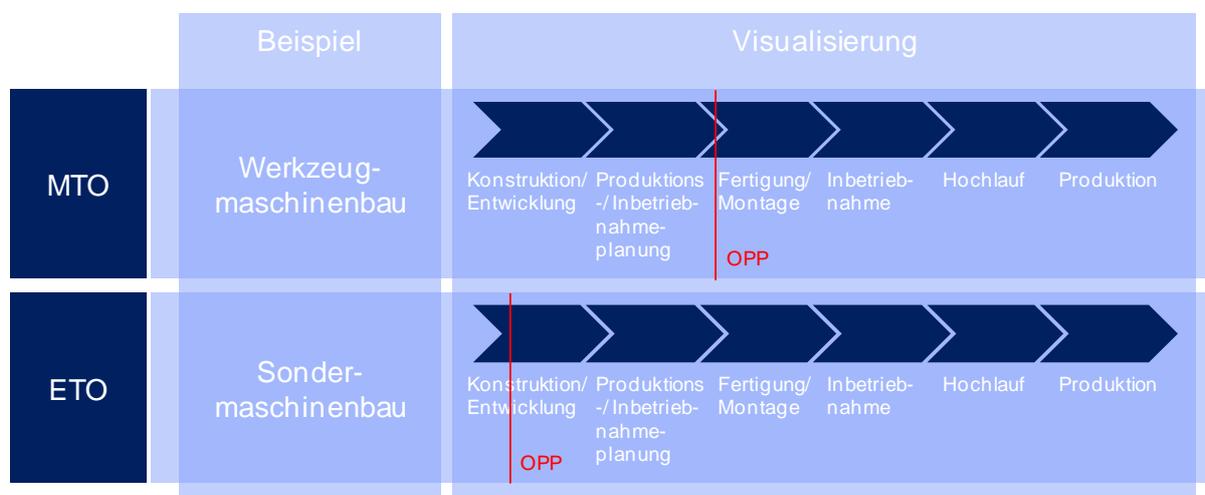


Abbildung 2-2: Vergleich des Order Penetration Points (OPP) im Engineer-to-Order (ETO) zum Make-to-Order (MTO) (Gosling, J. & Naim, M.M., S. 752)

Die Entwicklungs- und Planungsmethoden sind nach Gosling und Naim stark fallbasiert. Auch die weiteren methodischen Forschungen sind vornehmlich konzeptuell und nicht anwendungsorientiert. Als wesentlicher Grund hierfür lässt sich die geringe Simulierbarkeit nennen, weshalb Prüfungen in der Praxis notwendig sind (Gosling, J. & Naim, M.M., S. 752).

Weiterhin betrachten Gosling und Naim die Erforschung zum Lean Vorgehensmodell sowie zu agilen Theorien in der ETO-Produktion als wenig wissenschaftlich. Jedoch merken Bertrand und Muntslag an, dass es unter den Firmen, die im ETO-Prinzip produzieren, erhebliche Unterschiede gibt. Als Unterscheidungsfaktoren nennen sie den Anteil des Kundeneinflusses, das Produktionslayout und die Marktcharakteristiken (Bertrand, J.W.M. & Muntslag, D.R., S. 4; Gosling, J. & Naim, M.M., S. 752).

Pöschl, Helbig, Jacobi und Bauernhansl fassen diese Definitionsansätze zusammen und definieren den Sondermaschinenbau folgendermaßen:

„Als Sondermaschinenbau wird eine Querschnittsfunktion des Maschinenbaus bezeichnet, in welcher Erzeugnisse nach Kundenspezifikation hergestellt werden. Das dabei verwendete Fertigungskonzept ist Engineer-to-Order mit einem für jede Sondermaschine individuell angepassten Produktionsprozess.“ (Poeschl, S. *et al.*, S. 853)

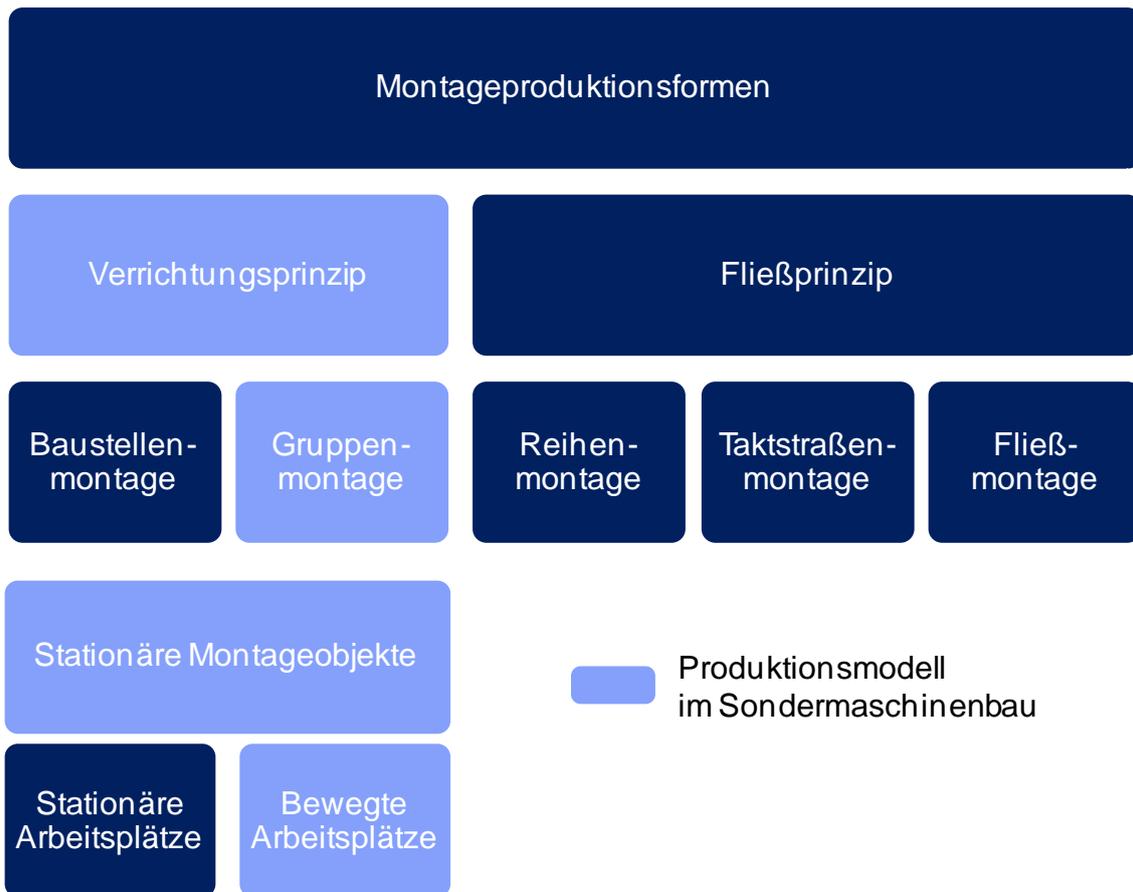


Abbildung 2-3: Produktionsmodell der Montage im Sondermaschinenbau nach (Schuh, G., S. 18; Lotter, B. & Wiendahl, H.-P., S. 147)

Zur Beschreibung dieser Querschnittsfunktion lässt sich ein häufig angewendetes Produktionsmodell nach Schuh, Lotter und Wiendahl heranziehen (vgl. Abbildung 2-3). Im Sondermaschinenbau wird hauptsächlich im Verrichtungsprinzip in Gruppen montiert. Dabei sind die Montageobjekte meist stationär und die Arbeitsplätze werden bewegt (Schuh, G., S. 18; Lotter, B. & Wiendahl, H.-P., S. 147).

2.3 Vergleichbarkeit zum Serienanlauf und zur Wiederholproduktion

In diesem Kapitel werden der Serienanlauf und die Serienproduktion von Maschinen mit dem Sondermaschinenbau verglichen. Der Serienanlauf ist mit Charakteristika der Serienproduktion, sowie des Sondermaschinenbaus beschreibbar. Die Unterscheidung der Produktion von Maschinen zu der Produktion von Konsumgütern grenzt den Maschinenbau von anderen Produktionen ab. Die hier betrachteten Serienproduktionen orientieren sich alle an den oben genannten Kriterien und haben als Endprodukt eine Maschine, welche entweder weitere Maschinen oder ein Konsumprodukt herstellt.

Der Sondermaschinenbau und der Serienmaschinenbau sind Maximalausprägungen von Produktionsprozessen (Poeschl, S. *et al.*, S. 851). In der Praxis hingegen sind Produkte Mischformen der beiden Ausprägungen und können nicht eindeutig einer Kategorie zugeordnet werden (Poeschl, S. *et al.*, S. 851).

Tabelle 2-1 zeigt die Einordnung eines beispielhaften, programmgebundenen Unternehmens im Ramp-up (Anlauf) zwischen einem auftragsorientierten Unternehmen und einem programmgebundenen Unternehmen. Eversheim hat erstmals 1996 Vergleichskategorien eingeführt, welche von Schares, Possel-Dölken und Schilke wieder aufgenommen wurden. Pöschl et al. haben 2016 das Beispiel eines programmgebundenen Unternehmens mit den beiden Maximalausprägungen verglichen. Dabei kommen sie zum Schluss, dass der Übergang zwischen programmgebundenen und auftragsorientierten Unternehmen fließend ist und der Hauptteil der Unternehmen Aspekte beider Unternehmenstypen zeigen. Sie stellen weiterhin fest, dass der Großteil der Unternehmen im Sondermaschinenbau Serienprodukte und Sondermaschinen gleichermaßen herstellen. (Poeschl, S. *et al.*, S. 851)

Tabelle 2-1: Einordnung eines programmgebundenen Unternehmens im Ramp-up zwischen einem auftragsorientierten und einem programmgebundenen Unternehmen (Eversheim, W; Schares, L.Peter; Possel-Dölken, F; Schilke, M; TCW - Transfer-Centrum Wildemann; Poeschl, S. et al., S. 851)

Strukturgrößen	Auftragsorientiertes Unternehmen	Beispiel eines Programmgebundenen Unternehmens im Serienanlauf (Prototypen)	Programmgebundenes Unternehmen
Auftragsauslösungsart	Produktion auf Bestellung mit Rahmenaufträgen	Produktion evtl. auf Bestellung	Produktion auf Lager
Erzeugnisspektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikationen	Erzeugnisse nach Marktspezifikation	Standarderzeugnisse ohne Varianzen
Erzeugnisstruktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur	Geringteilige Erzeugnisse	Geringteilige Erzeugnisse
Ermittlung des Erzeugnis-/Komponentenbedarfs	Bedarfsorientiert auf Erzeugnisebene	Erwartungsorientiert auf Erzeugnisebene	Verbrauchsorientiert auf Erzeugnisebene
Auslösung des Sekundärbedarfs	Auftragsorientiert	Auftragsorientiert (nach Entwicklungsauftrag)	Periodenorientiert
Beschaffungsart	Weitgehender Fremdbezug	Fremdbezug unbedeutend	Fremdbezug unbedeutend
Bevorratung	Keine Bevorratung von Bedarfspositionen	Geringe Bevorratung von Bedarfspositionen	Bevorratung von Erzeugnissen
Produktionsart	Einmalproduktion	Einmalproduktion	Massenproduktion
Ablaufart der Fertigung	Werkstattfertigung	Werkstattfertigung	Fließfertigung
Ablaufart der Montage	Standplatzmontage	Standplatzmontage	Fließmontage
Produktionsstruktur	Produktion mit großer Tiefe	Produktion mit großer Tiefe	Produktion mit geringer Tiefe
Kundenänderungseinfluss während der Fertigung	Änderungseinflüsse in größerem Umfang	Bedeutende Änderungseinflüsse	Änderungseinflüsse unbedeutend

Im Produktionsumfeld stellt das Lerngesetz der industriellen Produktion nach Baur eine weit verbreitete Theorie dar. Dieses Gesetz sagt aus, dass Produkte, die zum ersten Mal produziert werden, eine erhöhte Kapazitätsplanung als Serienprodukte benötigen (Baur, W.). Dies hat zur Folge, dass Produktionen mit Charakteristika des Sondermaschinenbaus eine geringere Flächenproduktivität als Serienproduktionen aufweisen. Zudem wurde in einer Studie des VDMA und McKinsey dem Sondermaschinenbau eine geringere Profitabilität nachgewiesen, die aber durch das größere Wachstumspotenzial wieder kompensiert werden kann (VDMA-McKinsey, S. 29).

2.4 Produktentstehungsprozess im Maschinenbau

Im Maschinenbau kann der Lebenszyklus einer Maschine nach Wiendahl in drei Hauptphasen eingeteilt werden: Die Planungs- und Realisierungsphase, die Betriebsphase und die Redistributionsphase (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651). Die Inbetriebnahme stellt den Übergang zwischen Planungs- und Realisierungsphase dar und ist deswegen ein erfolgsentscheidender Prozessschritt. Die Planungs- und Realisierungsphase unterteilt sich wiederum in die Entwicklung und Konstruktion, die Produktions- und Inbetriebnahmeplanung, die Fertigung und Montage und schließt mit der Inbetriebnahme ab. Die Inbetriebnahme ist die Vorbereitung der Maschine auf den Hochlauf und die Produktion, weshalb sie gemeinsam mit dem Hochlauf den Produktionsanlauf bildet (vgl. Abbildung 2-4). Der Hochlauf ist der Übergabeprozess des Herstellers der Maschine an den Betreiber der Maschine (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651).

Im Vergleich zum Lebenszyklus einer verfahrenstechnischen Anlage nach Weber lassen sich einige Gemeinsamkeiten feststellen. Auch verfahrenstechnische Anlagen sind dem Sondermaschinenbau

zuzurechnen und weisen damit drei Hauptphasen auf. Im Produktentstehungsprozess ordnet Weber die Inbetriebnahme zwischen der Errichtung/Montage und dem Dauerbetrieb ein. Der Hochlauf wird der Inbetriebnahme zugeordnet und ist in verfahrenstechnischen Anlagen kontinuierlich und nicht inkrementell wie im Maschinenbau (Weber, K.H., S. 10).

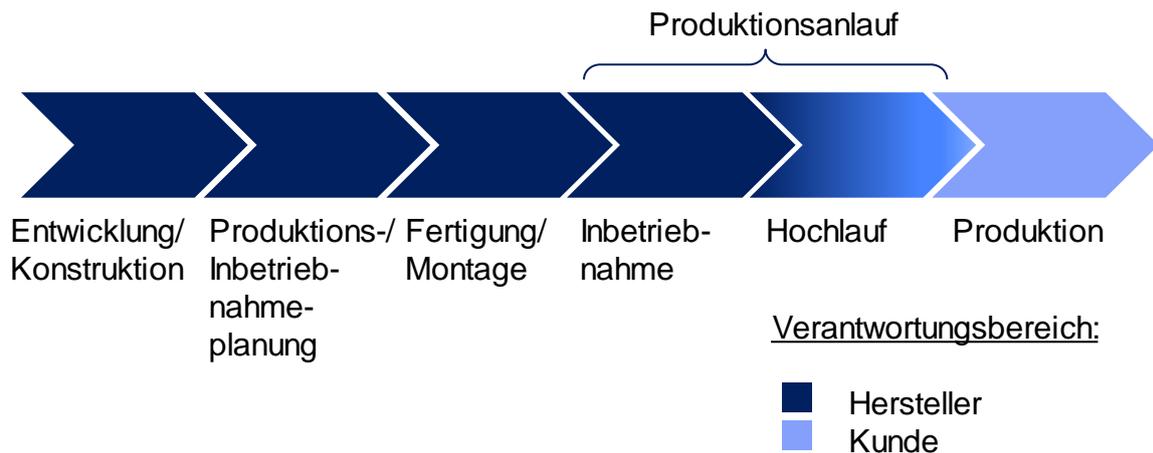


Abbildung 2-4: Der Produktentstehungsprozess und Produktionsprozess von Maschinen (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651; Schuh, G., S. 355)

Es kann daraus geschlossen werden, dass auch in anderen Branchen ähnliche Produktentstehungsprozesse vorliegen und somit Teilaspekte der Forschung auf Methoden zur Prozessplanung übertragen werden können (Weber, K.H., S. 10).

2.5 Grundsätzliche Herausforderungen im Maschinenbau

Die Anforderungen, kürzere Lieferzeiten zu realisieren und eine höhere Produktvielfalt bei einer größer werdenden Marktvolatilität bereitzustellen, prägen seit Jahren den Maschinenbau (Wiendahl, H.-P. & Lutz, S., S. 573; Kinkel, S. & Som, O., S. 572). Aus diesem Grund ist die Reaktionsfähigkeit im Produktentstehungsprozess von hoher Bedeutung (Wiendahl, H.-P. & Lutz, S., S. 573). Eine Studie des VDMA definiert Produktivitätsverluste, verteilte Kompetenzen und ressourcenintensive Aufgaben-

stellungen als Herausforderungen im Maschinenbau (VDMA-McKinsey, S. 30ff). Damit wiederholen sie jedoch lediglich die von Bullinger und Wiendahl et al. genannten Problemstellungen, welche bereits 15 Jahre zuvor beschrieben wurden (Bullinger, H.-J., S. 127; Wiendahl, H.-P. & Lutz, S., S. 573). In Tabelle 2-2 werden relevante Veröffentlichungen im Maschinenbau seit 1997 untersucht. Dabei ist festzustellen, dass sich die Herausforderungen im Maschinenbau wesentlich voneinander unterscheiden.

Tabelle 2-2. Herausforderungsanalyse Maschinenbau

Herausforderungskriterien	Hohe Bestände	Lange Durchlaufzeiten	Unzureichende Termintreue	Schnittstellen mit hohen Produktivitätsverlusten	Verteilte Kompetenzen und Verantwortungen	Fehlerhafte Kontrollsysteme	Hohe Qualitätsanforderungen	Komplizierte Aufgabenstellungen
Veröffentlichung								
(Bullinger, H.-J., S. 127)	X	X	X	X	X			
(Wiendahl, H.-P. & Lutz, S., S. 573)		X	X				X	
Reinhart, G. & Wünsch, G., S. 371f						X		X
WRS - Wirtschaftsförderung Region Stuttgart, S. 101							X	X
VDMA-McKinsey, S. 30ff		(X)	(X)	X	X			X

Bullinger nennt insbesondere Herausforderungen, wie zum Beispiel hohe Bestände, lange Durchlaufzeiten sowie unzureichende Termintreue. Er beschreibt auch Problemfelder wie zum Beispiel Schnittstellen mit hohen Produktivitätsverlusten und die damit einhergehenden verteilten Kompetenzen (Bullinger, H.-J., S. 127). Wiendahl et al. ergänzen die Herausforderungen und beschreiben die hohen Qualitätsanforderungen an die entstehenden Produkte (Wiendahl, H.-P. & Lutz, S., S. 573).

Reinhart und Wünsch nennen zusätzlich fehlerhafte Kontrollsysteme und ressourcenintensive Aufgabenstellungen als Herausforderungen (Reinhart, G. & Wünsch, G., S. 371f). Eine Studie des WRS kommt ebenfalls zum Schluss, dass ressourcenintensive Aufgabenstellungen immer stärker in den Fokus rücken und erläutert in diesem Zusammenhang die dafür notwendigen hohen Qualitätsanforderungen (WRS - Wirtschaftsförderung Region Stuttgart, S. 101). In einer Studie vom VDMA 2014 werden die von Bullinger genannten Herausforderungen der Produktivitätsverluste durch ineffiziente Schnittstellen bestätigt und mit der Verteilung von Kompetenzen begründet. Weiterhin geht die Studie auf die ressourcenintensiven Aufgabenstellungen ein. (VDMA-McKinsey, S. 30ff)

Zusammenfassend sind die oben genannten Problemstellungen aus der Vergangenheit noch nicht gelöst, während die Anforderungen aufgrund der ressourcenintensiven Aufgabenstellungen steigen. Nach der Studie des VDMA ergeben sich dadurch Auswirkungen auf die Durchlaufzeit und weitergehend auch auf die Termintreue der Projekte. Aus diesem Grund werden diese Kategorien in Tabelle 2-2 in Klammern markiert, obwohl die Durchlaufzeit nicht explizit in der Veröffentlichung genannt wird.

Kinkel und Som beschreiben den deutschen Maschinenbau als „Technologie-, Innovations- und Qualitätsführer“ (Kinkel, S. & Som, O., S. 572). Zudem nennen sie eine starke Orientierung an individuellen

Kundenwünschen, welche oftmals zu einer Einzel- bzw. Kleinserie führt. Schlussfolgernd fordern sie den Einsatz von technischen und organisatorischen Konzepten, um die Effektivität und die Effizienz des Produktentstehungsprozesses zu steigern.

Der VDI verortet den größten Teil der Fehlerentstehung in der Konstruktion und Entwicklung (vgl. Abbildung 2-5). Der größte Teil der Fehlerentdeckung und -behebung findet jedoch in der Inbetriebnahme statt. Schon Eversheim sieht den Großteil der Verzögerungen in Fehlerbehebungszeiten durch falsch definierte, vorgelagerte Prozesse (Eversheim, W., S. 1–2). Die Abbildung 2-5 fasst diese Erkenntnis zusammen und ordnet sie in den in Kapitel 2.4 beschriebenen Produktentstehungsprozess ein. Im nächsten Kapitel werden die Problemstellungen der Inbetriebnahme erörtert und Lösungsansätze vorgestellt.

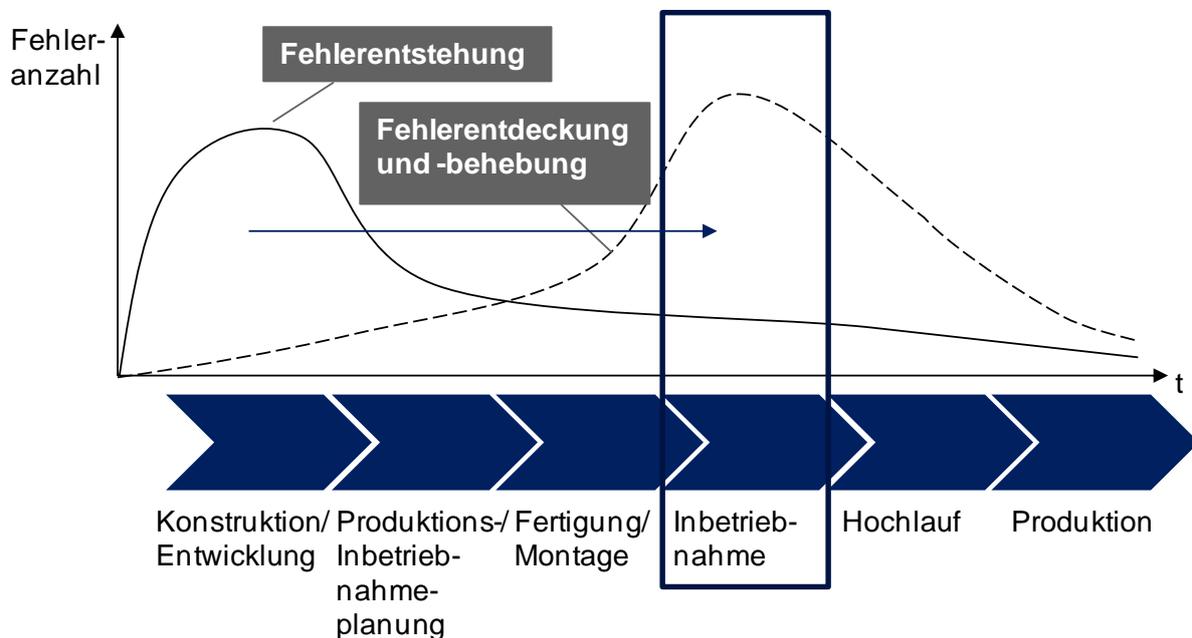


Abbildung 2-5: Fehlerentstehung und Behebung (nach VDI 1990)

3 Inbetriebnahme

Die Mehrzahl der im Produktentstehungsprozess erzeugten Fehler werden in der Inbetriebnahme erkannt und behoben. Weber erläutert, dass im Vergleich zu anderen Fachgebieten des Maschinen- und Anlagenbaus die Inbetriebnahme nur wenig wissenschaftlich betrachtet wurde (Weber, K.H., S. 1; Abel, M., S. 31). Ergänzend beschreibt Bauer, dass auch rechtlich keine allgemeinen Anforderungen an die Inbetriebnahme bestehen. In den meisten Projekten werden jedoch vertraglich festgehaltene zeitliche oder prozessuale Zielwerte festgelegt. Nach Bauer ist aufgrund der erstmaligen Benutzung der Anlage, die Inbetriebnahme für den Produktentstehungsprozess von entscheidender Bedeutung. (Bauer, M., S. 247–248)

In den folgenden Kapiteln werden die Bedeutung und die Aufgabenstellung der Inbetriebnahme beschrieben und deren Einflüsse auf den Sondermaschinenbau reflektiert. Im Anschluss werden die Herausforderungen der Inbetriebnahme im Speziellen erörtert und abschließend mit den bestehenden Forschungsansätzen abgeglichen.

3.1 Bedeutung und Aufgabenstellung

Die Einordnung der Inbetriebnahme vor den Produktionsanlauf und nach der Montage umreißt die Aufgabenstellung und die Bedeutung der Inbetriebnahme als Übergangsprozess. Trotz der bisher geringen wissenschaftlichen Betrachtung der Inbetriebnahme existieren verschiedene Definitionsansätze, die im Folgenden beschrieben werden.

Die Inbetriebnahme stellt nach Wiendahl et al. „die Funktionsbereitschaft und das funktionale Zusammenwirken der zuvor montierten Einzelkomponenten her und prüft die Korrektheit der Einzelfunktionen sowie deren funktionales Zusammenwirken. Das Ergebnis der

Inbetriebnahme ist eine abnahmefertige, technisch funktionsfähige Anlage.“ (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651)

In der Definition wird besonders auf die Effektivität der Anlage Bezug genommen. Die Funktion steht im Vordergrund und das Zusammenwirken der Einzelkomponenten wird betrachtet. Im Gegensatz dazu wird beim Hochlauf „die Anlage beim Nutzer unter ihren nominellen, personellen, organisatorischen und technischen Randbedingungen auf eine dauerhafte Nennleistung gebracht.“ (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651) Somit beschäftigt sich in Abgrenzung zur Inbetriebnahme der Hochlauf hauptsächlich mit der Optimierung technischer, personeller und organisatorischer Potenziale (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 651).

Lanza unterteilt den Produktionsanlauf in die Inbetriebnahme und den Hochlauf und nennt den SOP (Start of Production) als Meilenstein nach der Inbetriebnahme (Bröckelmann, J; Lanza, G., S. 14ff).

Dominka et al. bestätigen die Definition und wählen einen funktionsbezogenen Ansatz. Sie definieren die Inbetriebnahme als Transfer der Produktionslinie von einem nicht funktionierenden Status nach der Montage in einen funktionierenden Status (Dominka, S., Schiller, F. & Kain, S., S. 1). Wünsch orientiert sich an Veröffentlichungen von Eversheim und nennt die Inbetriebnahme einen „Vorgang des termingerechten Versetzens der montierten Produkte in Funktionsbereitschaft mit einer anschließenden Überprüfung dieser Funktionsbereitschaft.“ (Eversheim, W., S. 9; Wünsch, G., S. 12) Damit benennen Dominka et al. und Wünsch die Termingerechtigkeit, das Versetzen in den funktionsfähigen Zustand und dessen Überprüfung als wichtige Ziele der Inbetriebnahme. Sie reduzieren den Ansatz nicht auf die Funktion, sondern stellen mit der Terminplanung ein Effizienzziel der Inbetriebnahme in den Vordergrund. Weber ergänzt die in der

Inbetriebnahme hohen Investitionssummen und in diesem Zusammenhang das Ziel der Kostenreduzierung durch eine Verkürzung der Inbetriebnahmedauer (Weber, K.H., S. 8).

Darüber hinaus grenzt Weber die Begriffe der Erstinbetriebnahme und der Wiederinbetriebnahme voneinander ab. In der Erstinbetriebnahme wird die Anlage erstmalig nach der mechanischen Fertigstellung in den vertragsmäßigen Dauerbetrieb überführt. Die Wiederinbetriebnahme ist hingegen die Überführung der Anlage vom Stillstand nach Abstellung in den Dauerbetrieb. Beide Varianten der Inbetriebnahme folgen unterschiedlichen Prozessen. (Weber, K.H., S. 5)

Der Zeitanteil der Inbetriebnahme am Auftragsabwicklungsprozess im Maschinenbau betrug nach Sossenheimer bereits in den 90er Jahren durchschnittlich 13% bei einem Schwankungsbereich von 7 bis 20% (Sossenheimer, K., S. 3). Fast zwanzig Jahre später liegt der Anteil der Inbetriebnahme am Projektzeitraum, nach Wünsch, zwischen 15 und 25 % (Zäh, M.F. & Wünsch, G., S. 699). Durch den Anstieg des prozentualen Anteils wird deutlich, dass die Funktionsabläufe aufwändiger werden und ein koordiniertes Zusammenwirken der verschiedenen Disziplinen erfordern (Wünsch, G., S. 2). Zäh fasst für die Automatisierungstechnik zusammen, dass die Inbetriebnahme in den Fokus des Handlungsbedarfs fällt (Zäh, M.F. *et al.*, S. 595). Weitere zehn Jahre später sieht Weber in der Inbetriebnahme eine zunehmende Herausforderung und zeigt damit eine aktuelle Forschungslücke auf (Weber, K.H., S. 10)

Nach Analysen des VDI werden 80% der Fehler des gesamten Produktentstehungsprozesses in der Fertigung, Montage und Inbetriebnahme entdeckt. Auch Eversheim und der VDW bestätigen einen hohen Zeitanteil der störungsbedingten Bearbeitungszeiten von ungefähr 36% in den 90er Jahren (vgl. Abbildung 3-1). Reinhart und Wünsch greifen diese

Problemstellung auf und nennen als Gründe für die störungsbedingten Bearbeitungszeiten den Einsatz von ungetesteten Systemen und die fehlende Kontroll- und Diagnosesoftware (Reinhart, G. & Wunsch, G., S. 371).

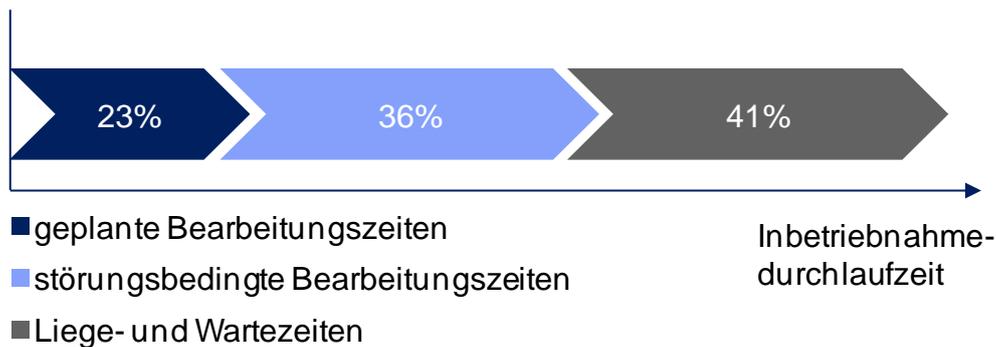


Abbildung 3-1: Durchlaufzeit IBN - Liege- und Wartezeiten, störungsbedingte Bearbeitungszeiten, geplante Bearbeitungszeiten (Eversheim, W; Weck, M. & Assmann, S.)

Weber nennt im Jahr 2016 als Grund für die weiter steigenden störungsbedingten Bearbeitungszeiten den steigenden Wettbewerbsdruck und die Forderung nach verkürzten Entwicklungszeiten (Weber, K.H., S. 10). Die hohe Störungshäufigkeit der Inbetriebnahme resultiert, nach VDI, in einer unbefriedigenden Planbarkeit, kombiniert mit einer geringen Wiederverwendbarkeit von Planungsunterlagen (z.B. Ablaufpläne, Arbeitspläne, Prüfpläne oder Checklisten) aufgrund von kurzen Innovationszyklen (VDI, S. 8).

Zusammengefasst sind die Herausforderungen der Inbetriebnahme, in welcher ein Großteil der im Projekt entstandenen Fehler entdeckt werden, seit Jahren ungelöst. Dadurch entstehen ungeplante Wartezeiten und störungsbedingte Reparaturzeiten. Aufgrund des bestimmenden Zeitanteils der Inbetriebnahme am Gesamtprojekt sind die

Fehlerbehebungszeiten relevant für die Einhaltung des Projektplans. Zeitgleich verhindern diese Fehler eine realistische Planung und somit die Anwendung von Wissen und Methoden vorheriger Projekte.

3.2 Einflüsse des Sondermaschinenbaus und der Wiederholproduktion

Sondermaschinenhersteller bedienen nicht die Anforderungen des ganzen Markts, sondern fokussieren sich auf einzelne Kunden (Eversheim, W.).

Daraus resultieren oftmals sequenzielle Entwicklungsprozesse und Produktionsanläufe, welche bei Änderungen zeitintensive Anpassungen und Fehlerbehebungsprozesse mit sich bringen. Häufig können die zu erreichende Prozess- und Produktqualität nur in den finalen Änderungsprozessen erzielt werden (Neugebauer, R. & Schob, U., S. 539).

Aufgrund der Fokussierung auf einzelne Kunden werden in einem zunehmenden Maß kundenindividuelle Anlagen entwickelt und produziert, wodurch sich der Entwicklungsaufwand und die gewonnenen Erkenntnisse nur selten auf weitere Anlagenprojekte übertragen lassen (Zäh, M.F. *et al.*, S. 595).

Dadurch muss ein hoher Aufwand in die Entwicklung einer Anlage investiert werden. Da dieser Entwicklungsaufwand im theoretischen Kontext nicht ausschließlich möglich ist, müssen Versuche an der Anlage durchgeführt werden. Aufgrund des sequenziellen Produktentstehungsprozesses können die Ergebnisse während der Inbetriebnahme ermittelt werden. Dadurch erhöht sich die Inbetriebnahmedauer. Lanza und Bröckelmann beschreiben darüber hinaus zunehmende Anforderungen an die maschinenbaulichen Anlagen und somit auch an die Inbetriebnahme, die die beschriebene Herausforderung verstärken (Bröckelmann, J; Lanza, G., S. 15).

Wiendahl et al. empfehlen eine Modularisierung der Bestandteile der Inbetriebnahme und deren Prüfung vor der Anlagenfertigstellung (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 654). Der oben beschriebene hohe Termindruck widerspricht dieser Empfehlung jedoch in Teilen, da oftmals aus Kosten- und Zeitgründen kein ausreichender Versuchsaufbau errichtet werden kann.

Zusammenfassend bestehen die oben genannten Probleme der Inbetriebnahme auch im Sondermaschinenbau und der Wiederholproduktion. Aufgrund der geringen Wiederholraten ist sogar von einer Intensivierung der Problematik auszugehen. Im Sondermaschinenbau ist es deshalb besonders wichtig, die Produktionsanlaufphase zu verkürzen, um bei steigendem Wettbewerbsdruck konkurrenzfähig zu bleiben (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 652).

3.3 Herausforderungen in der Inbetriebnahme

Die Herausforderungen der Inbetriebnahme ergeben sich, wie in den vorigen Kapiteln beschrieben, vornehmlich aus den Fehlern der Vorgängerprozesse und den Rahmenbedingungen des Maschinenbaus, wie zum Beispiel die späte Erkennung von Fehlern beim Produktionsanlauf. Aufgrund des breiten Betrachtungsbereichs muss eine allgemeine Herausforderungsbeschreibung durchgeführt werden. Dabei werden in Tabelle 3-1 Literaturquellen seit 1990 betrachtet und alle in den Veröffentlichungen genannten Herausforderungskriterien aufgeführt.

Das Herausforderungskriterium der ressourcenintensiven Aufgabenstellung bleibt in den untersuchten Quellen über die Jahre konstant. Weber, Neugebauer und Schob stellen sogar eine Zunahme fest und deuten eine damit verbundene längere Inbetriebnahmedauer an (Neugebauer, R. & Schob, U., S. 539; Weber, K.H., S. 10). Darüber hinaus ist der weit verbreitete Ansatz der virtuellen Inbetriebnahme nur

eingeschränkt bei ressourcenintensiven Aufgabenstellungen anwendbar und in vielen Fällen auf rein mechanische Anwendungen begrenzt. Bei immer komplizierter werdenden Herausforderungen bietet diese Methoden nur noch begrenzte Lösungsmöglichkeiten an.

Tabelle 3-1. Herausforderungsanalyse Inbetriebnahme

Herausforderungs- kriterien Veröffentlichung	Fehlerhafte Steuerung	Geringe Modularität	Funktionaler Ablauf	Fehlerhafte Montage/ fehlende Bauteile	Hohe Störungshäufigkeit	Kurze Innovationszyklen	Kompliziert und hoher Aufwand mit virtueller Inbetriebnahme	Komplizierte Aufgabenstellung
Eversheim, W., S. 1ff	X	X	X	X	X	X		X
Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 652					X			
Moore, P.R. <i>et al.</i> , S. 1105ff							X	X
Park, C.M. <i>et al.</i> , S. 1f							X	X
Zäh, M.F. <i>et al.</i> , S. 595, 599							X	X
Röck, S., S. 21			X					X
Bargiela, A., S. 1					X		X	
Neugebauer, R. & Schob, U., S. 539					X	X	X	X
Weber, K.H., S. 10			X		X	X		X

In neueren Veröffentlichungen werden die kurzen Innovationszyklen und die hohe Störungshäufigkeit, im Vergleich zur Serienproduktion, öfter als in den Vorjahren, genannt. Wunsch schlägt, unter Bezugnahme auf Eversheim, Planungs- und Steuerungssysteme, unter anderem auch das Wissensmanagement für Inbetriebnahmeprozesse vor (Wunsch, G., S. 15)

Weber und Röck nennen in neueren Veröffentlichungen zudem die Herausforderung, Fehler im funktionalen Ablauf frühzeitig zu erkennen und konstruktiv zu beheben (Röck, S., S. 15; Weber, K.H., S. 10). Schon 1989 empfiehlt Sossenheimer, die Erfahrungen aus ähnlichen Maschinenprojekten zu nutzen, um Inbetriebnahmezeit einzusparen (Sossenheimer, K; Wunsch, G., S. 14)

Aufgrund der komplizierter werdenden Aufgabenstellung kann die Funktionalität der Einzelkomponenten oft erst bei der Inbetriebnahme festgestellt werden. Insbesondere bei Projekten im Maschinenbau stehen zu diesem Zeitpunkt bereits Liefertermine fest. Diese Liefertermine müssen bei Fehlern in vorgelagerten Prozessen unwirtschaftlich verschoben werden. (Röck, S., S. 21, 28)

Auch Wiendahl et al. erkennen, dass in den meisten Anlaufprojekten Abweichungen von Kosten- und Terminzielen auftreten. Aus diesem Grund empfehlen sie ein ganzheitliches Projektmanagement, in welchem die Anläufe vom Maschinenhersteller beherrscht und der Zeitplan maßgeblich von ihm bestimmt werden muss. Eine mögliche Verkürzung der Inbetriebnahmedauer infolge eines ganzheitlichen Projektmanagements wirkt sich dabei positiv auf die Planungskosten und die Investitionen für Betriebsmittel und Produktionsflächen aus. (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 652–653)

Es muss also ein Ansatz entwickelt werden, der Fehler prozesssicher modellieren kann. Da Fehler aufgrund der hohen Störungshäufigkeit in

der Inbetriebnahme eine ausschlaggebende Einflussgröße sind, ist es entscheidend, dass das entwickelte Modell adaptive Methoden einsetzt, um kurze Innovationszyklen abzubilden und zudem bei komplizierten Aufgabenstellungen Lösungen bietet.

3.4 Reflexion bestehender Ansätze in der Inbetriebnahme

Eine Literaturanalyse zeigt, dass es wenig Methoden speziell für die Inbetriebnahme im Maschinenbau gibt. Oftmals wird die virtuelle Inbetriebnahme als Lösung für die Inbetriebnahme von automatisierten Montageprozessen genannt (Zäh, M.F. & Wunsch, G., S. 699; Zäh, M.F. *et al.*, S. 595, 599). Weiterhin können allgemeinere Methoden wie X-in-the-loop oder der Ansatz des anlaufrobusten Produktionssystems von Wiendahl *et al.* angewendet werden.

3.4.1 Virtuelle Inbetriebnahme

„Die Virtuelle Inbetriebnahme ist ein Lösungsansatz, um zeitraubende und kostenintensive Iterationsschleifen bei der Planung und Inbetriebnahme maschinenbaulicher Anlagen zu vermeiden“ (Friebe, T. *et al.*, S. 227). Vor allem bei der Inbetriebnahme von automatisierten Montageprozessen können während der Entwicklungsphase gute Ergebnisse hinsichtlich der Modellierung und Durchführbarkeit des Anlagenkonzeptes erzielt werden (Zäh, M.F. & Wunsch, G., S. 699; Zäh, M.F. *et al.*, S. 595). Neugebauer und Schob stellen fest, dass der Aufwand in der Produktentwicklung aufgrund der Modellierung steigt. Ziel ist es dabei, das Fehleraufkommen während der Inbetriebnahme zu senken. Sie weisen außerdem darauf hin, dass eine beträchtliche Entwicklungsleistung in die Sicherstellung der Nutzbarkeit des Simulationsmodells fließen muss. (Neugebauer, R. & Schob, U., S. 539) Zäh *et al.* verweisen auf einen Zusammenhang zwischen der Ressourcenintensität der Aufgabenstellung und dem Modellierungs-

aufwand für eine virtuelle Inbetriebnahme. Dabei sind vor allem einfache Montagesimulationen gut modellierbar. Sobald allerdings technische Zusammenhänge für die Modellierung eine Rolle spielen, werden die Simulationen deutlich aufwändiger. (Zäh, M.F. & Wunsch, G., S. 699; Zäh, M.F. *et al.*, S. 599)

Neugebauer und Schob stellen dafür einen regelbasierten Ansatz vor, welcher jedoch die Dokumentation und Beschreibung der Anlage erfordert. Liegt diese Dokumentation nicht vor, sind manuelle Eingriffe in die Simulation erforderlich (Neugebauer, R. & Schob, U., S. 546). Gerade im Sondermaschinenbau wäre dafür ein sehr hoher Einmalaufwand zur Dokumentation aller Funktionen erforderlich, welcher den gesamten Projektzeitraum und das Projektkostenlimit überschreiten kann.

Frieben *et al.* stellen eine Systematik zur Integration der virtuellen Inbetriebnahme im Produktentstehungsprozess vor. Dabei soll vor allem der Modellierungsaufwand mit Hilfe von definierten Testspezifikationen und wählbaren Modellierungstiefen verringert werden (Frieben, T. *et al.*, S. 277).

Zusammengefasst kann die virtuelle Inbetriebnahme vorrangig bei weniger ressourcenintensiven Aufgabenstellungen eine entscheidende Einsparung der Inbetriebnahmedauer mit sich bringen. Werden die Anforderungen konstruktiv anspruchsvoller, übersteigen die Modellierungsaufwände jedoch die potenzielle Zeiteinsparung während der Inbetriebnahme.

3.4.2 X-in-the-loop

Die Methode X-in-the-Loop beschreibt eine Entwicklungsumgebung für Antriebssysteme, welche auf dem klassischen Ansatz der Hardware-in-the-Loop beruht. Hardware-in-the-Loop konzentriert sich vor allem auf Steuergeräte für Motoren. X-in-the-Loop überträgt das Konzept des zu

testenden Prüflings auf weitere Komponenten des Antriebsstrangs, um mit der partiellen, softwareseitigen Simulation Ergebnisse zu erzielen, ohne einen vollständigen Aufbau bereitzustellen. Nach Albers et al. sind damit besonders bei komplizierten Zusammenhängen realitätsnahe Ergebnisse möglich (Albers, A. *et al.*, S. 61).

Das Ziel der Methode ist es, den Entwicklungsprozess während der Analyse, Synthese und Validierung mit Informationen über das Verhalten des finalen Produkts zu versorgen. Dabei werden gezielt Testteile validiert und zeiteffizient Zusammenhänge festgestellt (Albers, A. *et al.*, S. 391ff). Aufgrund der Anwendung der Methode im Automobilbau werden die Rahmenbedingungen einer Großserie angenommen. Diese sind im Maschinenbau jedoch nur in seltenen Fällen vorhanden, denn oftmals ist, wie beschrieben, sogar vom Sondermaschinenbau auszugehen. Damit sind Prüfstände für Einzelkomponenten nicht zweckmäßig, da eine sequenzielle Produktentwicklung und zeitgleich ein hoher Termindruck vorliegt.

3.4.3 Anlaufrobuste Produktionssysteme

Wiendahl et al. beschreiben den Ansatz der anlaufrobusten Produktionssysteme für den Maschinenbau. Sie erkennen einen Forschungsbedarf aufgrund der komplizierter werdenden Aufgabenstellungen und den damit verbundenen vernetzten Fehlermöglichkeiten. Aus ihrer Sicht ist diese Problematik nur in der gezielten Koordination verschiedener Disziplinen im Maschinenbau lösbar (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 655).

Die Lösung der vielseitigen Aufgabenstellungen sind sogenannte „Plug-and-Produce“-Module. Hierbei wird in einem Modulbaukasten auf erprobte Module zurückgegriffen. Neue Technologien werden frühzeitig erprobt und zum Modulbaukasten hinzugefügt.

Vor der Einführung müssen die neuen Technologien sogenannte Mindest-Prozess-Reifegrade erfüllen und reduzieren damit die Störrisiken, wodurch eine Teilautomatisierung möglich ist. (Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H., S. 654)

Vergleichbar zum X-in-the-Loop-Ansatz von Albers setzen Wiendahl et al. auf die Modularisierung der gesamten Inbetriebnahme. Albers weitet den Hardware-in-the-Loop-Ansatz auf alle Komponenten im Antriebsstrang aus und setzt damit auf Prüfstände. Wiendahl et al. hingegen empfehlen die Kombination von geprüften Komponenten aus vorherigen Projekten mit einzelnen Prüfungen bei neuen Entwicklungen. Für die Prüfung der neuen Entwicklungen müssen die Rahmenbedingungen und Anforderungen jedoch bekannt sein. Weil der Maschinenbaus kundenspezifische Produkte in kleiner Stückzahl fertigt, kann die Anpassung der fertigen Module zueinander größere Konstruktionsänderungen mit sich bringen. Nach der Anpassung können darüber hinaus weitere Fehler in der Inbetriebnahme auftreten, welche bei der Einzelbetrachtung der Module nicht erkennbar sind. Zudem ist es möglich, dass die Kombination bestimmter Module komplizierte Wechselwirkungen aufweist und damit im Speziellen weitere Fehlerbilder hervorbringt.

Zusammengefasst präsentiert Wiendahl et al. einen wirtschaftlichen Ansatz für den Maschinenbau mit geringen Stückzahlen. Jedoch bleiben Fragen hinsichtlich möglicher Wechselwirkungen zwischen Modulen, Fehlermöglichkeiten und projektspezifischer Anpassungen offen. Weiterhin ist die vorgeschlagene frühzeitige Überprüfung neuer Technologien in der Praxis aufgrund des oftmals beschriebenen Termindrucks nur begrenzt möglich.

4 Prozessplanung

Die komplizierter werdenden Aufgabenstellungen, gepaart mit der begrenzten Zeit sowie modellierungs- und versuchsintensiven Ansätzen, verdeutlichen die Problemstellung der ineffizienten Inbetriebnahme-prozesse. Bestehende Ansätze setzen zum einen auf bereits geprüfte Module und zum anderen auf die Simulation der Anlage. Die Planung der Inbetriebnahme stellt aufgrund der Störanfälligkeit der Prozesse eine Herausforderung dar und ist jedoch für eine effiziente Zielerreichung essenziell. Um die vereinbarten Zieltermine einhalten zu können, sind die beteiligten Disziplinen in hohem Maß zu koordinieren.

Es werden zunächst die Bedeutung der Planung des Inbetriebnahme-prozesses erläutert und die Einflüsse des Sondermaschinenbaus und der Wiederholproduktion erörtert. Im Anschluss werden die Herausforderungen der Prozessplanung in der Inbetriebnahme reflektiert und die dafür existierenden Lösungen geprüft.

4.1 Bedeutung der Planung des Inbetriebnahmeprozesses

Eine realistische Planung der Inbetriebnahme ist aufgrund der Störungsanfälligkeit der überwiegend neuen Prozesse in den meisten Fällen nicht möglich. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist jedoch die Planung einer termingerechten Fertigstellung ein ausschlaggebender Bestandteil. Loeschenkohl und Sokolovsky beschreiben die Planung von Anlaufprozessen als wirtschaftliches Potenzial und weisen auf die Notwendigkeit der kooperativen Planung hin (Loeschenkohl, S. & Sokolovsky, Z., S. 634). Nach Chang ist die Prozessplanung ein Rezept für die Herstellung von Produkten, sowohl von kleinen Baugruppen als auch von Maschinen (Chang, T.-C; Kiritsis, D., S. 240). Nach Lv und Qiao ist die Prozessplanung Bestandteil des Produktentstehungsprozesses, da sie die technologischen Anforderungen beschreibt, wie Rohmaterial in die

fertige Form gebracht wird (Lv, S. & Qiao, L., S. 638). Damit ist die Prozessplanung als wichtiger Bestandteil des Produkterstellungsprozesses Voraussetzung für einen geordneten Projektablauf.

Bereits 1959 nennen Kelley und Walker Gründe für einen Prozessplan. Dieser bildet zunächst die Basis für Vorhersagbarkeit und Planung und ermöglicht, dass verschiedene Pläne miteinander im Hinblick auf die Zielerreichung verglichen werden können, wodurch eine Fortschrittsüberwachung implementiert wird. Zudem erlaubt die Planerstellung eine Entscheidung nach den jeweiligen Fakten und reduziert somit den subjektiven Einfluss. (Kelley, J.E. & Walker, M.R., S. 160)

Wenig später erkannte Niebel das Potenzial von Computern für die Unterstützung der Prozessplanerstellung (Niebel, B.W; Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 1). Daraufhin wurde die Prozessplanung für die Fertigung in auftragsorientierten Unternehmen oder Montagetätigkeiten angewandt und untersucht (Suwa, H. & Sandoh, H; Lv, S. & Qiao, L; Manupati, V.Kumar *et al.*). Nach Lv und Qiao ist die Prozessplanung und die Auftragssteuerung durch die Zuweisung von Ressourcen miteinander verknüpft (Lv, S. & Qiao, L., S. 638). Manupati *et al.* beschreibt die Prozessplanung als Methode, die die Produktionsschritte, deren Zusammenhänge und die verknüpften Ressourcen koordiniert (Manupati, V.Kumar *et al.*, S. 64). Zusammenfassend können dadurch viele einzelne Prozesse mit Ressourcen koordiniert werden, was die Grundlage für eine Effizienzsteigerung bildet. Gruhn und Wellen zeichnen ein breiteres Bild der Prozessplanung als Methode zur Dokumentation von Geschäftsprozessen, deren Analyse und der Einführung von Prozessverbesserungen. Zusammenfassend beschreiben sie den Prozessplan als Werkzeug für das Workflow Management (Gruhn, V. & Wellen, U., S. 297).

Nach Newman et al. wird die Prozessplanerstellung in der Teilefertigung hauptsächlich auf der Basis von Geometriedaten durchgeführt (Newman, S.T. *et al.*, S. 470). Aufgrund der relativ stabilen Prozesse und geringen Fehlerdichte im Vergleich zur Inbetriebnahme kann hierbei von einer konstanten Prozessqualität ausgegangen werden. Fehler, verursacht in der Teilefertigung, werden in den Prozessplanungsansätzen nicht betrachtet.

Plehn deutet an, dass die Implementierung von Änderungen in einen bestehenden Prozess im Hinblick auf die erwarteten Kosten und die benötigte Zeit schwer vorherzusagen ist (Plehn, C. *et al.*, S. 1). Nach Chang ist die Prozessplanung stark abhängig vom Wissen und der Erfahrung von Prozessexperten und kann aus diesem Grund durch Expertensystemen unterstützt werden (Chang, T.-C.). Suwa und Sandoh erläutern, dass wissensbasierte Ansätze nicht nur in der Prozessplanung, sondern auch in der Optimierung und in der Echtzeitplanung eine wichtige Rolle spielen (Suwa, H. & Sandoh, H., S. 55). Damit definieren sie die Prozessplanung als eine erfahrungsgetriebene Methode und verweisen zugleich auf deren subjektiven Charakter.

Auch Kjræulff und Madsen fassen mehrere Quellen zusammen und erläutern, dass für die Lösung von Expertenaufgaben Expertensysteme als Methode zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung geeignet sind (Amos Tversky & Daniel Kahneman; Castillo, E., Gutiérrez, J.Manuel & Hadi, A.S; Kjræulff, U.B. & Madsen, A.L., S. 5). Boersch und Heinsohn beschreiben jedoch, dass auch von Experten mitunter inkurate und irreführende Informationen weitergegeben werden können und dass Expertensysteme diese bestmöglich kompensieren sollten (Karbach, W. & Linster, M; Karst, M; Boersch, I., Heinsohn, J. & Socher, R., S. 1). Aufgrund der Abhängigkeit vom Wissen der Experten enthält ein Prozessplan stark subjektive Einflüsse des Planers. Daraus folgend wird

in dem Zusammenhang oft über das Wissensmanagement diskutiert (Kiritsis, D.).

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Prozessplanung von hoher Bedeutung für die Inbetriebnahme ist. Jedoch wurde die Methode der Prozessplanung wissenschaftlich hauptsächlich für die Auftragsfertigung von Teilen untersucht. Die Inbetriebnahme ist aufgrund der hohen Störanfälligkeit nicht verlässlich als Prozessplan abbildbar, kann jedoch mit Expertensystemen unterstützt werden.

4.2 Herausforderungen in der Prozessplanung für die Inbetriebnahme

Die Prozessplanung für die Inbetriebnahme zeigt ein wirtschaftliches Potenzial in Anlaufprozessen, ist bisher jedoch wenig untersucht und kann aufgrund der hohen Störanfälligkeit nicht mit der Planung der Teilefertigung verglichen werden.

Die Planung von Prozessen ist eine stark wissensbasierte und damit von Expertenmeinungen geprägte Methode, die dadurch subjektiven Einflüssen und Meinungen unterlegen ist. Schlussendlich besteht die Herausforderung darin, das Wissen der Experten in einen Plan zu übersetzen. (Chang, T.-C; Kjræulff, U.B. & Madsen, A.L., S. 5; Suwa, H. & Sandoh, H., S. 55)

Die Inbetriebnahme erfordert jedoch nicht nur die Prozessplanung auf Basis von logischen Zusammenhängen der Reihenfolgeplanung, sondern auch die Berücksichtigung von Fehlern und deren Auswirkungen auf die Prozessdauer. Nach Manupati unterliegt in der Praxis die Erstellung von Prozessplänen der sequenziellen Planung des Produktentstehungsprozesses. Nach der Entwicklung des Produktes wird noch vor dem Produktionsbeginn ein Prozessplan erstellt, welcher den Vorgaben des fertig entwickelten Produktes folgt. Eine Anpassung des Produktes auf die

optimale Prozessreihenfolge wird nicht durchgeführt. (Manupati, V.Kumar *et al.*, S. 64)

Bei der Betrachtung der Herausforderungen der Inbetriebnahme und dem Umgang mit Fehlern und Störungen wird schnell klar, dass die bestehenden Prozessplanungsmethoden den Anforderungen im Maschinenbau nicht gerecht werden (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 1).

Auch Xu *et al.* beschreiben, dass Prozessexperten die Prozesspläne erstellen und dies ein sequentieller Vorgang ist (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 1). Damit bestätigen sie, dass die Prozessplanung auch in der Praxis erst nach der Entwicklung und nicht von Entwicklern, sondern von Prozessexperten durchgeführt wird. Die Herausforderungen der Inbetriebnahme spiegeln die Trennung zwischen Entwicklung und Prozessplanung wider.

Schlussfolgernd bedingt die Prozessplanung die Integrierbarkeit der Prozesspläne in Produktentstehungsprozesse. Beim Einsatz von Prozessplänen in der Inbetriebnahme ist weiterhin die Berücksichtigung von Fehlern und deren Auswirkungen entscheidend. Die Modellierung von Fehlern erfordert die Integration von Expertenmeinungen bei der Planung und hat demnach Potenzial, die Effizienz der Inbetriebnahme zu steigern.

4.3 Reflexion bestehender Ansätze der Prozessplanungsmethoden

Die Anforderungen der Inbetriebnahme erfordern die Betrachtung der Prozessplanungsmethoden. Dabei liegt der Fokus besonders auf der Reduzierung der Inbetriebnahmedauer und der Planung von Fehlern. Eine grundlegende Visualisierungsmethode für Prozesspläne sind Prozesslandschaften.

4.3.1 Prozesslandschaften

Prozesslandschaften haben ihren Ursprung in der Darstellung der Gesamtmenge der in einer Organisation ausgeführten Geschäftsprozesse. Damit eignen sie sich als transparente Darstellungsform und Ansatz zur ganzheitlichen Optimierung dieser Prozesse (Becker, J. *et al.*, S. 267).

Becker et al. beschreiben eine derartige Analyse und Prozessoptimierung in öffentlichen Einrichtungen (Becker, J. *et al.*, S. 267). Ein weiteres Beispiel liefern Albrecht und Töpfer beim Einsatz von Prozesslandschaften für die Analyse von Änderungsprozessen in Krankenhäusern (Albrecht, M. & Töpfer, A.). Das breite Einsatzgebiet sowie die übersichtliche und transparente Darstellungsform machen Prozesslandschaften zu einer Methode der Prozessmodellierung.

Prozesslandschaften stellen demnach Abhängigkeiten zwischen einzelnen Prozessschritten dar und ermöglichen es, im Hinblick auf die Inbetriebnahme, Handlungsmaßnahmen im Fehlerfall zu beschreiben. Während ihr Einsatz als Kommunikationswerkzeug zwischen Prozessexperten möglich ist, bieten sie jedoch keine Lösung für eine technische Analyse einer Problemstellung. Aus diesem Grund sind Prozesslandschaften allein kein Werkzeug zur Optimierung der Prozesse, geben jedoch einen Überblick über den Planungsstand.

4.3.2 Critical Path Planning

Die Critical-Path-Planning-Methode (Kritische-Pfad-Planungsmethode) ist eine grundlegende Planungsmethode, welche entwickelt wurde, um eine Basis für Vorhersagen und Planungen zu bilden. Mit ihr kann die minimale Durchlaufzeit für einen gewählten Plan evaluiert und mit anderen Plänen verglichen werden. Die Grundlage der Critical-Path-Planning-Methode wurde von Kelley und Walker gelegt (Kelley, J.E. & Walker, M.R.). Die Methode wird in fast allen Bereichen der Planung eingesetzt und erlaubt es, in einer Prozesslandschaft den kürzesten Pfad zu finden. Auch im Projektmanagement lassen sich unter anderem Optimierungen erzielen und sogar das Risiko des kritischen Pfads gezielt minimieren (Harrison, F. & Lock, D.).

Da die Critical-Path-Planning-Methode von einem stabilen Prozess ausgeht, können die Modellierung von Varianzen und die Auswertung von instabilen Prozessen lediglich im kritischen Pfad betrachtet werden. Eine ganzheitliche Auswertung von Varianzen und möglichen Fehlern ist daher nicht möglich.

4.3.3 Heuristische Prozessoptimierungen

Der Ansatz der heuristischen Prozessoptimierung teilt die Prozesse in Prozessfragmente auf und ermöglicht dadurch die Einleitung von Maßnahmen zur heuristischen Optimierung. Diese erlaubt mit begrenztem theoretischem Wissen und geringem Aufwand eine gute Lösung zu erzielen. Da die Fragmentierungsebene fallspezifisch gewählt werden kann, ergeben sich Optimierungsmöglichkeiten auf Projektebene oder auf Mikroebene. (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 467)

Die heuristische Prozessoptimierung ist damit eine Methode zur Modellierung von Geschäftsprozessen und ist mit dem Ansatz der Prozesslandschaften kombinierbar.

Nach Schlick et al. sind heuristische Prozessoptimierungen „Maßnahmen zur sog. heuristischen Optimierung von Prozessfragmenten“ (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 467). Eversheim gibt die heuristische Prozessoptimierungen als Unterstützung auf der Suche nach effizienteren Prozessalternativen an (Eversheim, W., S. 131).

Der heuristische Ansatz birgt bei falscher Experteneinschätzung ein gewisses Risiko, dass die Durchlaufzeit nicht verkürzt wird. Aufgrund der Abhängigkeit von Aussagen der Prozessexperten lässt sich keine Vorhersage über die Verkürzung der Durchlaufzeit machen, wodurch keine adäquate Risikobewertung der Prozessänderung möglich ist (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 486).

Im Folgenden werden die von Schlick et al. vorgestellten Prozessoptimierungen aufgezählt und anschließend erläutert (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 486ff):

1. **„Reihenfolge von Aktivitäten ändern“**
2. **„Eliminieren von Aktivitäten“**
3. **„Zusammenfassen von Aktivitäten“**
4. **„Auslagern von Aktivitäten“**
5. **„Vereinfachen von Aktivitäten“**
6. **„Abbau von Schnittstellen“**
7. **„Parallelisieren von Aktivitäten“**

Schlick et al. nutzen die Methoden der Prozesslandschaften, die aus Prozessen und Verknüpfungen bestehen, um das Prinzip von Prozessoptimierungen zu verdeutlichen. Zwei Prozesse sind unabhängig voneinander, wenn sie keinerlei Verknüpfung miteinander aufweisen. Damit sind keine leistungs-, ressourcen- oder marktorientierten Abhängigkeiten vorhanden. Sie können außerdem seriell oder parallel angeordnet werden. Sind beide Prozesse mit einem Pfeil verbunden, liegt

eine sequenzielle bzw. funktionale Abhängigkeit vor. Es muss, wie in Tabelle 4-1 gezeigt, Prozess 1 vor Prozess 2 durchgeführt werden. Damit ist nur ein sequenzieller Vollzug möglich, wenn einzelne Prozesse nicht weiter fragmentiert werden.

Tabelle 4-1: Abhängigkeit und Erläuterung von Prozessbildern (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 490)

Abhängigkeit	Prozessbild	Beschreibung	Vollzug
Unabhängig		Keine leistungs-, ressourcen- oder marktorientierten Abhängigkeiten	Serieller oder paralleler Vollzug möglich
Sequentiell bzw. funktional		Ergebnis von Aktivität 1 ist für Aktivität 2 erforderlich	Serieller Vollzug; paralleler Vollzug nur möglich, wenn sinnvolle Teilergebnisse gebildet werden können, aber: erhöhter Abstimmungsbedarf, da bei Änderungen Iterationsschleifen durchgeführt werden müssen

Die Prozessoptimierung „Reihenfolge von Aktivitäten ändern“ beschleunigt die Nutzbarkeit eines Produktionsbereichs. Die Änderung der Reihenfolge der in Abbildung 4-1 dargestellten anderen Aktivitäten mit dem Prozessschritt 3 erhöht die Effizienz des oberen Bereichs. Die Prozessoptimierung hat damit direkten Einfluss auf die Reihenfolgenplanung.

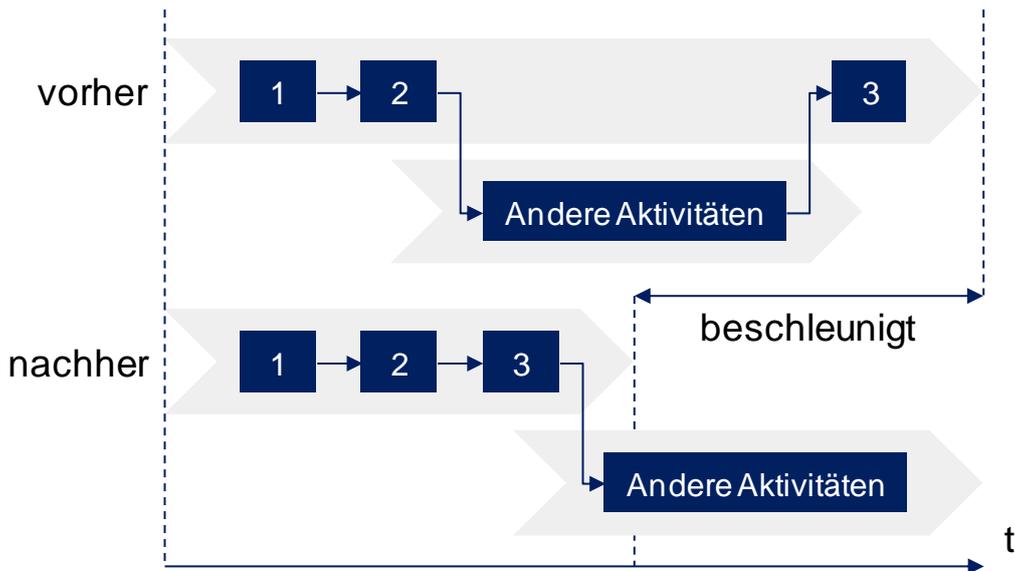


Abbildung 4-1: Reihenfolge von Aktivitäten ändern (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 487)

Das „Eliminieren von Aktivitäten“ kann durchgeführt werden, wenn sichergestellt ist, dass die Funktionalität und Qualität trotz des Eliminierens erreicht wird. In Abbildung 4-2 ist beispielhaft das Eliminieren von Prozessschritt 4 und 5 dargestellt.

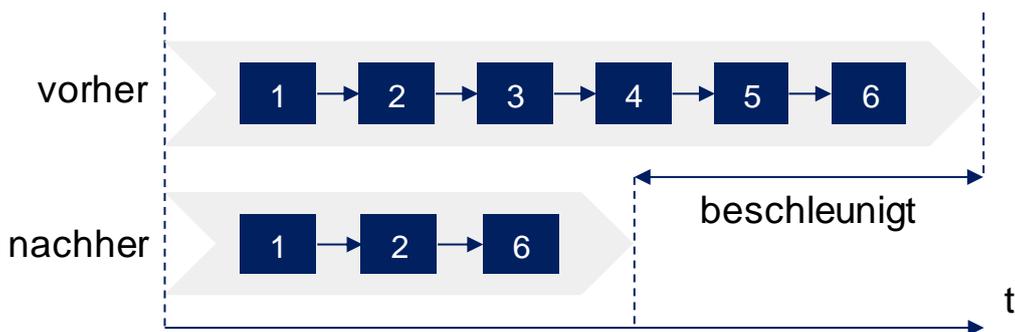


Abbildung 4-2: Eliminieren von Aktivitäten (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 487)

Beim „Zusammenfassen von Aktivitäten“ kann zum Beispiel durch Skaleneffekte oder durch eine Reduktion von Schnittstellen ein positiver Effekt auf die gesamte Durchlaufzeit erreicht werden. In Abbildung 4-3 ist das Zusammenfassen von Prozessschritt 1 und 2 sowie von Prozessschritt 3 und 4 dargestellt.

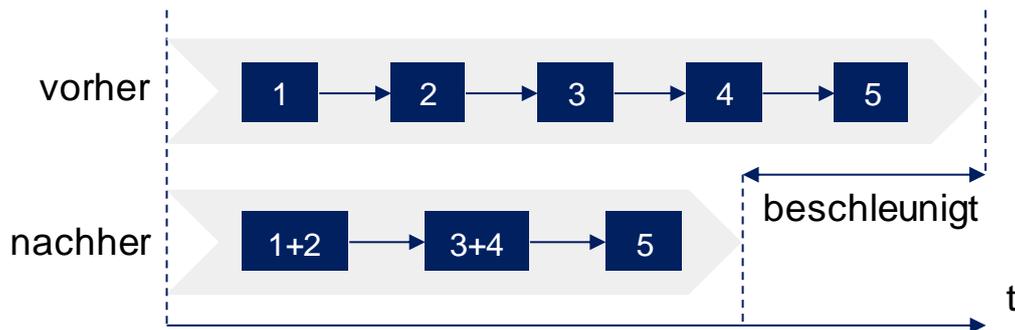


Abbildung 4-3: Zusammenfassen von Aktivitäten (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 487)

Das „Auslagern von Aktivitäten“ bietet sich an, wenn zum Beispiel Hilfsprozesse effizienter von externen Dienstleistern durchgeführt werden können. In Abbildung 4-4 wurden die Prozesse 2 und 3 ausgelagert. Damit entsteht ein freier Bereich zwischen Prozessschritt 1 und 4, der für andere Aktivitäten genutzt werden kann.

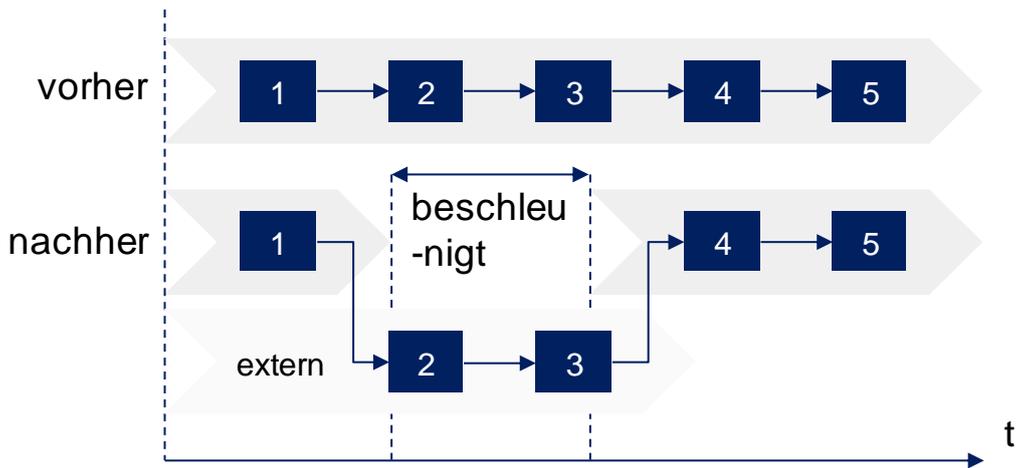


Abbildung 4-4: Auslagern von Aktivitäten (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 487)

Das „Vereinfachen von Aktivitäten“ ermöglicht eine Verkürzung spezieller Prozesse zur Durchlaufzeitreduzierung. Dies kann einerseits durch das Reduzieren der Prozesse auf das Wesentliche oder durch arbeits-erleichternde Maßnahmen geschehen. Prozess 1 und 2 werden in Abbildung 4-5 reduziert, sodass ein beschleunigter Prozess entsteht.

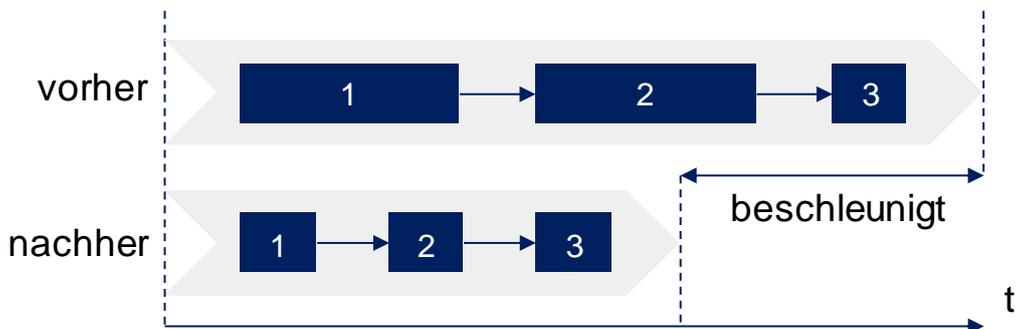


Abbildung 4-5: Vereinfachen von Aktivitäten (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 487)

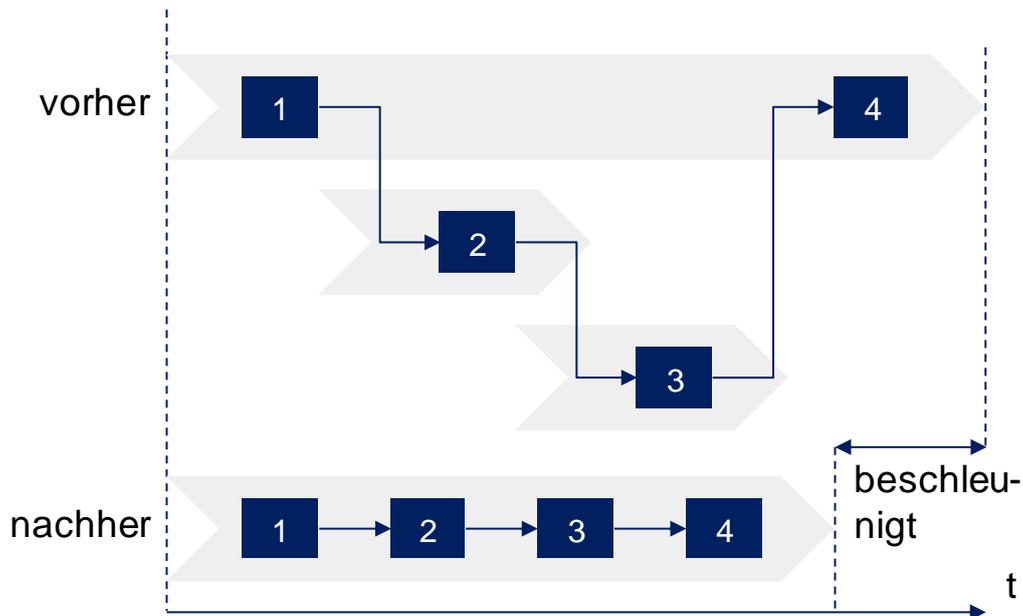


Abbildung 4-6: Abbau von Schnittstellen (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 487)

Der „Abbau von Schnittstellen“ erlaubt oftmals eine Reduzierung der Warte- und Übergabezeiten und verkürzt damit Problemlösungen. In Abbildung 4-6 sind die Schnittstellen zwischen drei Bereichen reduziert.

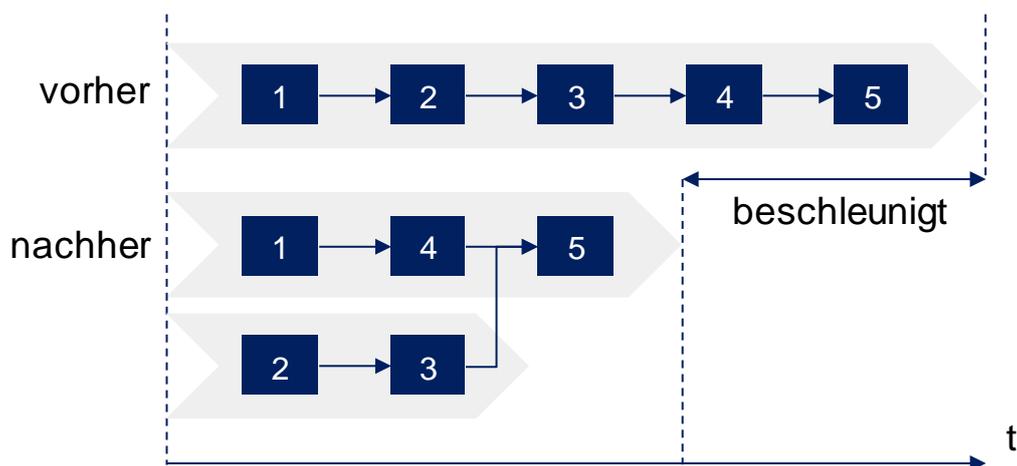


Abbildung 4-7: Parallelisieren von Aktivitäten (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 487)

Die Prozessoptimierung „Parallelisieren von Aktivitäten“ ermöglicht eine kürzere Durchlaufzeit bei gleichbleibendem Arbeitsaufwand. Durch das Parallelisieren werden in Abbildung 4-7 Prozessschritt 2 und 3 parallel zu 1 und 4 durchgeführt. Dadurch reduziert sich die gesamte Durchlaufzeit um die Dauer von Prozessschritt 2 und 3.

Der Einsatz und die Auswahl von heuristischen Prozessoptimierungen ist damit von der Expertise von Prozessexperten abhängig, wodurch eine Lösungsfindung im Vergleich zu einer Simulation stark vereinfacht wird. Gleichzeitig birgt diese Vereinfachung jedoch stets das Risiko einer Fehleinschätzung und der damit verbundenen Verlängerung der Durchlaufzeit. Ertel nennt diesbezüglich die künstliche Intelligenz als Möglichkeit, die Heuristiken im Problemlösungsprozess zu modellieren (Ertel, W., S. 66).

Nach Heinsohn und Socher muss jedoch gerade bei dem Einsatz von Heuristiken als Problemlösungsstrategie besonderes Augenmerk auf die Unsicherheitsmaße und das Inferenzverfahren gelegt werden (Heinsohn, J. & Socher, R., S. 201–202). Bensmaine et al. verweisen zudem beim Verändern von Produktionssystemen auf das Sicherstellen der Robustheit der verwendeten Heuristik (Bensmaine, A., Dahane, M. & Benyoucef, L., S. 3593).

Nach Literatureinschätzung eignen sich die heuristischen Prozessoptimierungen zwar zur Modellierung von Inbetriebnahmeprozessen, sie erlauben jedoch nicht die Modellierung von Fehlern. Nach Ertel bietet sich der Einsatz von künstlichen Intelligenzen in der Modellierung von Heuristiken an und schafft somit die Möglichkeit, deren Modellierung computerbasiert durchzuführen. Aus diesem Grund sollen im nächsten Kapitel Analysemethoden für die Prozessoptimierung erörtert werden.

5 Analysemethoden für die Prozessplanung

Die im Allgemeinen starke Abhängigkeit der Prozessplanung von Expertenmeinungen in Kombination mit fehleranfälligen Prozessen der Inbetriebnahme im Speziellen ergibt mit den Methoden aus der Literatur keine realitätsnahe Planung. Fehlermöglichkeiten sind in Planungsmethoden nicht abbildbar. Aus diesem Grund werden folgend Analysemethoden vorgestellt, die in der Inbetriebnahme im Maschinenbau einsetzbar sind und die Prozessplanung unterstützen.

Die Basis für die Auswahl der Analysemethode bilden die Anforderungen aus der Inbetriebnahme und Prozessplanung. Diese werden ermittelt und zusammengefasst, während bestehende Ansätze reflektiert werden und deren Anwendbarkeit geprüft wird. Zuletzt findet die Betrachtung der generischen Analysemethoden und der Abgleich mit den Anforderungen statt.

5.1 Anforderungen an Analysemethoden in der Prozessplanung

Die Anforderungen an Analysemethoden in der Prozessplanung lassen sich aus den Ergebnissen der Kapitel 3 und 4 ableiten und bilden die Basis für die Analyse der Inbetriebnahmeprozesse. Danach sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen und im Anschluss zu kombinieren:

Die **Inbetriebnahme** erfordert

- die Modellierung von Fehlern,
- adaptive Methoden aufgrund von kurzen Innovationszyklen und
- Methoden, die Lösungen bei komplizierten Aufgabenstellungen bieten.

Die **Prozessplanung** bedingt

- die Integrierbarkeit von Prozessplänen, die in eine Prozesslandschaft eingebunden werden können,
- die Berücksichtigung von Fehlern und deren Auswirkungen sowie
- die Möglichkeit, Expertenmeinungen zu modellieren.

Die Anforderungen an das Planungsmodell werden im folgenden Kapitel mit bestehenden Prozessplanungsansätzen abgeglichen und deren Anwendbarkeit erörtert.

5.2 Reflexion bestehender Ansätze in der Prozessplanung

Xu et al. fassen die Einsatzgebiete der Prozessplanungsmethoden zusammen. Mit Blick auf die Inbetriebnahme sind vorteilhafte Einsatzgebiete unter anderem die Planung der Produktionsabfolge für Teile, die Einrichtungsplanung für die Fertigung von Teilen, die Entscheidungsmodelle und die integrierte Prozessplanung mit entsprechendem Wissensmanagement. Nach Xu et al. ist eine dafür eingesetzte Methode zum Beispiel die Feature-based Technology, die anhand der Bauteilabmaße den Prozessplan erstellt. Sie arbeitet mit einem CAD-Modell und lässt sich auf Bauteilproduktionen anwenden (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 3ff).

Neuronale Netze und Genetische Algorithmen basieren auf einer großen Datenbasis. Für den Aufbau eines sicher funktionierenden Systems müssen neuronale Netze aufwändig eingelernt werden. Lediglich der Prozess des Einlernens kann dabei von Experten unterstützt werden. Die Genetischen Algorithmen verwenden Suchstrategien, um aus einer Datenbasis die Lösung des spezifischen Problems abzuleiten. (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 6ff)

Beide Technologien sind aufgrund der Datenbasis und der begrenzt möglichen Integration von Expertenwissen nur eingeschränkt geeignet.

Expertensysteme, die meistens auf Basis von Geometriedaten bzw. der strukturierten Sammlung von Daten arbeiten, können die Expertenmeinung in einen Prozessplan regelbasiert umsetzen. Die meisten Expertensysteme arbeiten auf Basis von Geometriedaten bzw. strukturierten Sammlungen von Daten. Sie sind breit einsetzbar und mit anderen Systemen verknüpfbar (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 5f). Die Fuzzy Set Theory bietet die Möglichkeit, Unsicherheiten zu modellieren. Dabei wird das Expertenwissen in Formeln umgewandelt und nach der Unsicherheit bewertet. Fuzzy Sets lassen sich mit anderen Methoden wie beispielsweise den Genetischen Algorithmen und Petri Netzen bzw. Bayeschen Netzen kombinieren (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 9).

Petri Netze bzw. Bayesche Netze erlauben die Integration von Expertenwissen in die Planung und die Bewertung mit Wahrscheinlichkeiten. Weiterhin sind sie eine sehr flexible Lösung und mit Entscheidungsknoten und Nutzwerten einsetzbar. (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 9ff)

Nach Poeschl et al. sind Fuzzy Sets in die Netzerstellung von Bayeschen Netzen integrierbar und bieten in dem Zusammenhang eine Möglichkeit zur Robustheitsanalyse des Prozessplans (Poeschl, S. *et al.*, S. 549). Weiterhin ist die Abbildbarkeit von Expertenwissen effizient in Fuzzy Sets möglich (Poeschl, S. *et al.*, S. 555).

Zusammenfassend nennen Xu et al., dass die Künstliche Intelligenz generell eine Methode zur Optimierung oder Erstellung von Prozessplänen ist (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 25). Im nächsten Kapitel wird vorgestellt, warum Bayesche Netze das präferierte Tool für ein Prozessplanungsmodell sind und wie eine Möglichkeit zur Beherrschung von Fehlern aussehen kann.

5.3 Reflexion generischer Analysemethoden

In Kapitel 5.2 werden vor allem Neuronale Netze, Bayesche Netze, regelbasierte Expertensysteme und Fuzzy Sets als Unterstützung für die Prozessplanung genannt.

Bayesche Netze sind im Vergleich zu neuronalen Netzen in der Nutzung und Anpassung weniger anspruchsvoll und bieten die Möglichkeit, die Integration von Wissen besser zu steuern als dies bei neuronalen Netzen der Fall ist. Diese benötigen beispielsweise immer einen verifizierten Datensatz zum Lernen. Das Bayesche Netz kann jedoch manuell in einzelnen Knoten verändert und angepasst werden (Perzyk, M., Biernacki, R. & Kochański, A., S. 1435).

Im Gegensatz zu Neuronale Netzen sehen Correa et al. zudem den positiven Effekt von Bayeschen Netzen darin, dass ihre Topologie von menschlichen Bedienern verstanden wird (Correa, M., Bielza, C. & Pamies-Teixeira, J., S. 7278). Da in Bayeschen Netzen besonders einfach Expertenwissen in das System integrierbar sein muss und in der Projektierung noch keine verknüpfte Datengrundlage vorhanden ist, ergeben sich gerade für die Anforderungen der Inbetriebnahme im großen Umfang Einsatzmöglichkeiten der Bayeschen Netze.

Im Vergleich von Bayeschen Netzen mit regelbasierten Expertensystemen nennen Kobbacy et al., Kjræulff und Madsen Vorteile der Bayeschen Netze. Unter anderem sind vor allem die Möglichkeit, wahrscheinlichkeitsbasierte Zusammenhänge abzubilden und damit einhergehend die durchgängig nachvollziehbare Netzstruktur Vorteile der Bayeschen Netze (Kobbacy, K.A.H., McNaught, K. & Chan, A., S. 735; Kjræulff, U.B. & Madsen, A.L., S. 8). Regelbasierte Systeme weisen starke Einschränkungen in der Wissensdarstellung und der Problemlösung unter Unsicherheit auf (Kjræulff, U.B. & Madsen, A.L., S. 8). Damit zeigt sich ein höheres Potenzial von Bayeschen Netze für die

Prozessplanung in der Inbetriebnahme, verglichen zum Potenzial von regelbasierten Expertensystemen.

Fuzzy Sets können hingegen mit den Bayeschen Netzen kombiniert werden, und werden aus diesem Grund in einem gesonderten Kapitel erörtert.

Die Literaturanalyse hat gezeigt, dass Bayesche Netze ein großes Potenzial bergen, ein Prozessplanungsmodell für die Inbetriebnahme zu erstellen. Auch die Option, Fehler über ein Bayesches Netz zu modellieren, ist aufgrund des wahrscheinlichkeitsbasierten Aufbaus möglich, da Fehler in der Realität statistisch messbar sind (Poeschl, S., Wirth, F. & Bauernhansl, T). Die Methode der Fuzzy Sets kann zudem helfen, die Unsicherheit von Expertenwissen zu berücksichtigen (Poeschl, S. *et al.*, S. 549).

Aufgrund der Anforderung, Fehler im System zu modellieren, werden zunächst Methoden zum Risikomanagement erörtert. Im Anschluss werden die Bayeschen Netze als Methode begründet und nochmals mit allen Anforderungen abgeglichen.

5.3.1 Risikomanagement

Das Risikomanagement ist in DIN ISO 31000 beschrieben und in Abbildung 5-1 dargestellt. Es ist nach DIN ISO 31000 eine „koordinierte Aktivität[en] zur Lenkung und Steuerung einer Organisation in Bezug auf Risiken“ (9). Zunächst soll ein Zusammenhang des Risikomanagements zu technischen Systemen erstellt werden. Anschließend folgen drei Schritte der Risikobeurteilung:

1. die Risikoidentifikation,
2. die Risikoanalyse und
3. die Risikobewertung.

Der letzte Schritt im Risikomanagement ist die Risikobewältigung. Da alle Prozesse kontinuierlich überwacht und überprüft werden müssen, ist Expertenwissen und eine gute Kommunikation von entscheidender Bedeutung.

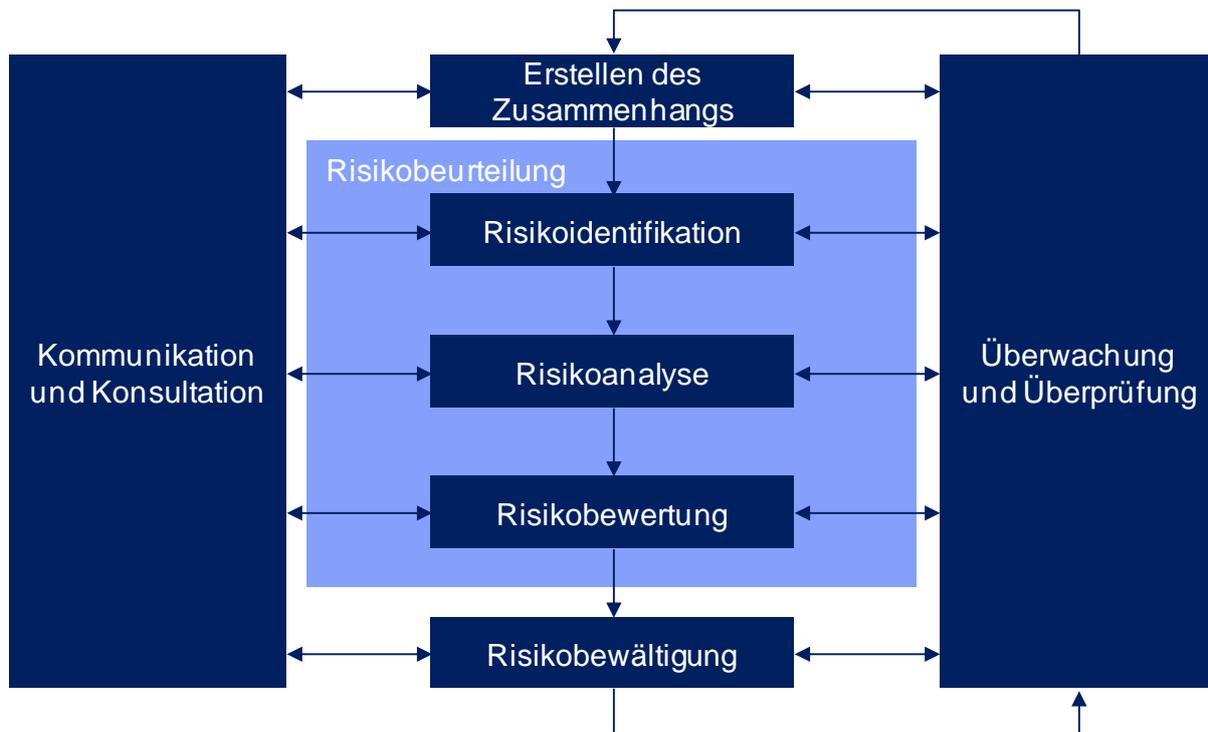


Abbildung 5-1: Der Risikomanagementprozess (DIN EN ISO 12100-1)

Vom Risikomanagementprozess nach DIN ISO 31000 abgeleitet, kann ein reduzierter Risikomanagementprozess beschrieben werden. Der reduzierte Risikomanagementprozess ist ein Kreislauf, welcher meistens mit der Risikoidentifikation beginnt und mittels einer Risikobewertung und -bewältigung durchgeführt wird. Anschließend kann das Risikomonitoring verhindern, dass trotz der Bewertung und der Bewältigung des Risikos ein Fehler auftritt (vgl. Abbildung 5-2).

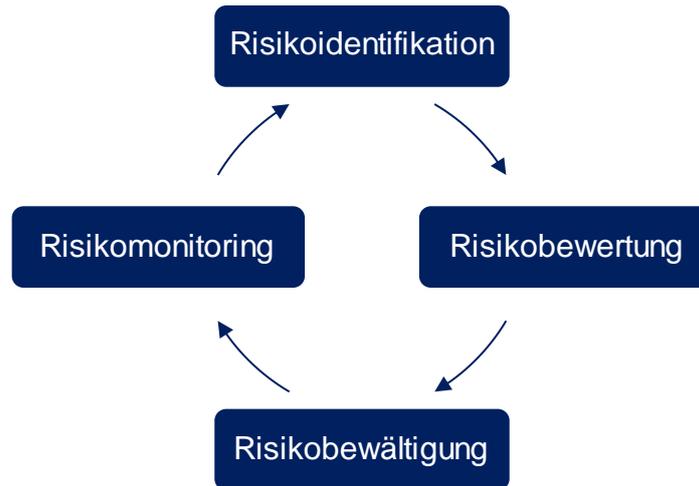


Abbildung 5-2: Reduzierter Risikomanagementprozess (nach DIN EN ISO 12100-1)

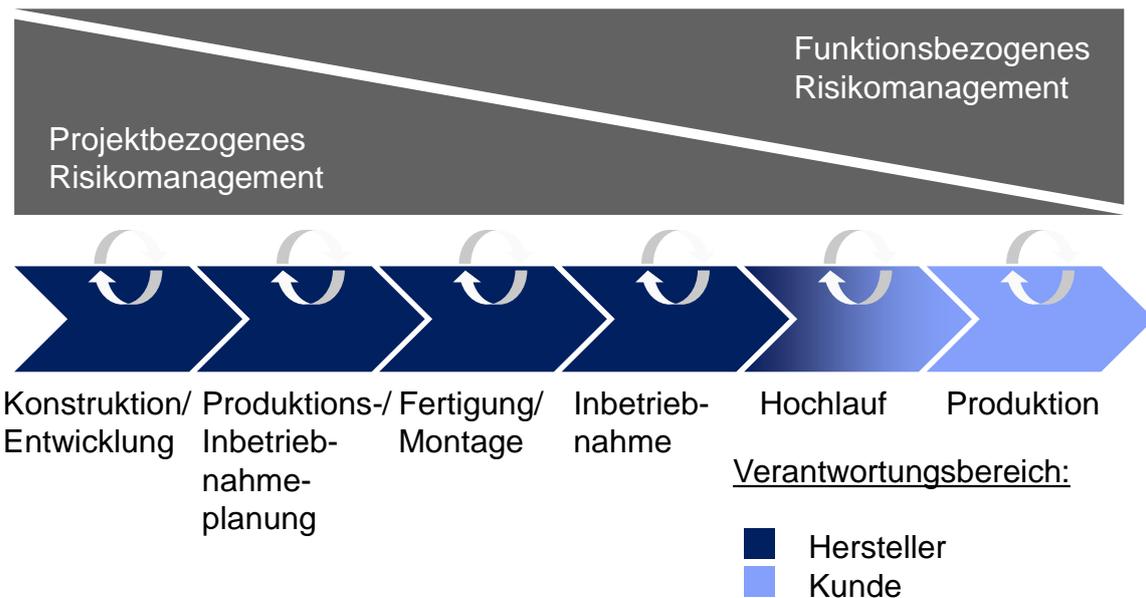
Kempf fasst Methoden zur Risikoanalyse zusammen, die auch in einen Risikomanagementprozess integrierbar sind. Unter anderem nennt er die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis FTA), die Ereignisablaufanalyse (Event Tree Analysis ETA) und die am weitesten verbreitete Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis FMEA) (Kempf, M., S. 86).

Die Fehlerbaumanalyse ist eine Möglichkeit, das Ausfallsrisiko einer technischen Anlage zu beschreiben (Herb, R., Herb, T. & Kratzer, M; Liggesmeyer, P. & Mäckel, O; Bedford, T. & Cooke, R.M; Andrews, J. & Dugan, J.). Wobei die Ereignisablaufanalyse die Fehlerfolgen eines bereits aufgetretenen Fehlers bewertet (Bedford, T. & Cooke, R.M.). Die FMEA hingegen bewertet die Fehler mit einer Entdeckungswahrscheinlichkeit und einer Auftretenswahrscheinlichkeit, sodass ein umfassenderes Bild des Risikos entsteht (Hawkins, P.G. & Woollons, D.J).

Alle Risikoanalysemethoden berufen sich auf Fehler-Ursache-Wirkbeziehungen und bilden in der Regel Baumstrukturen. Die kausalen Wirkbeziehungen zwischen zwei oder mehreren Ereignissen werden nicht bewertet. Aus diesem Grund ist eine realitätsnahe Abschätzung der Folgen auf einen Produktionsprozess nicht möglich. Nach Kempf kann der Einsatz von Bayeschen Netzen die Lösung dieser Problemstellung unterstützen. (Kempf, M., S. 86)

Schlick et al. bestätigen, dass alle Risikomanagementmethoden in einer Baumstruktur dargestellt werden und damit die Möglichkeit gegeben ist, sie mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit zu verknüpfen. (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R.)

Nagel wendet das Risikomanagement direkt auf den Produktentstehungsprozess an und teilt das Risikomanagement in zwei Bereiche auf, das projektbezogene und das funktionalbezogene Risikomanagement. Am Anfang des Projekts dominiert das projektbezogene Risikomanagement, während über den Verlauf des Projekts hinweg das funktionalbezogene Risikomanagement an Bedeutung zunimmt. Gleichzeitig geht die Maschine und damit auch die Verantwortung für das Risikomanagement vom Hersteller an den Kunden über. Zudem ist es von grundlegender Bedeutung, jeden Schritt im Produktentstehungsprozess mit dem Risikomanagement abzugleichen und den oben vorgestellten, reduzierten Risikomanagementprozess anzuwenden. (Nagel, J., S. 142)



*Abbildung 5-3: Strukturierung des Risikomanagements im Anlauf
(Wiendahl, H.-P., Hegenscheidt, M. & Winkler, H; Nagel, J., S. 142; Schuh, G., S. 355)*

Das Risikomanagement ist ein erforschter und beschriebener Prozess, dessen Ziel es ist, Fehler zu minimieren, abzuschätzen und Fehler-Ursache-Wirkbeziehungen abzuleiten. Über die genannten Methoden zeichnet sich jedoch kein realitätsnahes Bild eines Inbetriebnahme-prozesses ab. Damit lassen sich auch keine Rückschlüsse auf mögliche Optimierungen der Inbetriebnahme ziehen. Aus diesem Grund müssen die Risikomanagementmethoden mit der Prozessplanung verknüpft werden. Nach Kempf bieten Bayesche Netze das Potenzial, diese Lücke zu schließen.

5.3.2 Bayesche Netze

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung ist Teil des Gebiets der künstlichen Intelligenzen und nimmt an Bedeutung stetig zu. Bayesche Netze schließen aus Informationen folgerichtige Ergebnisse und sind deswegen wichtige Vertreter der künstlichen Intelligenzen (Ertel, W., S. 125). Ein Bayesches Netz ist ein graphisches Modell zur Darstellung von bedingten Abhängigkeiten eines Sets aus zufälligen Variablen (Ghahramani, Z., S. 11) .

Ein Bayesches Netz wird durch einen azyklisch gerichteten Graphen (directed acyclic graph – DAG) dargestellt, der die Beziehung zwischen Knoten festlegt. In den Knoten wird die Faktorisierung der Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Verknüpfungen festgelegt und die Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmter Ereignisse hinterlegt (Sammut, C. & Webb, G.I., S. 81; Kjræulff, U.B. & Madsen, A.L., S. 8).

Ein DAG für $\mathcal{G} = (V, E)$, in welchem V eine Menge von Knoten und E eine Menge von gerichteten Verknüpfungen sind, kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(X_V)$ mit einer Menge von meistens diskreten Variablen X_V nach der Formel

$$P(X_V) = \prod_{v \in V} P(X_v | X_{pa(v)}) \quad (1)$$

faktoriert werden. $X_{pa(v)}$ beschreibt dabei die Menge der Variablen X_V für jedes $v \in V$ (nach Kjræulff, U.B. & Madsen, A.L., S. 8).

Das Bayesche Gesetz beschreibt die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(z|w)$, welche von der Wahrscheinlichkeit $P(w|z)$

$$P(z|w) = \frac{P(z)P(w|z)}{P(w)} \quad (2)$$

für w wenn z eintritt und der a-priori-Wahrscheinlichkeiten $P(w)$ und $P(z)$ für die Ereignisse w und z (Sammur, C. & Webb, G.I., S. 74). Damit ist es möglich, die bedingte Wahrscheinlichkeit zweier Ereignisse auf der Basis von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu errechnen und im weiteren Schritt ein Netz aus bedingten Wahrscheinlichkeiten zu generieren.

Forschungsbeiträge zu diesem Thema knüpfen an die Anwendung in der Produktion an und stellen Möglichkeiten zur Dateneinbindung und -analyse vor. So stellen Liu und Jin beispielsweise einen Ansatz zur Fehlerdiagnose in Montageprozessen vor. Dabei nutzen sie gemessene Daten, um das Modell an die Realität anzupassen (Liu, Y. & Jin, S., S. 1236). Der Ansatz von Liu und Jin zeigt die Möglichkeit zur Fehleranalyse, sie binden jedoch keine Verknüpfung zum Prozessplan in ihr Modell mit ein.

Ghahramani weist auf die Fähigkeit eines Bayeschen Netzes hin, ein lernendes Netz aufzubauen, um bestehende Daten bei einer bestehenden Modellstruktur zu modellieren (Ghahramani, Z., S. 14). Weiterhin verdeutlichen Ghahramani und Spiegelhalter, dass durch die bedingten Abhängigkeiten zwischen mehreren Variablen der Einsatz von Bayeschen Netzen in Expertensystemen erlaubt ist (Spiegelhalter, D.J. *et al.*, S. 244; Ghahramani, Z., S. 14). Außerdem können Bayesche Netze Expertenwissen modellieren und gleichzeitig von Anwendungsfällen lernen (Perzyk, M., Biernacki, R. & Kochański, A; Daly, R., Shen, Q. & Aitken, S.). Nembhard und Nembhard nutzen diese Eigenschaft und zeigen ein Beispiel, wie mit Bayeschen Netzen Übergangsprozesse vorhergesagt werden können (Nembhard, H.Black & Nembhard, D.A., S. 446).

Dabei finden Bayesche Netze nach der Zusammenfassung von Daly, Shen und Aitken in vielen anwendungsnahen Bereichen ihren Einsatz, wie zum Beispiel der Medizin (Daly, R., Shen, Q. & Aitken, S., S. 106).

Besonders in der Vorhersage von zukünftigen Ereignissen und in der Modellierung des menschlichen Verständnisses werden die Stärken von Bayeschen Netzen ersichtlich (Daly, R., Shen, Q. & Aitken, S., S. 107). Kempf und Wahl nennen in diesem Zusammenhang Anwendungsgebiete der Risikoeinschätzung mit Bayeschen Netzen (Kempf, M. & Wahl, V; Kempf, M.). Zusätzlich beschreibt Xu et al. den Nutzen von Bayeschen Netzen in der Prozessplanung, da die Netze das Wissen von Experten aufnehmen und die Fertigkeit des Problemlösens eines menschlichen Experten in einem begrenztem Feld simulieren können (Xu, X., Wang, L. & Newman, S.T., S. 24). Jedoch ist es notwendig, das Expertenwissen aufwändig und unter Umständen fehlerbehaftet, in wahrheitsbasierte Kennwerte zu übersetzen. Während neuronale Netze automatisiert erstellt und eingelernt werden können, muss die Struktur des Bayeschen Netzes von Experten ausgearbeitet werden.

Kiritsis beschreibt das Potenzial wissensbasierter Systeme in der Produktionsplanung im Speziellen (Kiritsis, D., S. 259). Kobbacy et al. untermauern dies und erläutern, dass Bayesche Netze besonders in unsicheren Umgebungen einsetzbar sind (Kobbacy, K.A.H., McNaught, K. & Chan, A., S. 735).

In Tabelle 5-1 sind Veröffentlichungen mit Optimierungsansätzen für die Produktion unter Zuhilfenahme der Bayeschen Netze zusammengefasst. Dabei werden die Veröffentlichungen nach Stefik et al. in die Bereiche Interpretation, Diagnose, Überwachung, Prognose, Planung, Konstruktion und Beratung kategorisiert (Stefik, M. et al., S. 135–137; Mertens, P., S. 393).

Tabelle 5-1: Bayesche Netze in der Produktion 2000 – 2016 (Poeschl, S. et al.)

Veröffentlichung	Eignungskriterien						
	Interpretation	Diagnose	Überwachung	Prognose	Planung	Konstruktion	Beratung
Rodrigues, M.A. <i>et al.</i>	X	X					
Bouissou, M. & Pourret, O.		X					
Ramesh, R. <i>et al.</i>				X			
Dey, S. & Stori, J.A.		X	X				
Romessis, C. & Mathioudakis, K.		X					
Li, J. & Shi, J.			X				
Masruroh, N.A. & Poh, K.L.					X		
Pradhan, S. <i>et al.</i>		X					
Garcia, J.Isidro, Gomez Morales, R.A. & Miyagi, P.Eigi		X	X				
Huang, Y. <i>et al.</i>		X					
Mechraoui, A., Medjaher, K. & Zerhouni, N.		X					
Mengshoel, O.J., Darwiche, A. & Uckun, S.		X					
Penya, Y.K., Bringas, P.G. & Zabala, A.				X			
Correa, M., Bielza, C. & Pamies-Teixeira, J.			X				
Liu, Y. & Jin, S.		X	X				
McNaught, K.R. & Zagorecki, A.				X			
Jones, B. <i>et al.</i>	X				X		
Kobbacy, K.A.H., McNaught, K. & Chan, A.		X					X
Mansour, M.M., Wahab, M.A. A. & Soliman, W.M.		X					
Tobon-Mejia, D.A., Medjaher, K. & Zerhouni		X		X			
Yang, L. & Lee, J.		X		X			
Liu, Y. & Jin, S.		X					
Ben Said, A. <i>et al.</i>	X			X	X		
Hamamoto, K. <i>et al.</i>		X					
Anzahl	3	16	5	6	3	0	1

Der größte Teil der Veröffentlichungen bezieht sich auf Forschungen im Diagnosebereich, gefolgt von den Themen Überwachung und Prognose. Die Fachgebiete Planung und Interpretation schließen sich an. Schwächen weist das Bayesche Netz in den Bereichen Konstruktion, Beratung und Interpretation auf. Werden die Veröffentlichungen im Bereich der Diagnose und der Planung betrachtet, ist zu erkennen, dass keine der Veröffentlichungen beide Bereiche abdeckt. Zudem gibt es auch keine Überschneidungen der Bereiche Diagnose und Prognose, die gemeinsam mit der Planung für die Prozessplanung von entscheidender Bedeutung sind. Wie in der Herausforderungsanalyse der Prozessplanung nachgewiesen, benötigt die Möglichkeit, Fehler in Prozessplänen abzubilden, die Fähigkeiten der Diagnose und Prognose. Fehler müssen auf ihren Ursprung diagnostizierbar und in ihren Auswirkungen prognostizierbar sein. Damit ist im Anwendungsbereich der Bayeschen Netze eine Forschungslücke nachgewiesen.

5.3.3 Datenerhebung

Aufgrund der geringen Stückzahlen im Maschinenbau gibt es keine oder nur begrenzt, statistische Auswertungen. Aus diesem Grund ist die Datenerhebung im Maschinenbau besonders in Bereichen mit geringen Produktionsstückzahlen auf das Expertenwissen angewiesen. Dieses ist jedoch immer subjektiv und zu Teilen vage (Jones, B. *et al.*, S. 268; Poeschl, S. *et al.*, S. 552). Entscheidungsumgebungen und Datenquellen sind nach Zhang *et al.* oftmals mit Unsicherheit verbunden. Diese Unsicherheit muss in der Anwendung berücksichtigt werden (Krause, P. & Clark, D; Kjræulff, U.B. & Madsen, A.L; Zhang, G., Lu, J. & Gao, Y.). Aus diesem Grund schlagen Poeschl *et al.* den Einsatz von Fuzzy Sets in der Prozessplanung auf Basis von Expertenwissen vor und verdeutlichen den effektiven Einsatz an einem Fallbeispiel (Poeschl, S. *et al.*, S. 554f).

Zadeh erläutert erstmals 1965 den Ansatz der Fuzzy Sets (Zadeh, L.A., S. 338–353). Dabei ist ein Fuzzy Set eine Klasse von Objekten, welche durch eine charakteristische Funktion beschrieben ist und welche den beeinflussenden Wert zwischen null und eins variiert (Zadeh, L.A., S. 338).

Damit erlaubt die Anwendung der Fuzzy Sets eine Nutzung von linguistischen Ausdrücken wie „sehr niedrig, niedrig, hoch und sehr hoch“, um diese in mathematische Ausdrücke umzuwandeln. Somit können Fuzzy Sets auch vage Einschätzungen abbilden und unterstützen Experten bei der Beurteilung von Eintrittswahrscheinlichkeiten. (Yuhua, D. & Datao, Y., S. 86)

Nach Zadeh ist ein Fuzzy Set A in X beschrieben durch die Mitgliedschaftsfunktion $f_A(x)$, die jeden Punkt in X eine Reelle Zahl im Intervall $[0,1]$ zuordnet. Der Wert von $f_A(x)$ mit x beschreibt den Zugehörigkeitsgrad von x in A (Zadeh, L.A., S. 339). Damit wurde der menschliche Einsatz vor allem in der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse erfolgreich mit berücksichtigt (Liang, G.-S. & Wang, M.-J.J; Wang, J., Yang, J.B. & Sen, P; Cai, K.-Y; Yuhua, D. & Datao, Y.).

6 Generisches Prozessmodell

Die Literaturrecherche zur Prozessplanung und deren Analysemethoden hat Forschungslücken aufgezeigt. Gleichwohl gibt es Ansätze generischer Analysemethoden, die ein Potenzial für eine Anwendung in der Prozessplanung in Inbetriebnahmeprozessen aufzeigen. In diesem Kapitel werden zuerst Entwicklungsanforderungen an ein generisches Prozessmodell definiert, woraus schließlich eine Modellierungsmethode abgeleitet wird. Als Entscheidungsgrundlage für das Entwickeln eines effizienten Prozesses soll die Modellierungsmethode durch eine Bewertungsmethode unterstützt werden. Aufgrund des geringen Wiederholcharakters im Maschinenbau wird abschließend eine Validierungsmethode entwickelt, wodurch die Validität aller Prozessvarianten sichergestellt wird.

6.1 Entwicklungsanforderungen an ein generisches Prozessmodell

Ausgehend von den Forschungsfragen, der Literaturrecherche und logischen prozessualen Zusammenhängen, werden Entwicklungsanforderungen für ein generisches Modell definiert.

In Abbildung 6-1 sind die Entwicklungsanforderungen im Produktentstehungsprozess auf technisch-organisatorischer Ebene dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.

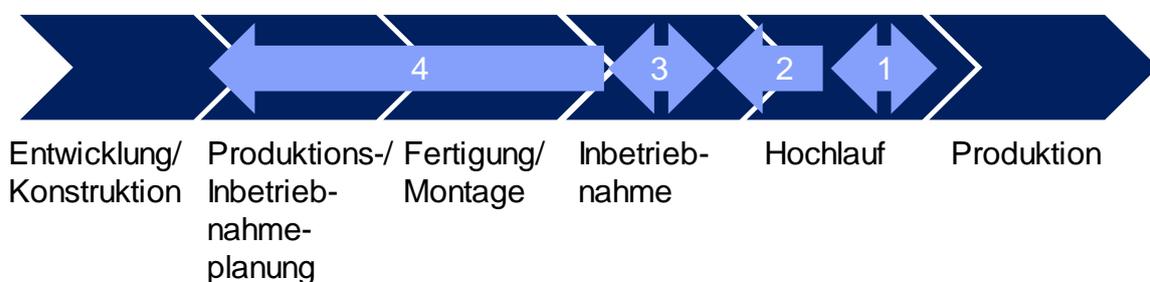


Abbildung 6-1: Entwicklungsanforderungen (1 bis 4) zur Reduzierung der Durchlaufzeit über den Produktentstehungsprozess

Das Ziel im Produktentstehungsprozess ist es, die frühestmögliche Übergabe der Maschine im Hochlauf an den Kunden zu ermöglichen. Dieser Übergabetermin soll im Vergleich zum Prozessstart nicht nur früher, sondern auch planbarer und damit mit einem geringeren Risiko stattfinden. Die aus der Forschungsfrage abgeleitete Anforderung zur Reduzierung der Durchlaufzeit muss aus diesem Grund vom generischen Modell ermittelt und dargestellt werden.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Entwicklung beschrieben. Der Doppelpfeil eins deutet auf die Entwicklungsanforderung 1 hin und beschreibt eine Durchlaufzeitreduzierung innerhalb des Hochlaufs. Der Hochlauf ist aufgrund der Anordnung nach der Inbetriebnahme durch weniger Fehler als während der Inbetriebnahme gekennzeichnet, besteht aber, wie beschrieben, aus vergleichbaren Tätigkeiten wie die Inbetriebnahme. Aufgrund der vergleichbaren Aufgabenstellung des Hochlaufs und der Inbetriebnahme sind Entwicklungsanforderung 1 und 3 mit ähnlichen Methoden optimierbar.

Entwicklungsanforderung 2 ist der Transfer von Prozessen vom Hochlauf in die Inbetriebnahme, die ausschließlich vom Hersteller der Maschine verantwortet wird und eventuell sogar komplett in der Fabrik des Herstellers stattfindet. Aufgrund fehlender Anfahrtswege, einer höheren Expertenverfügbarkeit, einer besseren Teileverfügbarkeit und einem geringeren Abstimmungsaufwand mit dem Kunden ist das Potenzial für eine Durchlaufzeitreduzierung in der Inbetriebnahme höher als im Hochlauf. Entwicklungsanforderungen 1 und 3 zielen wiederum auf die Effizienzsteigerung in der Inbetriebnahme und im Hochlauf.

Die vierte Entwicklungsanforderung ist die Aufwandsreduzierung der Inbetriebnahme durch Simulation in der Konstruktion sowie Entwicklung des Maschinenherstellers. Dadurch werden Beschaffungsaufwände, Testaufwände und hohe Neubeschaffungszeiten von fehlerhaft

entwickelten Bauteilen reduziert. Die in der Literatur vorherrschende Methode ist die virtuelle Inbetriebnahme, die bereits in Kapitel 3 beschrieben wurde.

Zusammengefasst überschneiden sich die ersten drei Entwicklungsanforderungen. Lediglich die vierte Entwicklungsanforderung nutzt die Simulation als Methode, Inbetriebnahmerisiken im Produktentstehungsprozess frühzeitig zu reduzieren. Damit steigt jedoch der Aufwand der Simulation für komplizierte Produkte und reduziert so das Potenzial zur Effizienzsteigerung.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die ersten drei Entwicklungsanforderungen betrachtet. Für die vierte Entwicklungsanforderung existiert mit der virtuellen Inbetriebnahme eine praxistaugliche Methode. Die weitere Optimierung der virtuellen Inbetriebnahme wird deswegen nicht weiter betrachtet. Wie in der Zielsetzung definiert, ist der Betrachtungsgegenstand der Forschungsarbeit die Prozessplanung, die im nachfolgenden Kapitel in ein Modell übersetzt wird.

6.2 Referenzschema der Prozessplanung

Die Prozessplanung im Maschinenbau auf Basis von Prozesslandschaften erlaubt die Anwendung von Methoden wie dem Critical Path Planning und der heuristischen Prozessoptimierung. Darauf aufbauend lässt sich ein Referenzschema der Prozessplanung beschreiben, das den Ansatz der Prozessplanung zur Effizienzsteigerung von Prozesslandschaften verfolgt.

Die Prozessplanung ist ein wichtiger Weg zur Effizienzsteigerung von Geschäftsprozessen. Finkeisen erläutert in diesem Zusammenhang, dass die Wertschöpfung die entscheidende Kennzahl für Prozessbewertungen ist (Finkeisen, A., S. 201). Damit ist der Fokus auf Geschäftsprozesse gerichtet, welche das Produkt wertsteigernd verändern. Je länger die

Durchlaufzeit der Produkte jedoch wird, desto höher ist die Anzahl der Produkte im Work in Process (WIP), wodurch das gebundene Kapital erhöht wird. Um eine effiziente Wertschöpfung zu gewährleisten, ist es bei gleichem Kapitaleinsatz pro Maschine entscheidend, die Prozessdauern gering zu halten. Selbst bei partiell höherem Kapitaleinsatz in einzelnen Prozessschritten können im weiteren Verlauf effizientere Prozessschritte und damit Kapitaleinsparungen im Gesamtprozess erzielt werden. Der prozessuale Fokus liegt nicht auf der Effizienz einzelner Prozesse, sondern der Effizienzsteigerung der gesamten Inbetriebnahme. Aufgrund der Ausrichtung der Forschungsarbeit an Prozessplanungsmethoden in der Inbetriebnahme wird im Referenzschema der notwendige Ressourceneinsatz betrachtet. Das Ziel ist damit die gesamtheitliche Reduzierung der Ressourcenaufwände und die Reduzierung der Durchlaufzeit. Im Folgenden werden, daran ausgerichtet, eine Modellierungsmethode und ein Prozessmodell entwickelt.

6.3 Deduktion der Modellierungsmethode und des Prozessmodells

Aus den Entwicklungsanforderungen und den Erkenntnissen der Literaturrecherche wird als Modellierungsmethode ein Ansatz der heuristischen Prozessoptimierung gewählt. Schlick beschreibt sieben Veränderungen von Prozessen auf Basis von Prozessfragmenten (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 469 f). Diese Prozessfragmente können anhand ihrer Definition und Beschreibung mit drei Modellgrößen in Verbindung gebracht werden, den Prozessschritten, den Ressourcen und den Zuständen. Somit kann mit Prozessfragmenten im Allgemeinen die Veränderung von Prozessen im ausschließlichen Bezug auf diese drei Modellgrößen dargestellt werden (vgl. Abbildung 6-2). Im Folgenden werden alle Prozessfragmente den einzelnen Modellgrößen zugeordnet und beschrieben. Damit wird ein Modellreferenzsystem aufgebaut, das

die Referenzschemata der Prozessplanung mit Prozessoptimierungen verknüpft.

Ableitung des Modellreferenzsystems zur Prozessoptimierung nach Schlick et al. (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R.):

1. Reihenfolge ändern

Beim Ändern der Reihenfolge werden keine Beziehungen der Modellgrößen verändert, aufgehoben oder erweitert, sondern lediglich Prozessschritte untereinander verschoben.

2. Eliminieren

Das Eliminieren von Prozessschritten ist nur umsetzbar, wenn keine notwendige Beziehung zu den Zuständen der Maschine vorhanden ist und somit das Ziel der Inbetriebnahme nicht verändert wird.

3. Zusammenfassen

Das Zusammenfassen von Aktivitäten erzeugt beim Erreichen desselben oder eines ähnlichen Zustandes Synergieeffekte.

4. Auslagern

Das Auslagern von Aktivitäten wird durchgeführt, wenn Zustände nicht gleichzeitig von anderen Prozessen beeinflusst werden und Ressourcen auslagerbar sind oder mehrmals angeschafft werden können.

5. Vereinfachen

Das Vereinfachen von Aktivitäten ist möglich, wenn ein Prozess Zustände ohne Kundenrelevanz beeinflusst und sich durch das Weglassen des jeweiligen Teilprozesses verkürzt.

6. Abbau von Schnittstellen

Schnittstellen werden abgebaut, wenn zwei Prozesse ähnliche Ressourcen benötigen, jedoch ein dritter Prozess zwischen ihnen durchgeführt wird, welcher eine andere Ressource benötigt.

Diese heuristische Prozessoptimierung bezieht sich rein auf Ressourcen und nicht auf Zielzustände. Die Zielzustände werden mit bestehenden Produktionsansätzen optimiert, deren Betrachtung sich in diesem Ansatz auf die Anordnung im Prozessplan begrenzt.

7. Parallelisieren

Prozesse können parallelisiert werden, wenn sie nicht dieselben Ressourcen benötigen.

8. Substituieren

Prozesse substituieren andere Prozesse, wenn derselbe Zielzustand erreicht wird.

Alle heuristischen Prozessoptimierungen basieren auf Effizienzsteigerungspotenzialen und sind notwendig, aber nicht hinreichend, für eine Optimierung. Trotz des erfolgreichen Einsatzes einer heuristischen Prozessoptimierung ist die Verkürzung der Durchlaufzeit, aufgrund von Fehlern, nicht in jedem Fall erreichbar. Diese Veränderung von Prozessen wird im Ansatz von Schlick et al. von Experten eingeschätzt und ist dadurch subjektiv.

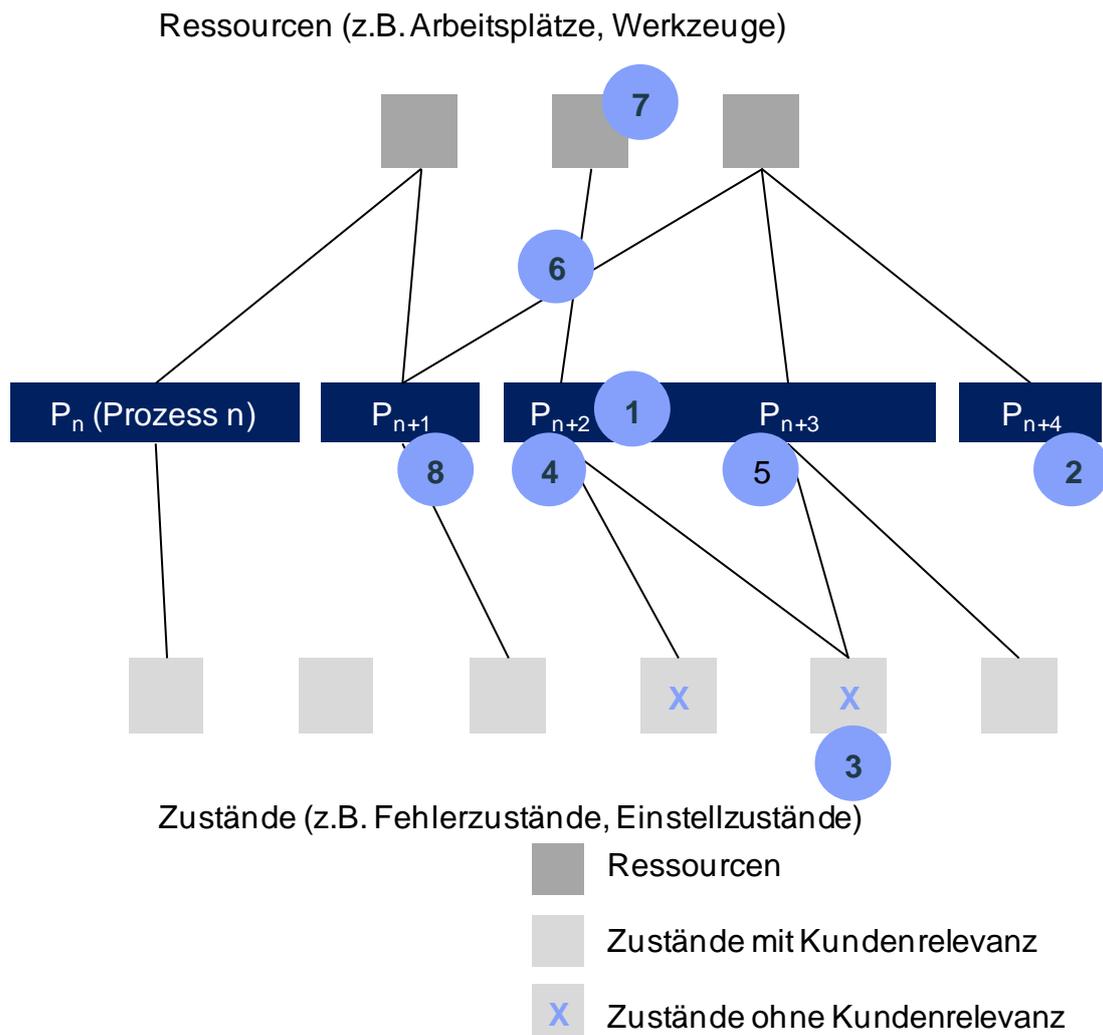


Abbildung 6-2: Modellreferenzsystem der heuristischen Prozessoptimierungen in Relation (in Anlehnung an (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R.))

Das abgeleitete Modellreferenzsystem bietet die Möglichkeit, die heuristischen Prozessoptimierungen zu modellieren. Damit bleibt die Notwendigkeit, eine Bewertungsmethode für das Modellreferenzsystem abzuleiten, um den heuristischen Charakter der Methode zu minimieren. Die Bewertungsmethode muss mit den vorhandenen Daten eine Aussage über die resultierende Durchlaufzeit errechnen.

6.4 Deduktion der Bewertungsmethode

Das Modellreferenzsystem hat das Ziel, Prozessänderungen generisch abzubilden. Jedoch wurde in dem Referenzsystem bisher keine Bewertungsmethode integriert, welche mittels Kennzahlen Rückschlüsse über die Effizienz der Änderung zulässt. In der vorgestellten Methode der heuristischen Prozessoptimierung werden diese Änderungen über Heuristiken bearbeitet. Dadurch entstehen lange Optimierungszyklen unter dem Einfluss subjektiver Meinungen Einzelner. Die Ableitung der Bewertungsmethode erfolgt daher anhand der Problemstellung und der Entwicklungsanforderungen.

Im Kapitel 5 werden Analysemethoden für die Prozessplanung vorgestellt und ausgewertet. Aufgrund der Anforderungen an die Analysemethoden können die Bayeschen Netze als Methode gewählt werden, da sie erlauben, Risiken in Verbindung mit Nutzwerten darzustellen. In diesem Kapitel werden entsprechend der Zielsetzung die Bayeschen Netze deduktiv als Bewertungsmethode in das Modell integriert.

Das Beeinflussen der Durchlaufzeit erfordert die Modellierung der Verknüpfung von Risikofaktoren und Prozessdauern. Die Durchlaufzeiten lassen sich über eine logische Verknüpfung in einer Prozesslandschaft abbilden und über die kritische Pfad-Planung reduzieren. Aufgrund der Eigenschaft von Bayeschen Netzen, Fehleranalysen in einem Netz modellieren zu können, ist es möglich, mit einem Risikofaktor bewertete Durchlaufzeitanteile in bestehende Prozesslandschaften zu integrieren. Damit wird die Durchlaufzeit realistisch auf Basis von Fehlerwahrscheinlichkeiten bewertet und schlussfolgernd auch mit anderen Prozessplänen vergleichbar.

Zeitgleich müssen die Prozessvarianzen für eine terminierbare Fertigstellung reduziert werden. Durch die Darstellung einer Prozesslandschaft mithilfe von Bayeschen Netzen besteht die

Möglichkeit, Risiken und damit Varianzen, die sich auf die Durchlaufzeit auswirken, zu modellieren. Daraus lassen sich die jeweiligen Abhängigkeiten zum kritischen Pfad der Prozesslandschaft herstellen.

Die Durchlaufzeit wird zudem von der Personalkapazität beeinflusst. Ziel ist es deswegen, die Prozessalternativen mit jeweils der gleichen Personalkapazität auszulegen, um vergleichbare Ergebnisse zu erreichen. Der Einsatz von Ressourcen ist in regulären Prozessplänen darstellbar und nicht Teil der Zielsetzung.

Durch den Einsatz von Bayeschen Netzen in Prozesslandschaften gibt es Potenziale, für eine Reduzierung der Durchlaufzeiten, eine Reduzierung von Prozessvarianzen und eine Effizienzsteigerung von Prozessen.

6.5 Entwicklung des generischen Prozessplanungsmodells

Die Entwicklung eines generischen Modells anhand der Modellierungsmethode und der Bewertungsmethode erfolgt über die Erfassung von Parameterkategorien und einer anschließenden Einordnung von Lösungselementen.

Um einen Fehlerprozess zu modellieren, muss eine Lösungsmatrix aufgespannt werden. Die Lösungsmatrix verknüpft das Modellreferenzsystem der Modellierungsmethode mit der Bewertungsmethode.

Die Lösungsmatrix in Abbildung 6-3 ist unterteilt in die Prozesskategorien Standardprozess und Fehlerprozess. Dadurch wird der Lösungsraum aufgespannt und neben der Prozessdauer eine weitere Bewertungskategorie, die Modellierung von Risiken, eingeführt.

Die Bewertung der Prozessdauer von Standardprozessen ist mit existierenden Methoden in Prozesslandschaften zu integrieren. Dafür können die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Optimierungsverfahren angewendet werden. So wird die Prozessdauer des Standardprozesses zum Beispiel mit dem Critical Path Planning auf die minimale

Durchlaufzeit reduziert. Dabei muss die Prozesslandschaft auf den maximal möglichen Parallelisierungsgrad untersucht werden.

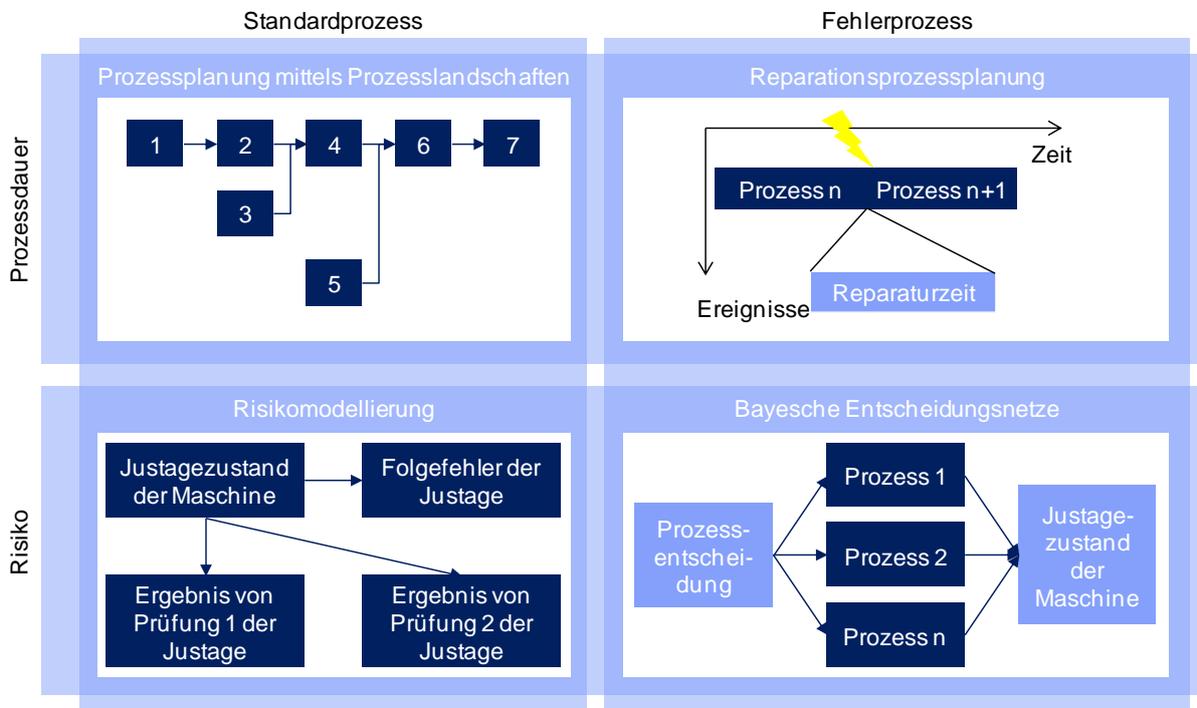


Abbildung 6-3: Lösungsmatrix mit Bestandteilen des generischen Modells zur Prozessplanung

Entsteht, wie häufig in der Inbetriebnahme üblich, ein Fehler, hat er Auswirkungen auf die Prozesslandschaft. Um den Fehler zu beheben, ist eine Reparationsprozessplanung notwendig, deren Fragmente sich auch über Prozesslandschaften darstellen und nach der jeweiligen Dauer bewerten lassen. Allerdings genügt das Kriterium der Dauer nicht, da die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers berücksichtigt werden muss. Darüber hinaus muss auch die Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen oder nicht erfolgreichen Fehlerbehebung bewertet werden. In Kombination mit der Zeitanalyse ist die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlermodellierung in Prozesslandschaften nicht möglich, weshalb aus

diesem Grund eine Risikomodellierung für eine realistische Zeitplanung notwendig ist.

Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, bewerten Bayesche Netze Zustände unter vorgegebenen Bedingungen nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit. Dadurch sind sie für die Bewertung von einzelnen Prozessalternativen im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung einsetzbar.

Die Standardprozesse und Fehlerprozesse müssen im selben Modell mittels Prozesslandschaften und Bayeschen Netzen integrierbar sein. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, auch bei hohen Fehlerwahrscheinlichkeiten realistische Aussagen über die kritischen Pfade von Prozesslandschaften zu treffen. Zudem müssen die Standardprozesse und deren Fehler in Relation zum jeweiligen Ort in der Prozesslandschaft bewertbar sein. Denn jeder Fehler hat je nach Zeitpunkt des Auftretens in einem fortschreitenden Prozess unterschiedliche Auswirkungen.

Die Validierung des Modells ist nicht trivial, da es viele Möglichkeiten der Prozessanordnung und Auswahl sowie der Fehlerauswirkungen berücksichtigen muss. Das Modell ist somit zwar auf die Anwendbarkeit untersuchbar, eine verlässliche Aussage über das Ergebnis ist jedoch nur nach einer Vielzahl an durchgeführten Feldversuchen machbar. Deswegen wird im nächsten Kapitel eine Validierungsmethodik entwickelt, um den Modelltransfer in die Empirie zu ermöglichen.

6.6 Entwicklung einer Validierungsmethodik für den Modelltransfer

Die Vielzahl der Möglichkeiten, heuristische Prozessoptimierungen anzuwenden, erschwert die Validierung des Modells. Für die Validierung jeder Heuristik wäre es notwendig, jeweils ein Fallbeispiel zu bewerten. Außerdem wäre selbst in dem Fall nur eine einzelne Aussage über ein statistisch verteiltes Problem möglich, weshalb in diesem Kapitel eine

Validierungsmethodik für den Modelltransfer in die Realität entwickelt wird.

Die Validierungsmethodik basiert auf dem Vergleich der heuristischen Prozessoptimierungen untereinander und der Standardisierung des Modells. Die Analyse der Literatur zu heuristischen Prozessoptimierungen zeigt, dass sich alle Prozessoptimierungen lediglich auf drei Parameter beziehen. Dadurch ist es nur möglich, diese drei Parameter zu betrachten.

In Abbildung 6-4 wird schematisch der Bezug der einzelnen Prozessfragmente zu Zuständen, Fehlern und Prozessdauern beschrieben. Jedes Prozessfragment ist mit einem Zustand bzw. möglichen Fehlern verknüpft. Das einzelne Prozessfragment teilt die verknüpften Zustände mit anderen Prozessfragmenten, somit kann es gleichzeitig mehrere Zustände beschreiben. Zudem benötigt ein Prozessfragment eine definierte Prozessdauer, welche sich aus kleineren Prozessdaueranteilen zusammensetzen kann. Gleichzeitig können diese Prozessdaueranteile mit mehreren Prozessfragmenten geteilt werden. Ein Einstellprozess, der aus mehreren Prozessdaueranteilen besteht und einen Zustand erreichen soll, ist damit modellierbar.

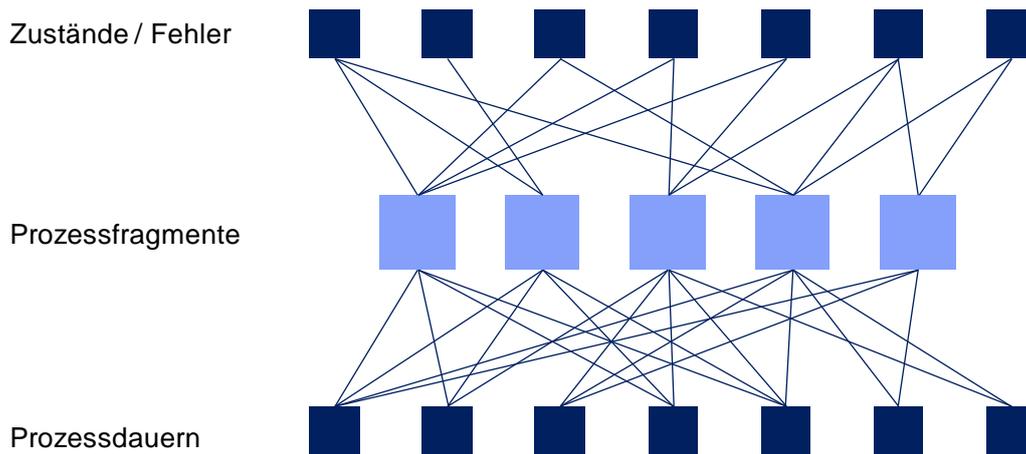


Abbildung 6-4: Bezüge des generischen Modells auf Prozessfragmente

Die generische Beschreibung des Modells erlaubt den Vergleich der einzelnen, heuristischen Prozessoptimierungen. Damit ist jede heuristische Prozessoptimierung mit nur drei Parameterkategorien, den Zuständen/Fehlern, den Prozessfragmenten und den Prozessdauern beschreibbar.

Das generische Modell erfordert die Definition von Axiomen als Regeln zur Modellerstellung im Maschinenbau. Ein Axiom ist ein nicht abgeleiteter Grundsatz zur Modellerstellung. Damit wird sichergestellt, dass das instanziierte Modell mit dem generischen Modell abbildbar ist und somit das jeweilige Fallbeispiel Rückschlüsse auf die Validität des gesamten, generischen Modells zulässt.

Das erste Axiom ist der

1. **ausschließliche Bezug** der Prozessoptimierungen auf Prozessdauern und Zustände.

Indem sich die Prozessoptimierungen und deren Bestandteile, die Prozessfragmente ausschließlich auf Prozessdauern und Zustände beziehen, ist eine vollumfassende Beschreibung des Modells

gewährleistet und somit die Betrachtungsmenge nach außen hin abgeschlossen. Weiterhin müssen

2. **logische Beziehungen** der Prozessoptimierungen zu den Zuständen und Prozessdauern

bestehen. Logische Beziehungen zwischen den Modellbestandteilen gewährleisten die Beschreibbarkeit des Modells. Wenn alle Bestandteile des Modells logisch miteinander verknüpft sind, erlaubt dies den Rückschluss, dass das Modell ein insgesamt logisches Ergebnis ergibt. Das dritte Axiom ist die

3. **minimal nötige Detaillierung** der Prozessdauern und Zustände.

Prozessdauern und Zustände müssen granular dokumentiert werden, um die logischen Beziehungen detailliert genug beschreiben zu können. Um den Aufwand der Modellerstellung minimal zu halten, wird gleichzeitig die Detaillierung auf den minimal notwendigen Grad begrenzt.

Die Einhaltung der Modellbildungsaxiome ermöglicht somit eine gesamtheitliche Beschreibung des notwendigen Modells. Zugleich lässt sich das Modell unter Einhaltung der Axiome auf andere Prozessoptimierungen übertragen. Anhand der Modellbildungsaxiome ist damit sichergestellt, dass alle Heuristiken vergleichbar modelliert werden. Darauf aufbauend kann im nächsten Kapitel ein Modell instanziiert werden.

7 Instanziierung des Prozessplanungsmodells

Das generische Prozessmodell ist ein allgemeingültiges Modell, das für Prozessplanungen angewendet werden kann. Die Instanziierung des Prozessplanungsmodells in diesem Kapitel hat als Ziel, das Modell nach der Problemstellung der Inbetriebnahme im Maschinenbau zu gestalten. Aufgeteilt wird die Instanziierung des Prozessplanungsmodells in die jeweilige Instanziierung des allgemeinen Prozessmodells, der Bewertungsmethode und anschließend der Zusammenführung zum ganzheitlichen Prozessplanungsmodell. Für die Validierung des Modells wird darauffolgend die Validierungsmethodik des Modelltransfers in allen heuristischen Prozessoptimierungen instanziiert. Abschließend ist für das ganzheitliche Prozessplanungsmodell eine Anwendungsmethodik zu entwickeln, damit der Praxistransfer standardisiert und reproduzierbar möglich ist.

7.1 Instanziierung des allgemeinen Prozessmodells

Das allgemeine Prozessmodell basiert auf den Prinzipien der vorgestellten heuristischen Prozessoptimierung. Die Instanziierung des allgemeinen Prozessmodells hat als Ziel, die Prozesslandschaft auf Basis der Prozessfragmente zu modellieren. Dabei soll ein Bayesches Netz die Abhängigkeiten der Prozessfragmente untereinander darstellen.

Die Modellierung einer ganzen Prozesslandschaft erfordert die Modellierung ihrer Bestandteile, der Prozessfragmente. Deshalb wird ein Modulbaustein entwickelt, der die Prozessfragmente abbilden kann. Ein Prozessfragment in der Inbetriebnahme besteht aus den Prozessen der Justage und der nachgelagerten Prüfung. Der Modulbaustein muss somit den Zustand inklusiv der Fehler eines Prozesses darstellen können. Ist dies gewährleistet, werden Modulbausteine verbunden, um die Abhängigkeiten untereinander zu modellieren.

Der Modulbaustein im Bayesischen Netz besteht aus mehreren Knoten und stellt den Justagezustand der Maschine dar (vgl. Abbildung 7-1). Der Justagezustand wird statistisch als Grundzustand vorgegeben, kann aber durch äußere Einflüsse, in Form von Verknüpfungen im Bayesischen Netz, beeinflusst werden. Die Zustände bilden bestimmte Abweichungen von den Vorgaben für die Justage ab. Erzwingen Justagezustände Folgefehler, können diese direkt verknüpft werden und sind als ein weiterer Knoten modellierbar (vgl. Abbildung 7-1). Auch der Fall, dass ein gewisser Justagezustand nur zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einen Fehler verursacht, wird in der Wahrscheinlichkeitsverteilung in einem Knoten berücksichtigt.

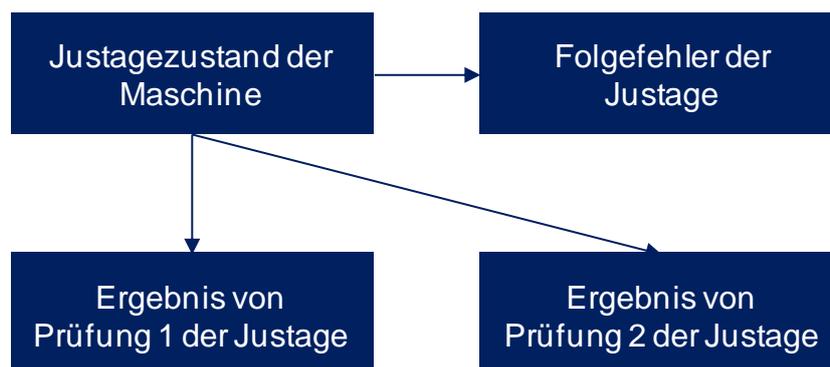


Abbildung 7-1: Modulbaustein der Analyse des Justagezustands

Der Justagezustand einer Maschine ist bei Prozessplanerstellung nicht bekannt. Jedoch ist es möglich, aus Erfahrungen und vorigen Prozessen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung abzuleiten. Um jedoch den aktuell vorherrschenden Zustand in einem Inbetriebnahmeschritt herauszufinden, muss der gegenwärtige Justagezustand mit Prüfprozessen untersucht werden. Mit dieser Information lässt sich der gewünschte Justagezustand zielgerichtet einstellen.

Ein Bayesches Netz erlaubt den Rückfluss der Informationen entgegengesetzt der Verknüpfung der miteinander verbundenen Knoten. Eine Prüfung ermöglicht dadurch nicht nur die Beeinflussung des verknüpften Justagezustands und die Veränderung der Wahrscheinlichkeit von Folgefehlern, sondern zugleich auch die Veränderung des Zustands der nachfolgenden Prozessschritte.

Über die Modellierung der Ergebnisse einer Prüfung lassen sich positive und negative Prüfergebnisse darstellen. Auch die Berücksichtigung von falsch positiven und falsch negativen Ergebnissen ist möglich.

Indem mehrere Prüfungen mit demselben Knoten des Justagezustands verknüpft werden, können die Auswirkungen auf den Justagezustand modelliert werden. Damit wird die Prüfung ermittelt, die die Fehler im Justagezustand am effektivsten detektiert. Jedoch ist allein mit dieser Modellierung kein Effizienznachweis im Sinne einer Durchlaufzeitoptimierung zu erbringen, da für diese eine Bewertungsmethode eingeführt werden muss.

Zustände sind im Allgemeinen statistisch beschreibbar und unterliegen statistischen Abhängigkeiten. Die Knoten nehmen damit zu einer Wahrscheinlichkeit p_n den Zustand n ein. Damit ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für jeden Knoten beschreibbar. Der gegenseitige Einfluss der Knoten unterliegt dem Bayeschen Gesetz (vgl. Kapitel 5.3) und wird somit mit einem Bayeschen Netz beschrieben.

Abbildung 7-2 stellt den Übertrag des oben beschriebenen instanziierten Modells des Inbetriebnahmeprozesses in ein Bayesches Netz dar. Alle Knoten enthalten Zustände, die mit Eintrittswahrscheinlichkeiten hinterlegt sind.

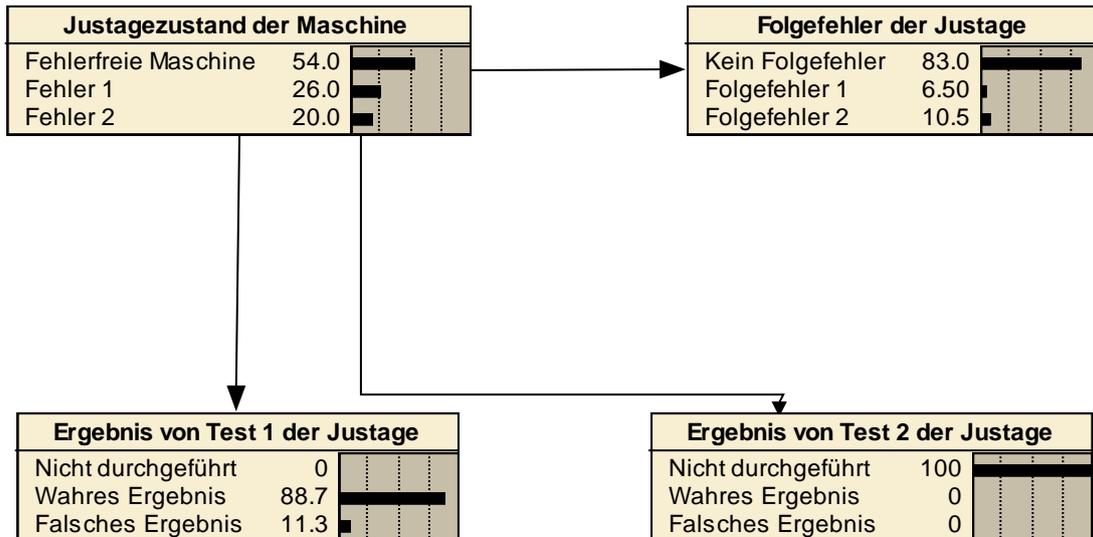


Abbildung 7-2: Übertrag der Analyse des Justagezustands in ein Bayesisches Netz als Modulbaustein

Die Knoten „Folgefehler der Justage“ und „Ergebnis von Test n der Justage“ besitzen eine direkte Abhängigkeit vom Justagezustand. Der Knoten „Folgefehler der Justage“ beinhaltet eine Matrix, die Folgefehler j zu einer gewissen Wahrscheinlichkeit p_{ij} mit dem Fehler i verknüpft.

Die Aussagegüte eines Tests n wird im Knoten „Ergebnis von Test n der Justage“ errechnet. Dabei wird auch in diesem Knoten eine Matrix dargestellt, welche die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Prüfung mit einem wahren Ergebnis beinhaltet. Auf einen Justagezustandsknoten können unbegrenzt viele Tests untersucht werden. Gleichermäßen ist beim Vorliegen von mehreren Fehlern die Erfolgswahrscheinlichkeit von einem Test auf alle Fehler überprüfbar.

Es kann mit diesem Modulbaustein eine Kombination von Justage-, Einstell- und Prüfprozessen modelliert werden.

Überträgt man diese Modulbausteine auf eine Prozesslandschaft, kann ein Fehler über mehrere Justage- und Prüfprozesse modelliert werden. Wahrscheinlichkeitsmatrizen sorgen für die Weiterreichung der existierenden Fehler. Damit wirken sich behobene Fehler direkt auf den Zustand des nächsten Modulbausteins aus und reduzieren somit die Fehlerwahrscheinlichkeit. Es ist dadurch möglich verschiedene Module miteinander zu verknüpfen und eine Prozesslandschaft darzustellen.

7.2 Instanziierung der Bewertungsmethode

Das allgemeine Prozessmodell umfasst Prüfungen, Maschinenzustände und Folgefehler in Form von Knoten. Die Zustände der Knoten werden mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben, wodurch der Einfluss von Prüfungen auf den Maschinenzustand in den einzelnen Modulen vorhersagbar ist. Werden Module zusätzlich in Form einer Prozesslandschaft verknüpft, besteht die Möglichkeit, Maschinenzustände durch den gesamten Inbetriebnahmeprozess zu errechnen.

Die Errechnung des Maschinenzustands und der effektivsten Prüfmethode ist für die Ermittlung des effizientesten Gesamtprozesses nicht ausreichend, da dieser durch den Prüfprozess und die Folgen auf nachfolgende Prozesse bestimmt ist. Aus diesem Grund muss die Dauer jedes einzelnen Prozesses berücksichtigt werden.

Das allgemeine Prozessmodell stellt Wahrscheinlichkeitsverteilungen verschiedener Maschinenzustände und Erfolgsaussichten teilweise konkurrierender Prüfmethoden dar. Da nicht jeder Zustand eintritt und nicht jede Prüfung durchgeführt wird, muss deren zugeordnete Dauer individuell berechnet werden. Wohingegen die Reparaturdauer zu der Wahrscheinlichkeit berücksichtigt werden muss, zu welcher der zugehörige Fehler auftritt. Wird ein Fehler detektiert und der Standardprozess verlassen, muss der Fehlerprozess beschrieben sein,

um eine Aussage über dessen Effizienz zu treffen. Die Prozessfragmentdauern müssen mit den Wahrscheinlichkeitsverteilungen des allgemeinen Prozessmodells verknüpft werden. Damit kann eine Durchlaufzeit unter Berücksichtigung der Fehler prognostiziert werden.

In Abbildung 7-3 wird ein beispielhafter Fehler und mögliche Zeitanteile der Fehlerbehebung in hellblau dargestellt. Wird im Prozess n ein Fehler detektiert, müssen weitere Schritte zur Fehlerbehebung durchgeführt werden. Häufig beginnen Suchen nach einem Fehler mit einer Demontage, da man die relevanten Baugruppen nicht uneingeschränkt erreicht. Wenn der Fehler gefunden ist, muss dieser behoben werden. Nach der Reparatur müssen Folgefehler bearbeitet und anschließend die Maschine auf den Ausgangszustand im Standardprozess wiederhergestellt werden.

Diese Prozesse charakterisieren beispielhaft den Hauptteil der Fehlerbehebungsprozesse. Gibt es, wie im Sondermaschinenbau üblich, spezielle Untervorgänge im Fehlerbehebungsprozess, können diese in das Modell integriert werden.

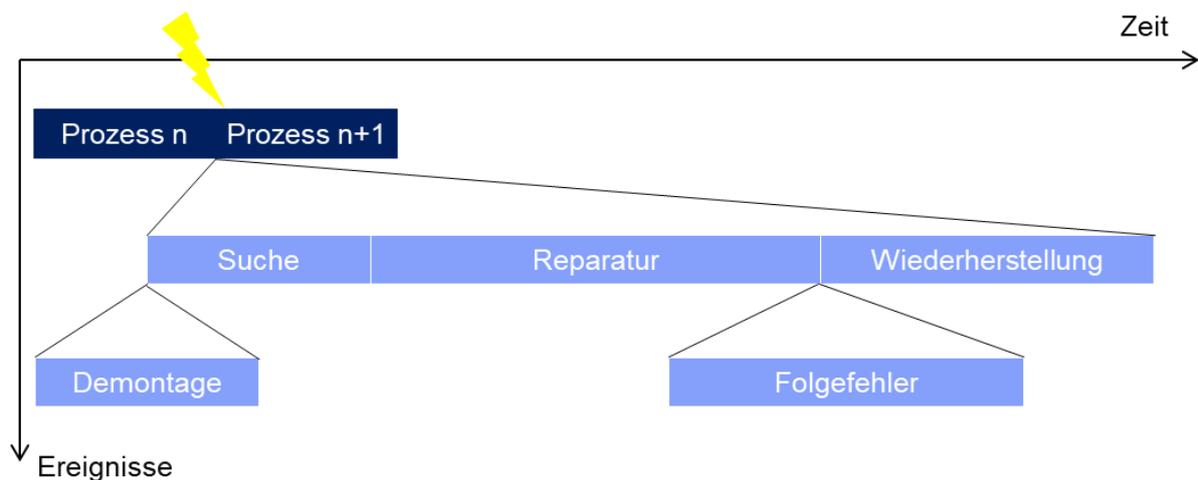


Abbildung 7-3: Prozessmodell von beispielhaften Fehlerzuständen

Der Übertrag der Zeitanteile in das Bayesche Netz erfolgt anhand der zugehörigen Prozessschritte. In jedem roten Knoten in Abbildung 7-4 ist im Hintergrund eine Matrix der Zeitfragmente hinterlegt. Tabelle 7-1 stellt eine Beispielzeitmatrix mit zwei verknüpften Knoten dar. Knoten i kann zum Beispiel der aktuelle Maschinenzustand und Knoten j der Folgefehler sein. Die Zeitmatrix der Reparatur der Folgefehler in Abbildung 7-4 ist somit abhängig von diesen beiden Knoten und hat insgesamt neun mögliche Zeitfragmente.

Jedes Zeitfragment verknüpft mit den jeweiligen bedingten Wahrscheinlichkeiten der Maschinenzustände, der Folgefehler oder der Prüfung ergibt in Summe die wahrscheinlichste benötigte Gesamtdauer.

Tabelle 7-1: Zeitmatrix zu den verknüpften Knoten i mit zwei Zuständen mit dem Knoten j mit vier Zuständen

	Knoten i Zustand 1	Knoten i Zustand 2
Knoten j Zustand 1	$t_{i1,j1}$	$t_{i2,j1}$
Knoten j Zustand 2	$t_{i1,j2}$	$t_{i2,j2}$
Knoten j Zustand 3	$t_{i1,j3}$	$t_{i2,j3}$
Knoten j Zustand 4	$t_{i1,j4}$	$t_{i2,j4}$

In Abbildung 7-4 werden zwei Tests untersucht. Mit dem dargestellten Modell können Fehlerwahrscheinlichkeiten, der Test und die Auswirkungen auf den Justagezustand der Maschine untersucht werden. Dafür muss eine Such-, eine Demontage- und eine Wiederherstellungszeit verknüpft werden.

Nach der Erweiterung des Modells sind die Ziele einer Optimierung, die Prozessdauer möglichst gering zu halten oder eine vorher bestimmte Fehlerwahrscheinlichkeit nicht zu überschreiten.

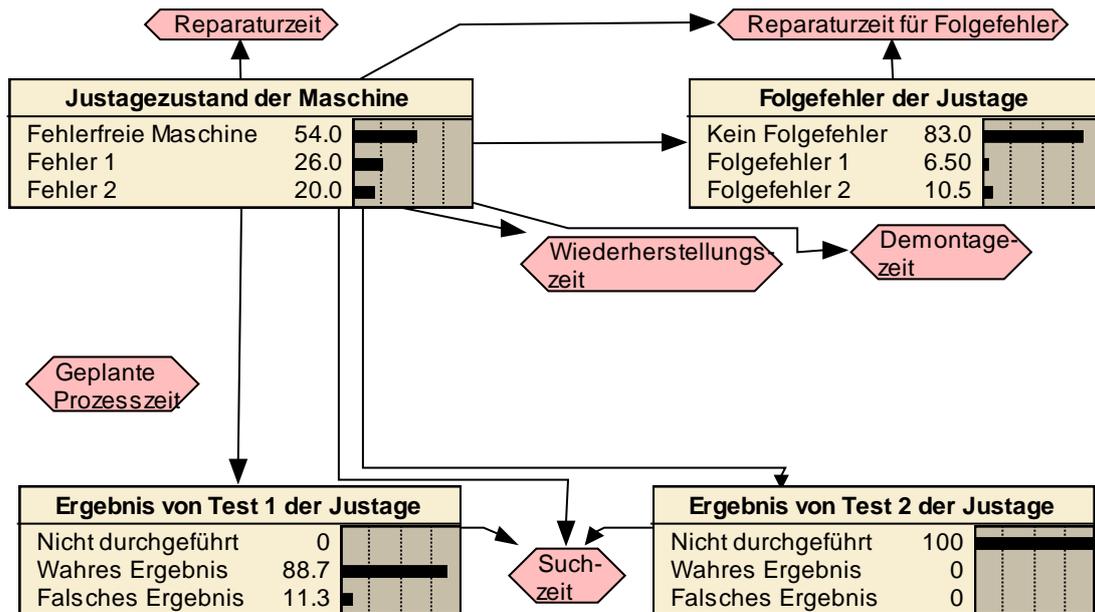


Abbildung 7-4: Modellierung der Zeitanteile in einem Bayesischen Netz mit Nutzwerten

Das Modell erlaubt damit zwar die Modellierung der Justagezustände, es fehlt jedoch die Planungs- und Auswertungsmöglichkeit. Im nächsten Kapitel werden Planungsfunktionen, wie zum Beispiel die Auswertung und der Vergleich zweier Prozesse, eingeführt.

7.3 Instanziierung des Prozessplanungsmodells

Ziel des Prozessplanungsmodells ist es, eine Entscheidung über die Anordnung von Prüfprozessen in der Prozesslandschaft ganzheitlich zu modellieren und zu bewerten. Auf der Basis des Prozessplanungsmodells mit instanzierter Bewertungsmethode wird eine Aussage über die Effizienz von Inbetriebnahmeprozessen getroffen. Werden neue, alternative Prozesslandschaften erstellt, die sich in der Anordnung der Prüfprozesse unterscheiden, ist es so möglich, iterativ eine effizientere Prüfstrategie zu entwickeln.

7.3.1 Instanziierung der Prozessentscheidung

Wie in den vorigen Kapiteln erläutert, ist es für den Vergleich der sich unterscheidenden Prüfpositionen in einer Prozesslandschaft notwendig, Prüfprozesse in Prozesslandschaften zu integrieren. Darauf aufbauend wird ein Maschinenzustand mit unterschiedlichen Prüfungen analysiert und die Analyse der Effizienz der Prüfung an einem oder mehreren Punkten in der Prozesslandschaft durchgeführt. Die Prüfstrategie ist somit iterativ im Modell entwickelt und in der Theorie, also vor der ersten Inbetriebnahme, optimiert.

Abbildung 7-5 verdeutlicht das Prinzip der instanziierten Prozessplanungsmethode. Ein Entscheidungsknoten beeinflusst n Prozesse und gibt über eine Verknüpfung die Information der Prozessentscheidung an die jeweiligen Prozesse weiter. In dem zu instanziiierenden Fall der Inbetriebnahme im Maschinenbau können n Prüfprozesse über Wahrscheinlichkeitsknoten modelliert werden. Nur der jeweilig durchgeführte Prozess hat in der Matrix des Justagezustands der Maschine einen Einfluss auf dessen Zustand. Entscheidungsknoten beeinflussen damit den Zustand von Wahrscheinlichkeitsknoten. Die Auswahl des Prüfprozesses beeinflusst die Entscheidung über die Art der Prüfung. Werden mehrere Justagezustände miteinander verknüpft, ist es möglich, die Entscheidung über den optimalen Prüfprozess in jedem Zustand zu wählen. Als Ergebnis wird der Einfluss auf die gesamte Durchlaufzeit berechnet.

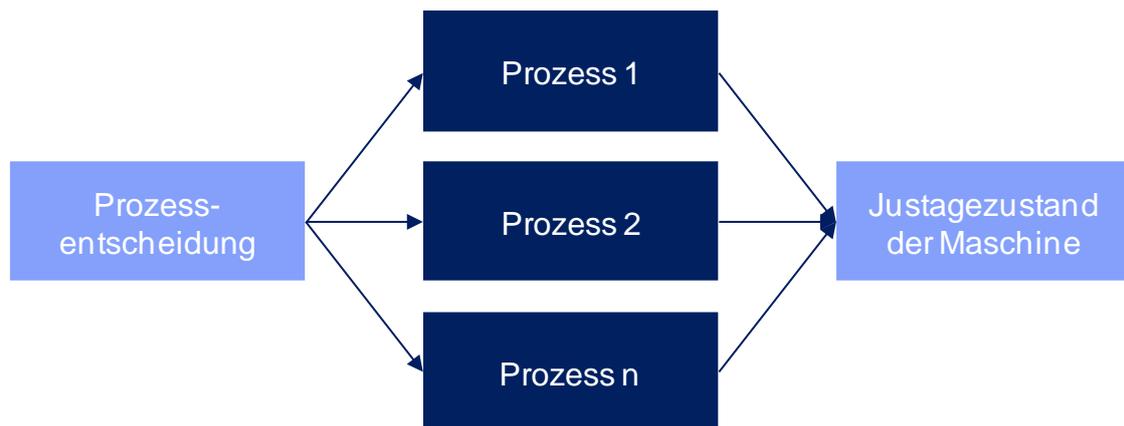


Abbildung 7-5: Instanziierung der Prozessplanungsmethode

Ein Bayesisches Entscheidungsnetz mit Entscheidungsknoten lässt die Modellierung des Prozessplanungsmodells zu. Wie in den vorigen Kapiteln beschrieben, können die wahrscheinlichkeitsbasierten Zustände der Maschine über Knoten dargestellt werden, während Prozessdauern über Nutzwerte zu modellieren sind. Folgend wird die Integration der Entscheidung über die Durchführung von Prüfprozessen mithilfe von Entscheidungsknoten im Bayesischen Netz betrachtet (vgl. Abbildung 7-5). Ein Bayesisches Entscheidungsnetz erlaubt dem Benutzer die Einflussnahme auf bestimmte Zustände, die über sogenannte Entscheidungsknoten beeinflusst werden können. Dies erfolgt über eine Verknüpfung der Entscheidungsknoten mit den Zustandsknoten oder direkt über Nutzwertknoten. Die Verknüpfung regelt wiederum in einer Matrix die jeweiligen Wahrscheinlichkeitsanteile der Zustandsknoten und die Zeitanteile der Nutzwertknoten. Ein Prüfprozess mit den Zuständen „nicht durchgeführt“, „wahres Ergebnis“ und „falsches Ergebnis“ kann durch den Entscheidungsknoten in den Zustand „nicht durchgeführt“ gebracht werden, um seine Auswirkungen auf den Maschinenzustand auszublenden. Gleichzeitig wird der Nutzwertknoten der geplanten Prüfdauer beeinflusst, da die nicht durchgeführte Prüfung auch keine Prozessdauer verursacht. Würde der Prüfprozess an dieser Stelle

durchgeführt werden, wären alle Zeitanteile und die Auswirkungen der eventuellen Reparatur auf den jeweiligen Maschinenzustand berücksichtigt. Die gesamte Prozessdauer der Entscheidung wird hinter dem jeweiligen Zustand des Entscheidungsknotens dargestellt. In Abbildung 7-6 ist der „Prozess 1 - Referenz“ ausgewählt. Der Beispielfall stellt den Vergleich zwischen einem bestehenden Prozess und einem neuen „Prozess 2 – Substitution“ dar.

Die Integration des Prozessentscheidungsknotens in das Prozessplanungsmodell ist in Abbildung 7-6 beispielhaft dargestellt. Die Prozessentscheidung beeinflusst in diesem Fall die Nutzwertknoten „Geplante Prozesszeit“, „Wiederherstellungszeit“, „Demontagezeit“ und die Ergebnisknoten der Prüfungen direkt. Die Suchzeit wird indirekt auf den Ergebnissen der Prüfungen generiert und hängt stark von der Glaubwürdigkeit des Ergebnisses der Prüfung ab. In diesem Beispiel ist die Demontage- und Wiederherstellungszeit nicht von dem Ergebnis der Prüfung abhängig. Die Reparaturzeiten orientieren sich am Justagezustand der Maschine bzw. die Reparaturzeit für Folgefehler am Knoten der Folgefehler der Justage. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass jeder statistisch erkannte Fehler repariert wird. Ist es notwendig, für unkritische Fehler ein Restrisiko im letzten Prozess darzustellen, müssen die Reparaturzeiten der unkritischen Fehler im letzten Zustandsknoten mit negativen Vorzeichen verknüpft werden. Damit sind die Reparaturzeitanteile dieser Fehler nicht in der Gesamtwertung berücksichtigt. Darauf aufbauend folgt die Bewertung der Auswirkungen der nicht reparierten Fehler bei den Kunden oder nachgelagerten Prozessen.

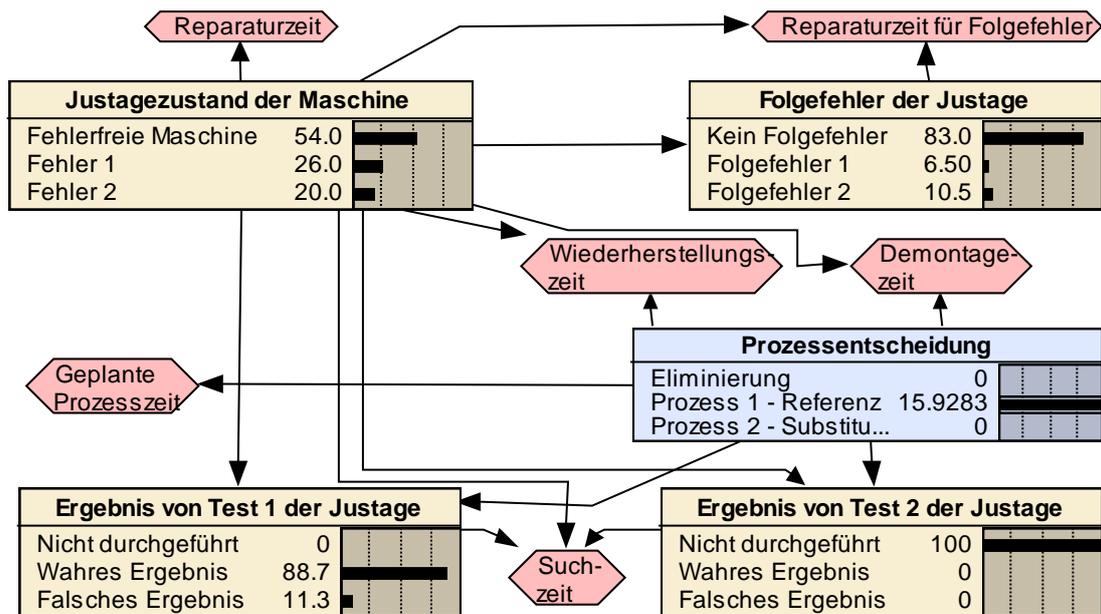


Abbildung 7-6: Beispiel eines instanziierten generischen Modells in der Betrachtung des Referenzprozesses

7.3.2 Instanziierung der Strategie zur Datenakquise

Besonders im Sondermaschinenbau werden Produkte einmalig oder in sehr geringen Stückzahlen produziert. Für die einmalige Planung oder die Planung für kleine Wiederholhäufigkeiten der Inbetriebnahme ist die Datenakquise mit statistischen Daten aus früheren Inbetriebnahmen nicht möglich. Dasselbe gilt für neue Prüfungen oder neue Produkte im regulären Maschinenbau mit höheren Stückzahlen. Um eine Abschätzung der Auswirkungen in diesen Fällen zu errechnen, werden Daten in hoher Qualität benötigt.

Sondermaschinenbauer zeichnen sich oft durch den Einsatz von Produkten aus der Serienfertigung und deren Integration in die Sondermaschine aus. Die meisten Sondermaschinenbauer haben ein zweites Standbein im regulären Maschinenbau, weshalb ein Großteil der Daten aus dem Einsatz der in Serien gefertigten Komponenten verwendbar ist.

Jedoch müssen die Wechselwirkungen mit anderen Komponenten der Maschine betrachtet werden. Da diese im Sondermaschinenbau sowie bei neuen Produkten oder Prüfprozessen im Maschinenbau nicht aus vergangenheitsbasierten Daten gewinnbar sind, ist die Datenakquise aus anderen Quellen notwendig.

Expertenschätzungen erlauben die Gewinnung von nicht gemessenen Daten, wozu eine granulare, interdisziplinäre Lösungsstrategie vorgeschlagen wird. Wie in Abbildung 7-7 dargestellt, sollen Einschätzungen der einzelnen Fachbereiche die Modellbildung vervollständigen. Die Analyse der Auswirkungen eines neuen oder veränderten Prozesses ist eine interdisziplinäre Aufgabe. Auswirkungen von Fehlern können technisch häufig nur von Entwicklungsexperten bewertet werden, wobei die Auswirkungen der technischen Experteneinschätzung auf die Produktionskapazitäten oftmals nur durch Prozessexperten und Industrial Engineers ermittelbar ist. In einem Produktentwicklungsprozess nach dem Stand der Technik ist die Zusammenarbeit zur Analyse der Auswirkungen nur in einem aufwändigen Projekt durchführbar.

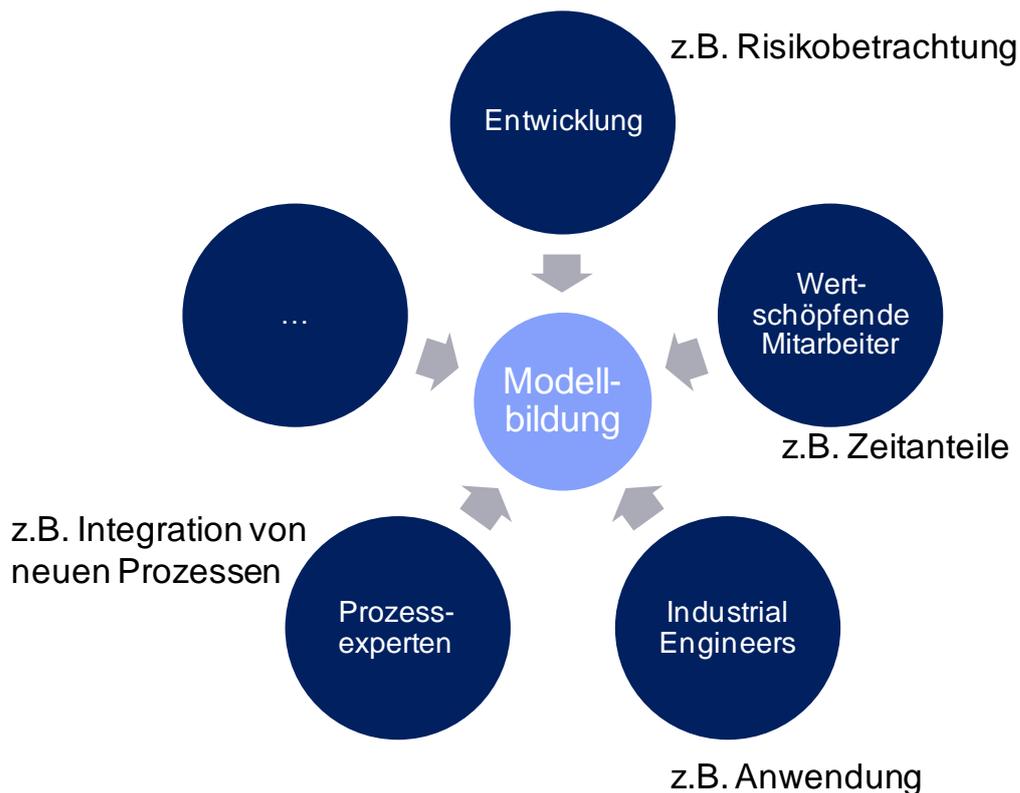


Abbildung 7-7: Granulare interdisziplinäre Lösungsstrategie zur Gewinnung von nicht gemessenen Daten

Das vorgestellte Prozessplanungsmodell erlaubt die strukturierte Zusammenarbeit der einzelnen Disziplinen. Jede Disziplin füllt somit das Modell mit dem jeweiligen Expertenwissen, ohne die potenziellen Auswirkungen betrachten zu müssen, denn die potenziellen Auswirkungen sind von den jeweiligen Experten zeitlich unabhängig beantwortbar. Zum Beispiel analysiert die Entwicklung bei einer Neueinführung einer Prüfung deren Wahrscheinlichkeit, Fehler an einem bestimmten Punkt im Prozess zu erkennen. Vorgelagert ist es für Prozessexperten möglich, die Prüfpunkte im Prozessplan zu definieren. Wertschöpfende Mitarbeiter dienen in dieser Lösungsstrategie als „Datenquelle“ für die jeweiligen Zeitanteile.

Das Ergebnis ist ein Modell, welches Daten aus Expertenwissen und Prozessaufnahmen aus vorigen Produkten kombiniert. Damit findet die

Prozessplanung auch ohne vollständig statistisch auswertbaren Datensätzen statt. Aufgrund von Fehleinschätzungen der Experten ist es jedoch auch möglich, dass weniger effiziente Prüfentscheidungen getroffen werden. Um dies zu vermeiden, wird in Kapitel 8.4 der Einsatz einer Robustheitsanalyse zur Sicherstellung der Auswahl der effizientesten Prozessanordnung bei gleichzeitig teilweise variierender Experteneinschätzungen beschrieben.

7.4 Instanziierung der Validierungsmethodik für den Modelltransfer

Die entwickelte Validierungsmethodik ermöglicht den Vergleich der heuristischen Prozessoptimierungen auf Modellbasis und stellt deren Gemeinsamkeiten dar. Das vorgestellte Prozessplanungsmodell baut auf diese Grundsätze auf. Dadurch ist es möglich, die Anwendbarkeit einer Prozessoptimierung nachzuweisen und somit auf die Anwendbarkeit aller Prozessoptimierungen zu schließen. In diesem Kapitel wird anhand des instanziierten Prozessmodells die Instanziierung der Validierungsmethodik auf den Maschinenbau untersucht.

Beim Vergleich des Bayeschen Netzes und des abstrahierten Lösungsmodells aus Abbildung 7-8 zeigt sich, dass beide als Netzstruktur aufgebaut sind. Das Bayesche Netz modelliert Zustände und bindet in Form von Nutzwertknoten auch Prozessdauern ein. Die im abstrahierten Lösungsmodell modellierten Prozessfragmente sind nicht direkt im Bayeschen Netz übertragbar. Vielmehr sind die Prozessfragmente ein Teilnetz der oben als Modul bezeichneten Einstell- und Prüfprozesse. Die Prozessfragmente dienen als Bindeglied zwischen Zuständen und Prozessdauern.

Es lässt sich erkennen, dass das beschriebene Prozessmodell vollständig im Lösungsmodell auf abstrahierter Weise abbildbar ist. Damit ist bewiesen, dass die Prozessoptimierung denselben Prinzipien folgt. Es ist

dann ausreichend, lediglich eine Prozessoptimierung nachzuweisen und begründet mit dieser Basis auf alle anderen zu schließen.

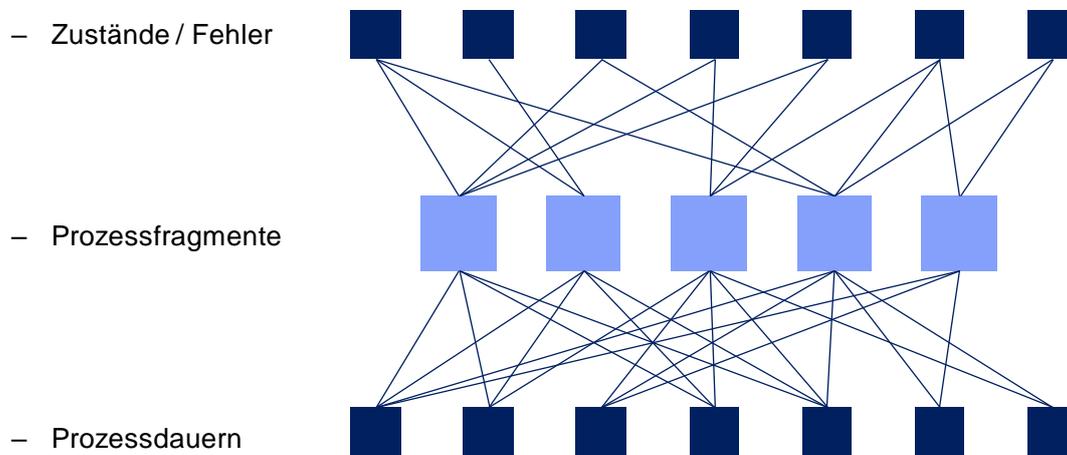


Abbildung 7-8: Abstrahierung des Lösungsmodells

7.5 Anwendungsmethodik des Prozessplanungsmodells

Die Übertragung des Prozessplanungsmodells in die Inbetriebnahme des Maschinenbaus wurde oben erläutert. Damit ist die Instanziierung in der Theorie abgeschlossen und das Modell in der Praxis anwendbar. Damit das instanziierte Modell standardisiert in die Praxis überführt werden kann, wird in diesem Kapitel eine Anwendungsmethodik entwickelt. Die Standardisierung soll die Unterstützung des Übertrags mit digitalen Methoden ermöglichen und somit den Planungs- und Simulationsaufwand gering halten.

Die Anwendungsmethodik des Prozessmodells teilt sich in sechs Methodenbausteine (vgl. Abbildung 7-9). Der erste Baustein ist der Prozessplan zur objektiven und einheitlichen Darstellung des zu betrachtenden Prozesses. Darauf folgt die Modellbildung anhand allgemeiner Modellbildungsrichtlinien. Im dritten Baustein werden die

abstrahierten Parameter aus der Modellbildung in das Prozessplanungsmodell implementiert. Das vollständige Modell muss nun im Simulationsbaustein in die Empirie überführt und mit anderen Prozessvarianten verglichen werden. Im fünften Baustein werden Handlungsempfehlungen erstellt und im letzten Baustein rekursiv integriert. Anschließend ist es möglich, den erstellten Plan wiederum über die Rekursion neu zu optimieren. Damit wird, angelehnt an den PDCA Zyklus, die langfristige Umsetzung und rekursive Verbesserung sichergestellt.

Der erste Methodenbaustein der Methodik sieht die Erstellung und Analyse eines Prozessplans vor. Er teilt sich in zwei Methoden auf, die heuristische Prozessoptimierung und die Priorisierung. Die erste Methode ist die Anwendung der heuristischen Prozessoptimierung nach Schlick, um mögliche Prozessalternativen zu finden (Schlick, C., Luczak, H. & Bruder, R., S. 467). Es wird jedoch nur ein Zyklus in der Planungsphase durchgeführt, weshalb der heuristische Charakter aufgrund des nachgelagerten Simulationsprozesses in diesem Baustein nicht zum Tragen kommt. Wird jedoch die vollständige Anwendungsmethodik betrachtet, kann ein heuristischer Ansatz durch den Rekursionsbaustein implementiert werden. Sind mögliche Prozessoptimierungen identifiziert, muss in den meisten Fällen aus Effizienzgründen eine Priorisierung vorgenommen werden. Die Priorisierung kann nach projektspezifischen Parametern, wie zum Beispiel der erwarteten Reduktion der Prozessdauer oder einer Risikoabschätzung, vorgenommen werden. Nach der Priorisierung erlaubt die Methodik die Wahl, entweder eine oder mehrere Alternativen weiter zu betrachten. Es wird damit auf Basis des Projektplans die Vergleichbarkeit der zu untersuchenden Prozessalternativen ermöglicht. Darauf aufbauend können die sich unterscheidenden Prozesse in der Modellbildung abstrahiert werden.

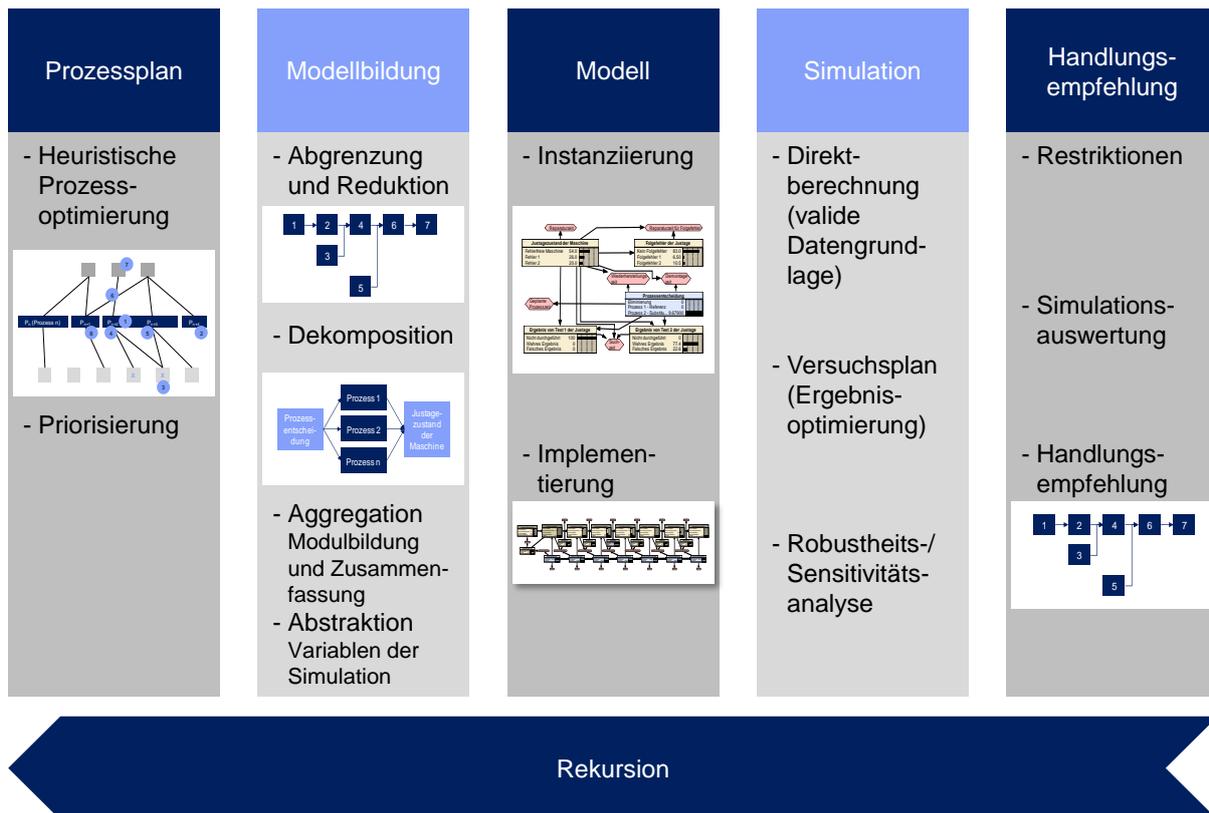


Abbildung 7-9: Übersicht über die Anwendungsmethodik des Prozessmodells (nach Poeschl, S., Wirth, F. & Bauernhansl, T., S. 5)

Die Modellbildung ist für den Übertrag der empirischen Prozessgrundlage in das theoretische Modell zuständig. Sie ersetzt nicht das oben entwickelte Prozessmodell, sondern bildet die notwendige Datenbasis für die Erstellung eines fallbezogenen Prozessplanungsmodells. Die Modellbildung unterteilt sich in vier Methodenbausteine. Zuerst werden aus einem Prozessplan die für die Betrachtung notwendigen Prozesse abgegrenzt und über die Reduktion alle nicht relevanten ausgeblendet. Dies begründet sich aus der Erhöhung der Modellbildungseffizienz. Im nachfolgenden Baustein, der Dekomposition, werden die Prozessabhängigkeiten des Referenzprozesses erörtert, Prozesse in deren Fragmente unterteilt und mögliche Alternativen in den reduzierten Prozessplan eingearbeitet. Aufbauend auf den Prozessfragmenten und

deren Abhängigkeiten können die Prozessmodule, jeweils bestehend aus einem Einstell- und Prüfprozess, nach deren logischen Zusammenhängen gebildet werden. Die Modellbildung wird durch die Abstrahierung vervollständigt. Dabei werden die benötigten Parameter mit der Strategie zur Datenakquise erarbeitet, wodurch abschließend sichergestellt wird, dass das oben instanziierte Modell auf einer validen Datengrundlage aufbaut. Die Simulation ist somit möglichst realitätsnah durchführbar.

Die Überführung der Datenbasis in das Modell unterteilt sich in zwei Schritte, die Instanziierung und die Implementierung. Die Instanziierung des Prozessplanungsmodells auf das Fallbeispiel erfolgt anhand des auf den Maschinenbau instanziierten Prozessplanungsmodells. Die Instanziierung wird dabei zum zweiten Mal durchgeführt. Das erste instanziierte Modell ist im Maschinenbau generisch anwendbar. Die zweite Stufe der Instanziierung ist eine Instanz des ersten Modells, passt dieses spezifisch auf ein Fallbeispiel an und ist fallspezifisch modifizierbar. Hierbei werden die Prozessmodule analog zum Prozessplan angeordnet und alle logischen Verknüpfungen erstellt, wodurch die Topologie des Bayeschen Netzes generiert wird. Nachfolgend wird in der Implementierung das Bayesche Netz mit der aus der Modellbildung erarbeiteten Datenbasis vervollständigt. Damit ist das Modell fertig für die Simulation.

Der Simulationsbaustein kann sich aus mehreren Methoden zusammensetzen. Beispielhaft werden nachfolgend drei Simulationsmethoden beschrieben und in den nächsten Kapiteln angewendet.

Die erste Simulationsmethode ist die Direktberechnung. Hierbei wird eine Variante des Modells berechnet, welche direkt zum Simulationsergebnis führt. Es wird keine Aussage über die Validität und kein Vergleich zu anderen Modellen vorgenommen. Somit ist diese Methode anwendbar, wenn die Datenbasis gut bestimmbar und mit sehr wenig Unsicherheiten behaftet ist. Außerdem ist sie, aufgrund des geringen Simulations-

aufwands, sehr effizient bei der Prognose von einzelnen Prozessoptimierungen.

Müssen jedoch viele verschiedene Prozessalternativen unterschieden werden, erfolgt dies über die Erstellung eines Versuchsplans. Besonders für die Entscheidung über den Punkt der Prüfung im Prozessplan ist ein Versuchsplan eine effiziente Vorgehensweise. Eine Methode zur effizienten Versuchsplanerstellung ist das Design of Experiments (DoE). Damit erreicht man eine schnelle Eingrenzung der signifikanten Parameter und deren Einfluss auf das Modell. So wird unter der Annahme einer validen Datenbasis die effizienteste Versuchsanordnung ermittelt. Ist die Datenbasis zum Teil nicht vertrauenswürdig, muss eine Robustheitsanalyse durchgeführt werden. Diese basiert zum Beispiel auf einem DoE. Die als unsicher gewerteten Eingabeparameter werden im Versuchsplan gezielt variiert und somit deren Einfluss auf das Ergebnis ermittelt. Im optimalen Fall sind die betrachteten Eingabeparameter von keiner Signifikanz auf das Endergebnis. Lässt sich jedoch eine Signifikanz ermitteln, muss der Einfluss der betrachteten Eingabeparameter errechnet werden. Anschließend wird der Einfluss der ermittelten Schwankungsbreite auf die finale Prozessentscheidung untersucht. Als Ergebnis liefert die Robustheitsanalyse eine Aussage über die Güte der Prozessentscheidung. Abschließend ermöglichen die drei vorgestellten Simulationsansätze, die Modellierung effizienter und effektiver abzuschließen. Auf den Simulationsergebnissen aufbauend, wird im nächsten Baustein eine Handlungsempfehlung gegeben.

Der Methodenbaustein der Handlungsempfehlung setzt sich aus drei Methoden zusammen, deren Ergebnis eine direkt umsetzbare Handlungsempfehlung ist.

Die Ermittlung der Restriktionen erfolgt direkt nach der Simulation. Restriktionen sind zum Beispiel die technische Machbarkeit, externe bauliche Gegebenheiten und menschliche Einflüsse auf den Prozess. Aus Effizienzgründen ist es möglich, die Restriktionen auch in der Priorisierung der Prozessoptimierungen zu berücksichtigen. Damit müssten Prozessoptimierungen, die den Restriktionen widersprechen, nicht in der Modellbildung und Simulation betrachtet werden. Wird aber eine Prozessoptimierung nach der Simulation mit einem großen Effizienzgewinn bewertet, ist es sinnvoll, bestehende Restriktionen zu beseitigen, auch wenn dies mit hohem Aufwand verbunden ist. Aus diesem Grund wird die Prozessoptimierung ohne Betrachtung der Restriktionen bis zum letzten Methodenbaustein empfohlen.

Nach der Betrachtung der Restriktionen ist sowohl die vollständige Simulationsauswertung durchführbar als auch die Erstellung einer Handlungsempfehlung für die effizienteste Prozessoptimierung.

Der letzte Methodenbaustein ist die Rekursion. Nach der Ermittlung einer Handlungsempfehlung wird die Rückspiegelung in den Prozessplan empfohlen. Darauf aufbauend ist in einem heuristischen Ablauf die Entwicklung neuer Prozessoptimierungen durchführbar.

Die Anwendungsmethodik erlaubt eine standardisierte Vorgehensweise, durch welche sichergestellt wird, dass bei unveränderten Eingangsparametern bei mehrmaliger Anwendung das gleiche Ergebnis erzielbar ist. Außerdem gibt sie dem Anwender einen Anwendungsleitfaden.

8 Theoretische Validierung

Die steigende Bedeutung des Sondermaschinenbaus lässt den Stellenwert einer Planung der Inbetriebnahme relevanter werden. Auch für die Planung des Produktanlaufs ist die Betrachtung der möglichen Fehler wichtig. Jedoch lassen sich aufgrund der geringen Stückzahlen im Serienmaschinenbau und vor allem im Sondermaschinenbau keine oder nur sehr wenige Statistiken erstellen. Zunächst werden die Begriffe der Validierung und Verifikation definiert, um im Anschluss einen theoretischen Ansatz einzuführen und die Validierung mehrerer Optimierungen zu vereinfachen.

Rabe et al. definieren die Validierung als „kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben“ (Rabe, M., Spieckermann, S. & Wenzel, S., S. 15). Damit konkretisieren sie den Anspruch, dass das Modell während der Anwendung kontinuierlich auf die Validität überprüft wird. Die Validierung ist nach der VDI „die Prüfung [der] hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original“ (VDI 1990). Wird diese Anforderung auf das in Kapitel 7 instanziierte Modell übertragen, lässt sich erkennen, dass anhand von einzelnen Anwendungen keine allgemeingültige Aussage über die Validität des Modells zu erreichen ist.

Die Verifikation ist nach VDI die „formale Prüfungen zur Korrektheit des Simulationsmodells“ (VDI 1990). Rabe et al. konkretisieren diese Definition und beschreiben sie als „die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“ (Rabe, M., Spieckermann, S. & Wenzel, S., S. 14). Somit ist die Verifizierung die Feststellung, ob mit dem beschriebenen Modell der optimale Inbetriebnahmeplan ermittelbar ist. Es lässt sich nur über die mehrmalige Anwendung desselben Fallbeispiels eine statistische

Aussage treffen. Das ist ein unwirtschaftlicher Vorgang und kann in der Realität nicht praktiziert werden.

In diesem Kapitel wird aus den genannten Gründen eine theoretische Validierung entwickelt, deren Ziel es ist, nachzuweisen, dass alle Prozessfragmente denselben Axiomen unterstehen und nach denselben Prinzipien auf die Prozesslandschaften wirken. Der Beweis wird in den folgenden Kapiteln geführt. Er erfolgt über eine vollständige Induktion und soll über eine deduktive Herleitung die Validität der beschriebenen Axiome für alle Änderungen der Prozessfragmente beweisen. Somit muss nur noch ein Fallbeispiel umgesetzt werden, um die Anwendbarkeit aller Änderungen der Prozessfragmente zu gewährleisten.

8.1 Reflexion des generischen Modells

Das generische Modell beschreibt die Bezüge der Prozessfragmente zu den Zuständen/Fehlern und zu den Prozessdauern. In Kapitel 7.4 wird die Instanziierung der Validierungsmethodik entwickelt. Im Folgenden wird die Allgemeingültigkeit des Modells für alle Prozessoptimierungen anhand des generischen Modells erläutert. Anschließend wird das instanziierte Modell mit den Axiomen überprüft.

Im generischen Modell ist die Verknüpfung der Prozessfragmente jeweils zu mehreren Zuständen, Fehlern und Prozessdauern möglich, wodurch eine netzartige Struktur aufgespannt wird. Während die Verknüpfung der Prozessfragmente zueinander im generischen Modell keine Bedeutung hat, werden Verknüpfungen im instanziierten Modell jedoch aufgrund der Beeinflussung der Prozessfragmente von Zuständen/Fehlern und Prozessdauern relevant.

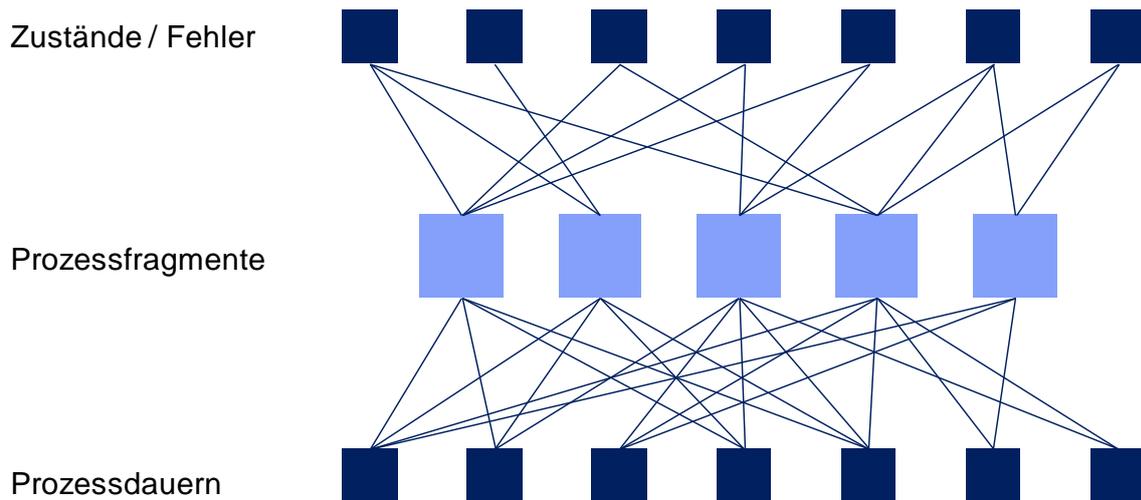


Abbildung 8-1: Bezüge des generischen Modells auf Prozessfragmente

Es sind somit alle Prozessfragmente ohne Verknüpfungen zueinander dargestellt (vgl. Abbildung 8-1). Sie erlauben den Rückschluss, dass auch im Fall des Vertauschens einzelner Prozessfragmente die Validität des Modells gewährleistet ist.

8.2 Sicherung der Anwendung der Axiome

Das instanziierte Modell wurde anhand des generischen Modells abgeleitet. Im vorigen Kapitel wird bewiesen, dass im generischen Modell alle Prozessfragmente an sich dieselben Bezüge aufweisen. Jedoch ist damit nicht die Validität des instanziierten Modells beweisbar.

Die in Kapitel 6.6 eingeführten Axiome erlauben die vollständige Validierung des Modells. Zwar ist, wie im vorigen Kapitel beschrieben, die Verknüpfung der Prozessfragmente zu Zuständen/Fehlern und Prozessdauern gegeben, für eine vollständige Betrachtung muss jedoch der Zusammenhang der Prozessfragmente untereinander inkludiert werden. Dafür müssen die vorgestellten Axiome betrachtet werden, die die Beziehung zwischen Prozessoptimierungen, Zuständen und Prozessdauern beschreiben. Folgend wird somit das instanziierte Modell mit den

vorher aufgestellten Axiomen abgeglichen und sichergestellt, dass auch in der Anwendung von Fallbeispielen diese gewährleistet sind.

Das Modell aus Abbildung 7-6 lässt erkennen, dass der Modulbaustein aus einem Justage- und einem Prüffragment besteht. Diese haben jeweils Verknüpfungen zu Zustandsknoten und Prozessdauern. Im Modell ist zusätzlich ein Entscheidungsknoten integriert, der lediglich bestimmte Prüfungen in der Analyse integrieren bzw. ausschließen kann. Da dieser keine für die Modellierung funktionale Eigenschaften integriert, sondern lediglich verschiedene Alternativen in dem Modell auswählt, hat dieser keinen Einfluss auf das Ergebnis einer Modellalternative. Das erste Axiom, der ausschließliche Bezug der Prozessfragmente auf Zustände und Dauern, ist damit eingehalten.

Im Modell werden Knoten mit anderen Knoten verknüpft. Diese Verknüpfungen folgen dem Bayeschen Theorem und sind logisch beschreibbar. Da diese logischen Verknüpfungen auch zwischen den Modulbausteinen gelten, wird das zweite Axiom eingehalten.

Im dritten Axiom wird die minimal nötige Detaillierung der Prozessdauern und Zustände definiert, die je nach Anwendungsfall variiert. Im Allgemeinen sind sie in dem vorgestellten Modell für einen Prüf- bzw. Einstellprozess gewählt. Reicht der Detaillierungsgrad für den Prüfprozess aus, müssen alle notwendigen Zeitanteile definiert werden. Da manche Prüfungen jedoch zum Beispiel ohne Demontage durchgeführt werden können, müssen nicht alle Zeitanteile berücksichtigt werden. Wird der Prüfprozess in mehrere Schritte aufgeteilt, kann dies nur über weitere Module, welche in der Prozesslandschaft verkettet werden, erfolgen. Somit besitzt ein Modul an sich den minimal notwendigen Detaillierungsgrad für den Prozessschritt. Muss ein Prozessschritt in weitere Unterprozesse geteilt werden, wird jeder Unterprozess mit einem Modul beschrieben.

Schlussendlich stellen alle Axiome die Erstellung des Modells sowie dessen Anwendbarkeit auf alle Prozessoptimierungen sicher.

8.3 Reduzierung der Validierungsfälle

In den vorigen Kapiteln wird die deduktive Herleitung der Anwendbarkeit des Modells auf alle Prozessoptimierungen mithilfe von Axiomen beschrieben. Die Axiome werden in Kapitel 6.6 für die Instanziierung des generischen Prozessmodells erläutert. Sie bilden die Grundlage für das Prozessmodell und die Übertragbarkeit des Modells auf alle Prozessoptimierungen. Damit sind die Validität und Vollständigkeit der Axiome für die Anwendung in der Realität entscheidend. Die Gültigkeit der Axiome muss mit Fallbeispielen nachgewiesen werden, da dies aus der Theorie nicht möglich ist.

In Abbildung 8-2 ist das Schema zur Reduzierung der Validierungsfälle dargestellt. Der Rückschluss, dass alle Prozessoptimierungen lediglich die Verknüpfung der Prozessfragmente zueinander verändern, bedingt die Einhaltung aller Axiome der Modellerstellung. Die Prozessoptimierungen verändern damit nicht deren Bezüge zu Zuständen oder Prozessdauern, wodurch für alle Prozessoptimierungen dieselben Modellbauaxiome gelten. Es ist folgerichtig ausreichend, eine Prozessoptimierung mit Fallbeispiel zu bestätigen und daraus die Validität aller anderen Prozessoptimierungen zu schließen.

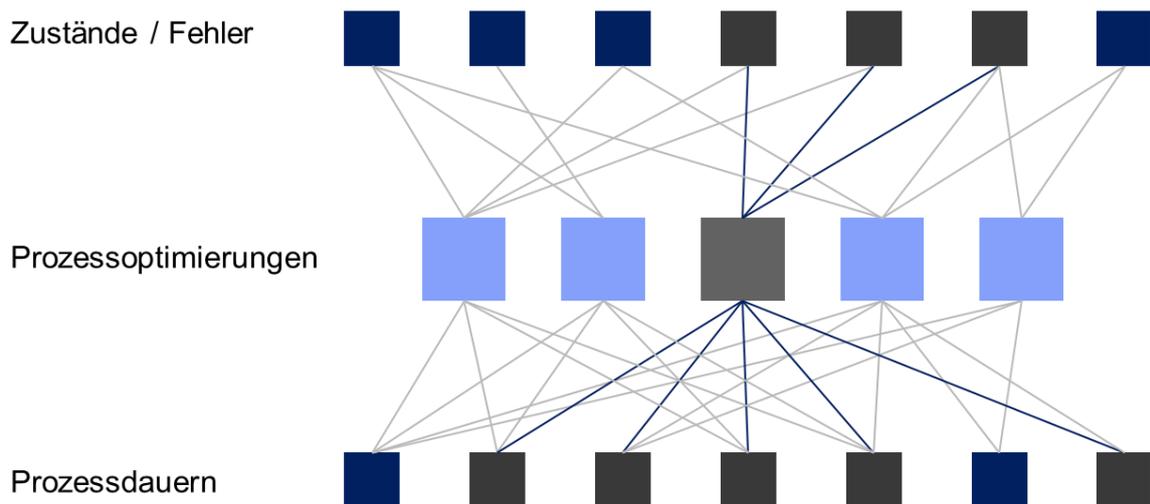


Abbildung 8-2: Schema zur Reduzierung der Validierungsfälle

In Tabelle 8-1 sind die Definitionen der Verifizierung und Validierung zusammengefasst. Außerdem werden beide Kategorien nochmals in zwei Nachweismethoden eingeteilt, den deduktiven und den teilinduktiven Nachweis.

Im deduktiven Nachweis wird über logische Zusammenhänge nachgewiesen, dass das erstellte Modell theoretisch den gewünschten Erfolg bringt. Deduktiv wurde die Validierung in den vorigen Kapiteln nachgewiesen. Die Verifizierung erfolgte über die strukturierte Vorgehensweise vom generischen Modell zum instanziierten Modell. Zudem wird im Kapitel 7 die Erstellung des Modells erläutert und mit logischen Verknüpfungen beschrieben, wodurch das Modell deduktiv verifiziert ist.

Der induktive Nachweis würde eine Betrachtung aller relevanten Parameter mit allen möglichen Ausprägungen und Ergebnissen bedingen. Da dies im realen Umfeld nicht möglich ist, wird der in Kapitel 1.4 beschriebene Ansatz der Falsifikation umgesetzt. Dabei wird das Modell bei mindestens einem Fallbeispiel angewendet und dessen

Anwendbarkeit nachgewiesen. Damit ist das Modell nach Popper solange gültig, bis es falsche Ergebnisse erbringt. Die Verifizierung würde sich mit demselben Ansatz begründen lassen. Jedoch können aufgrund der geringeren Stückzahlen im Maschinenbau und der Prozessoptimierungen während der Produktion keine statistischen Aussagen mit den Ergebnissen des Prozessmodells verglichen werden. Zusätzlich werden im Modell statistisch verteilt auftretende Fehler betrachtet und damit eine mittlere Prozessdauer errechnet. Es muss also ein statistisch errechnetes Ergebnis mit gemittelten Messwerten verglichen werden. Um vertrauenswürdige Ergebnisse zu liefern, werden dafür insgesamt hohe Stückzahlen benötigt. Dies ist in der Produktion des Maschinenbaus aufgrund der geringen Stückzahlen nicht möglich.

Tabelle 8-1: Validierung und Verifizierung des Modells

	Validierung		Verifizierung	
Definition	„Ist die Prüfung dieser hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original. Es ist sicherzustellen, dass das Modell das Verhalten des realen Systems genau genug und fehlerfrei widerspiegelt“ ¹ „Ist es das richtige Modell?“ ²		„formale Prüfungen zur Korrektheit des Simulationsmodells“ ¹ „Ist das Modell richtig?“	
Umsetzbarkeit	Deduktiv Theoretische Validierung	Teilinduktiv Anwendbarkeit des erforschten Modells	Deduktiv Überprüfung der Datenbasis und Zusammenhänge	Teilinduktiv Nicht möglich aus Definition des Maschinenbaus
Umsetzung	Durchgeführt	Erfolgt durch Fallbeispiele	Durchgeführt	Nicht möglich

Die theoretische Validierung soll den Rahmen für ein valides Modell schaffen. Trotz der eingeschränkten Möglichkeit zum Nachweis der Gültigkeit des Modells konnte so das Risiko eines fehlerbehafteten Modells minimiert werden.

8.4 Diskussion unterstützender Auswertungsmethoden

Große Prozesspläne erfordern eine Vielzahl von Entscheidungen. Die manuelle Modellierung und Entscheidungsfindung ist dann aufgrund der in der Potenz ansteigenden Entscheidungsmöglichkeiten nicht mehr möglich. Ein Versuchsplan erlaubt es, die Prozessentscheidung effizient zu unterstützen, wobei die Erstellung eines Versuchsplan mit den Prozessalternativen als Variablen ein erster Schritt zur Auswertung ist. Anhand des Versuchsplans werden im Prozessplanungsmodell die jeweiligen Prozessdauern berechnet und somit die kürzeste Prozessdauer oder die Prozessvariante mit dem geringsten Risiko ermittelt.

Ist die Datenbasis jedoch unsicherheitsbehaftet, führt dies zu falschen Entscheidungen. Eine Lösung für eine geringe Anzahl von unsicheren Faktoren ist die Robustheitsanalyse, für die wie bei der Prozessentscheidung ein Versuchsplan mit variierenden Parametern erstellt wird. Jedoch werden neben den Prozessalternativen auch einzelne Parameter, wie zum Beispiel die Zustandswahrscheinlichkeiten, variiert. Damit entsteht in der Regel ein großer Versuchsplan, der die Konsequenzen einer Prozessentscheidung unter variierenden Parametern aufzeigt. Es wird somit ermittelt, ob Parameter vorhanden sind, die bei nur geringer Änderung eine Prozessalternative attraktiver erscheinen lassen.

Mit der Fuzzy-Set-Analyse stellen Poeschl et al. eine weitere Alternative zur Unterstützung in vagen Prozessen vor. Die Fuzzy Sets ermöglichen die quantitative Auswertung von vagen Formulierungen von Experten. Gerade bei geringeren Stückzahlen, wie zum Beispiel im Sondermaschinenbau, ergeben sich somit neue Möglichkeiten der Datenakquise für das Bayesche Netz. (Poeschl, S. et al., S. 554f)

9 Fallbeispiele

Das Prozessmodell wird in diesem Kapitel in verschiedenen Projekten im Sondermaschinenbau umgesetzt. Im Vergleich des Sondermaschinenbaus mit dem Serienmaschinenbau lassen sich große Übereinstimmungen erkennen. Jedoch ist die Inbetriebnahme im Sondermaschinenbau umfangreicher als im Serienbetrieb, weshalb sich besonders im Sondermaschinenbau größere Effizienzsteigerungen in der Inbetriebnahme ergeben. Die Fallbeispiele sind im Allgemeinen dem Sondermaschinenbau zuzuschreiben, auch wenn die Produktionsmenge in allen Beispielen nicht nur die Stückzahl 1 beträgt. In Kapitel 9.1 wird ein Überblick über die Fallbeispiele und deren Relevanz für den Gültigkeitsnachweis des entwickelten Prozessmodells gegeben. Im Anschluss wird ein Fallbeispiel der Prozessoptimierungen Substitution und Eliminierung vorgestellt sowie ein Fallbeispiel für größere Projektpläne beschrieben. Dabei wird die Verifizierung der Ergebnisse der Fallbeispiele erläutert und ein Beispiel der Robustheitsanalyse wird genauer betrachtet. Das Kapitel 9.5 stellt abschließend den Abgleich des angewendeten Modells mit der Problemstellung und Zielsetzung her.

9.1 Überblick über die Fallbeispiele

Das Prozessmodell wurde an zwei inbetriebnahmeintensiven Produkten im Sondermaschinenbau angewandt. Die ausführlichsten Versuche fanden während der Inbetriebnahme einer Laseranlage für die Chipindustrie statt. Die Eliminierung und Substitution in Inbetriebnahmeprozessen von Subsystemen erreichten dabei eine Reduzierung eines Prozessschrittes um 35%. Dieses Beispiel wird im Detail im nächsten Kapitel erörtert. Der Vergleich zweier Messmethoden erzielte bei demselben System eine weitere Reduzierung der Durchlaufzeit und so zeigte die Einführung der neuen Messmethode eine Zeitoptimierung im

Fehlerfall von bis zu 40%. Ein drittes Beispiel an der Anlage appliziert die Prozessoptimierungen Reihenfolge ändern und Eliminierung. Dabei ist die Test- und Fehlerzeit um 25% reduziert worden.

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Inbetriebnahme eines Teilchenbeschleunigers im Projekt XFEL. Zielgrößen waren die Reduzierung der Testdauer und die Reduzierung des Fehlerrisikos nach Prozessende. Die Test- und Fehlerzeit konnte auch hier um 40% reduziert werden.

9.2 Fallbeispiel der Substitution und Eliminierung

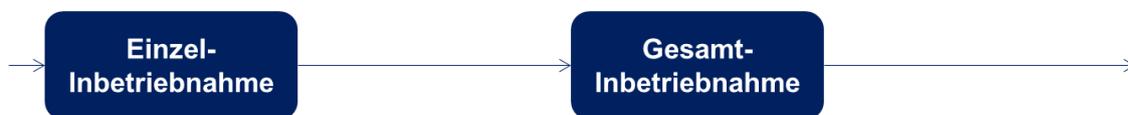
Die Prozessoptimierungen durch Substitution und Eliminierung ermöglicht bei neuen Prozessen eine Effizienzsteigerung. Im Ramp-up werden viele Prüfungen aufgrund von Vermutungen verschiedener Prozessbeteiligter eingeführt. Das Prozessmodell unterstützt hierbei, Risiken objektiv zu bewerten und daraus datenbasiert Entscheidungen zu treffen. Im folgend vorgestellten Beispiel finden beide Prozessoptimierungen Einsatz und unterstützen anhand des geringen Risikos eine Eliminierung einiger vorgelagerten Inbetriebnahmeschritte.

Die Inbetriebnahme von Lasersystemen erfordert die Abstimmung mehrerer physikalischer Prozessarten. Es müssen zum Beispiel Gasmischungen eingestellt, die Energieabfuhr über Kühlprozesse gewährleistet und sensible Einstellungen an Resonatorspiegeln durchgeführt werden. Die Prüfung der korrekten Einstellung erfolgt in einzelnen Prüfschritten oder integral über alle Einstellungen. So werden im beschriebenen Beispiel mehrere Resonatoren in Betrieb genommen. Anschließend ist der Umbau geplant, um hintereinander im Gesamtsystem einen Laserstrahl zu verstärken. Die Einzelinbetriebnahme hat als industrielles Ziel in der Inbetriebnahme im Gesamtbetrieb möglichst fehlerfreie Komponenten bereitzustellen. Die Entscheidung über den Umfang der Einzelinbetriebnahme muss, abhängig von der

Kenntnis des resultierenden Fehlerrisikos, für die Gesamteinbetriebnahme getroffen werden. Dabei unterstützt das entwickelte Prozessplanungsmodell, indem es transparent Risiken und Durchlaufzeiten in den einzelnen Prozessschritten darstellt. Mit der Information kann der effizienteste Inbetriebnahmeumfang ermittelt werden.

Die Anwendung des Prozessmodells erfordert anfangs die Extraktion der relevanten Prozesse aus der Prozesslandschaft. Anschließend müssen Prozessoptimierungen mit Prozessexperten entwickelt werden. Im Beispiel wird untersucht, wie sich das Auslassen der Einzelinbetriebnahme bzw. der Ersatz durch neue Prüfungen verhält. Abbildung 9-1 zeigt den bereits sehr vereinfachten Prozessplan einer Komponente und zweier Prozessalternativen in der Einzel-inbetriebnahme.

- **Vorliegender Prozess**



- **Prozessoptimierungen (Auswahl)**

- Eliminierung eines Prozesses



- Substitution eines Prozesses



Abbildung 9-1: Auswahl an Prozessoptimierungen

Im Anschluss an die Prozessplanung muss das Modell erstellt werden. Um die Auswirkungen der veränderten Messverfahren zu bewerten, sind

Experteneinschätzungen in der Datenakquise berücksichtigt worden. Für den beschriebenen Anwendungsfall reicht ein Modul aus. Da es lediglich notwendig ist, einen einzelnen Prüfprozess zu betrachten und alle zeitlichen Auswirkungen für die Gesamteinbetriebnahme in einem Nutzwertknoten abzubilden, ist die Implementierung eines Prozessplanungsmoduls ausreichend. Die Datenbasis resultiert aus bekannten Zuständen der Maschine und aus Wahrscheinlichkeitsanalysen von Expertenbefragungen. Darin sind drei Systemzustände beschrieben. Der erste ist ein fehlerfreier Zustand und die letzten beiden sind Fehlerzustände. Die Behebung dieser Fehler ist zwingend notwendig und erfordert in jedem Fall eine Lösungszeit. Im Modell müssen anschließend die Fehlerbehebung und die dafür notwendige Prozessdauer eingefügt werden.

Mögliche Folgefehler sind vom Justagezustand abzuleiten und die Auswirkungen jedes Folgefehlers auf die Prozesszeit zu bestimmen. Beispielsweise schädigt eine wandernde Strahlage das Vakuumsystem mechanisch (vgl. Abbildung 9-2).

Der blaue Entscheidungsknoten bietet die Möglichkeit, Prüfungen hinzu- oder wegzunehmen. In der Abbildung sind die Eliminierung, der Modeschuss und ein Substitutionsprozess dargestellt. Der Modeschuss ist der Referenzprozess. Der Entscheidungsknoten ist mit den Ergebnisknoten der Prüfung verbunden. Die Ergebnisknoten erlauben die Bewertung einer Prüfung und den Rückschluss, ob die Prüfung richtig positive oder auch falsch positive Ergebnisse liefert. Beide Ergebnisknoten und der Knoten des Justagezustands der Maschine beeinflussen damit auch die Suchzeit nach einem Fehler. Die Testzeit wird nur von der Art des Tests beeinflusst, die gemeinsam mit dem Justagezustand die Rückbauzeit und die Wiederherstellungszeit beeinflusst.

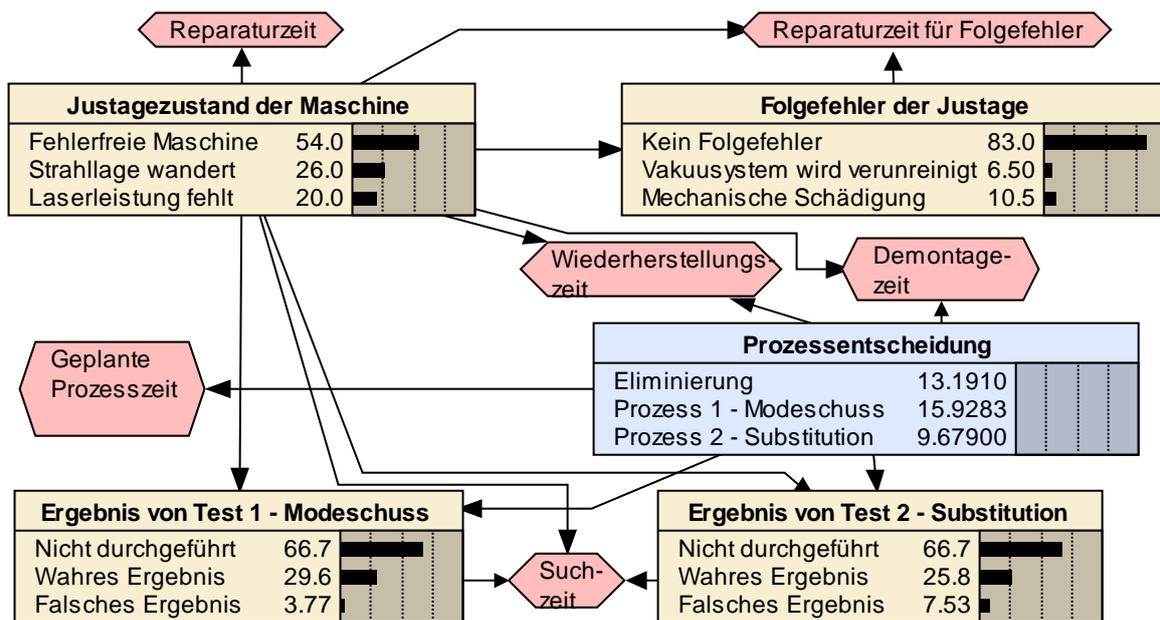


Abbildung 9-2: Beispiel des Prozessplanungsmoduls

Im Entscheidungsknoten sind die Nutzwerte der einzelnen Prozessalternativen abzulesen. Unter Berücksichtigung der relevanten Prozessschritte wird die größte Effizienzsteigerung mit dem Substitutionsprozess erreicht. Auch die Eliminierung bringt einen positiven Effekt auf die Prozessdauer mit sich, wodurch der gesamte Prozess der Einzelbetriebnahme, inklusive Substitutionsprozess, schlussendlich eine Reduzierung der Durchlaufzeit um 35% erlaubt. Im nächsten Kapitel werden die weiteren Funktionen an Fallbeispielen erläutert.

9.3 Fallbeispiele für vernetzte Prozesspläne

Nachdem im vorigen Kapitel die Anwendbarkeit der Prozessoptimierung Substitution und Eliminierung an einem einzelnen Prozessmodul nachgewiesen wurde, folgen in diesem Kapitel Fallbeispiele mit größeren Prozessplänen.

Die Anwendung der Prozessoptimierung „Reihenfolge ändern“ wird in einem Fallbeispiel, in welchem mehrere Prüfungen verkettet sind, nachgewiesen. Im Allgemeinen besteht das vorgestellte Lasersystem aus einem gasdicht abgeschlossenen System. Die Prüfung der Dichtheit des Systems erfolgt über einen integralen Druckhaltetest. Während des Inbetriebnahmeprozesses muss jedoch aus technischen Gründen das geschlossene System mehrmals modifiziert und geöffnet werden. Bei jedem Eingriff in das System entsteht das Risiko, eine Leckage zu erzeugen. Naheliegend ist die Prüfung des Systems nach jeder Modifikation, sodass nach der integralen Prüfung klar ist, welche Stelle für die Leckage ausschlaggebend ist. Werden mehrere Modifikationen nacheinander durchgeführt und anschließend eine Leckage am System detektiert, ist der genaue Ort nicht bestimmbar. Somit entstehen längere Suchzeiten. Je nach Wahrscheinlichkeit, ob bei einer Modifikation eine Leckage auftritt, ist eine Prüfung nach jeder einzelnen Modifikation oder eine Prüfung nach allen Modifikationen die bessere Alternative.

Alle einzelnen Modifikationen werden in einer Prozesskette modelliert. In Abbildung 9-3 ist ein Ausschnitt der Prozesskette dargestellt. Die Abbildung zeigt das Modell im Zustand bei der Anlieferung, welcher eine Fehlerfreiheit des Systems zu 80% repräsentiert. Die Fehlerverteilung ist anfangs gleichverteilt und spaltet sich in vier Fehlergruppen auf. Alle Fehler sind durch den Nutzwertknoten mit der Reparaturzeit verknüpft. Mit dem Entscheidungsknoten, in welchem die Entscheidung, einen Leckagetest durchzuführen oder auszulassen getroffen wird, kann die

Suchzeit nach Fehlern bei Anlieferung verknüpft und eine Testzeit definiert werden. Damit ist ein Prozessmodul mit der Entscheidung, einen Prozess durchzuführen oder ihn zu eliminieren, vollständig.

In der Verkettung mehrerer Prozessmodule ergibt sich die Möglichkeit, verschiedene Modifizierungen durchzuführen und an jeder Stelle über die Durchführung einer Leckageprüfung zu entscheiden. Dafür wird die Fehlerwahrscheinlichkeit an den nächsten Zustandsknoten übergeben und über die Verknüpfungen mit der bedingten Wahrscheinlichkeit, bei der durchgeführten Modifikation einen Fehler zu integrieren, verrechnet. Die Verknüpfungen erzeugen im Hintergrund eine Matrix, mit der sie die Modellierung des nächsten Zustands ermöglichen. Im Folgenden werden alle Module auf dieselbe Art verknüpft.

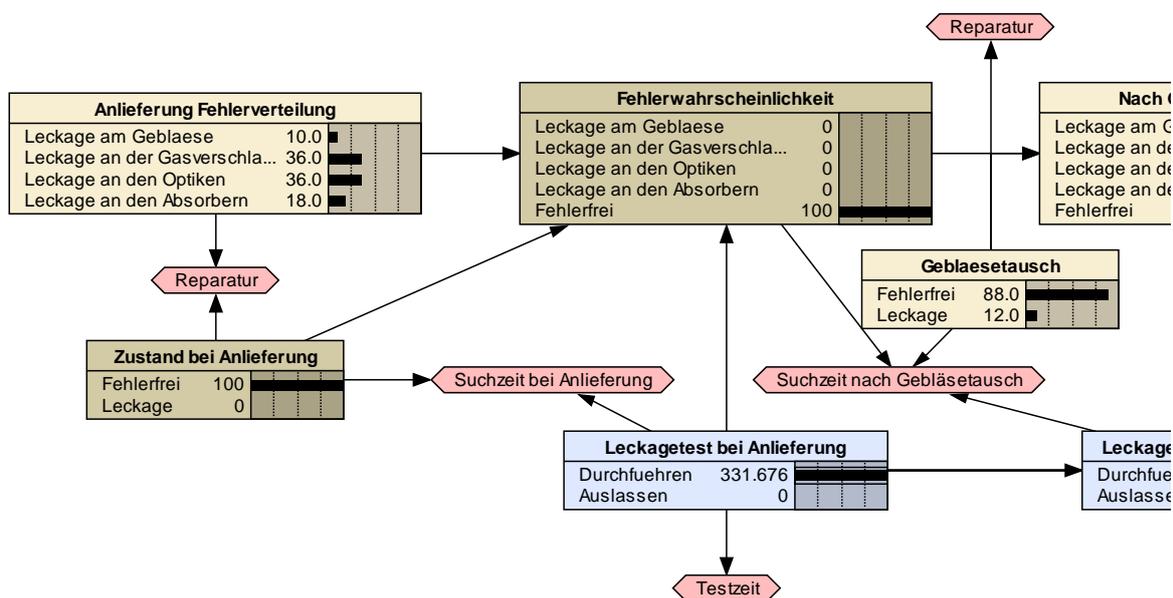


Abbildung 9-3: Modellierung der ersten Prozessmodule (Ausschnitt aus Abbildung 9-4)

Das vollständige Modell ist in Abbildung 9-4 beschrieben. Wie sich erkennen lässt, wiederholt sich das oben beschriebene Modul mehrfach. Es ist dadurch möglich, an jeder einzelnen Modifikation eine Prüfung durchzuführen. Die Prüfungen berücksichtigen alle Parameter, wie zum Beispiel den Justagezustand, die vorhergehende Prüfung und die für die Stelle individuellen Zeitanteile. Damit wirkt sich die Prüfung an einer Stelle im Prozessplan spezifisch auf die Zielparameter aus.

Ziel der Optimierung ist es, am Ende der Prozesskette die Wahrscheinlichkeit für Leckagen minimal zu halten und gleichzeitig die Prozessdauer zu verkürzen. Im beschriebenen Beispiel ist es außerdem wichtig, dass in einem spezifischen mittleren Prozessschritt keine Leckage vorliegt. Dafür wird manuell eine Prüfung vor dem speziellen Prozessschritt hinzugeschaltet. Die Kombination der Möglichkeit, einen Prüfprozess nach jeder Modifikation hinzuzufügen und der Darstellung der einzelnen Fehlerwahrscheinlichkeiten, erlaubt eine transparente Entscheidung. Zudem ist die Entscheidungsmöglichkeit auf Basis von Wahrscheinlichkeitskennwerten neu.

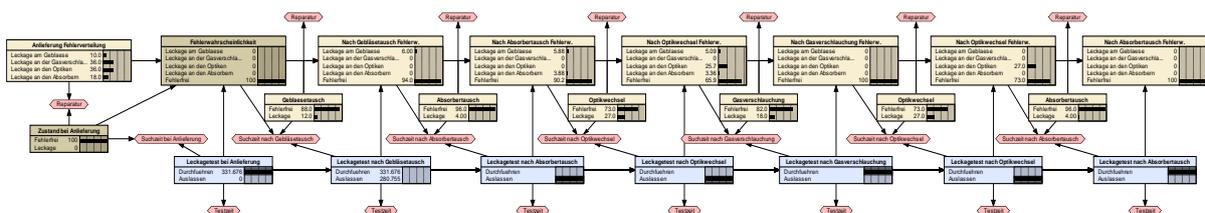


Abbildung 9-4: Zustandsveränderungen über den Inbetriebnahmeprozess

Aufgrund der vielen Entscheidungsmöglichkeiten müsste an dieser Stelle durch manuelle Optimierung die beste Kombination gefunden werden. Um diesen Prozess zu umgehen, kann mittels eines Versuchsplans und

einer Multimomentanalyse die optimale Position und die optimale Anzahl an Prüfungen gefunden werden.

Das Fallbeispiel liefert als Ergebnis die alleinige Prüfung am Ende des Prozesses und bestätigt dies mit den kürzesten Prozesszeiten. Das Ergebnis ist ohne Berücksichtigung von Restriktionen berechnet. Werden jedoch die Restriktionen berücksichtigt, dass an einer Stelle im Prozess ein leakagefreier Zustand vorhanden sein muss und eventuelle Regressansprüche an Lieferanten nur direkt am Anfang nachgewiesen werden können, kommen zwei weitere Pflichtmessungen hinzu. Auch in dem Fall ergibt sich, dass unter den Restriktionen beim ausschließlichen Durchführen der Pflichtmessungen die kürzeste Prozessdauer errechnet wird. Damit kann in dem Fallbeispiel die Zeit für Tests und Fehlerbehebungen um 25% verringert werden.

9.4 Validität der Ergebnisse

In einem dritten Fallbeispiel wird die Einführung einer neuen Messung mit zwei möglichen Messmethoden angesprochen. Die Vorgehensweise ähnelt dem Fallbeispiel zur Eliminierung und Substitution aus Kapitel 9.2. In diesem Fall stellt die Eliminierung jedoch den Vergleichsprozess dar. Es wird keine Substitution durchgeführt, sondern ein neuer Messprozess eingeführt. Zudem findet in dem Fallbeispiel der Vergleich zweier Messmethoden statt.

Vor der Modellierung müssen die Rahmenbedingungen der Tests mit Experten festgelegt werden. Die Einführung neuer Messmethoden erlaubt keine vollständige Vorhersagbarkeit der Testdauer und des jeweiligen Vertrauens in die Tests. Weiterhin unterliegt auch der Zustand der Anlage gewissen Unsicherheiten. Aus diesem Grund unterstützt eine Robustheitsanalyse die Sicherstellung der Analyseergebnisse.

Für die Robustheitsanalyse wird ein Versuchsplan mit vier Variablen erstellt (vgl. Tabelle 9-1). Als Zielwerte sind die jeweilige Prozessdauer der Eliminierung, des ersten und des zweiten Tests zu wählen. Die Variablen müssen jeweils eine niedrige, hohe und eine mittlere Ausprägung repräsentieren. In Tabelle 9-1 sind die Ergebnisse der Robustheitsanalyse dargestellt. Im Mittel ist Test 1 unter Berücksichtigung aller Varianzen mit 57 Minuten am kürzesten. Auch im direkten Vergleich in den einzelnen Zeilen ist Test 1 am kürzesten oder liegt in der Mitte der beiden Tests. Mit diesem Ergebnis kann Test 1 als neue Messmethode vorgeschlagen werden.

Tabelle 9-1: Robustheitsanalyse für das Entscheidungsmodell

Zustand	Testzeit	Vertrauen Test 1	Vertrauen Test 2	Eliminierung [min]	Test 1 [min]	Test 2 [min]
1	1 (= niedrig)	1 (= hoch)	1	44	16	26
1	1	3 (= niedrig)	1	44	33	26
1	1	1	3	44	26	43
1	1	3	3	44	33	43
1	3 (= hoch)	1	1	44	36	66
1	3	3	1	44	53	66
1	3	1	3	44	36	83
1	3	3	3	44	53	83
2	2	2	2	110	67	67
3	1	1	1	176	35	45
3	1	3	1	176	102	45
3	3	1	1	176	55	85
3	3	3	1	176	122	85
3	1	1	3	176	35	112
3	1	3	3	176	102	112
3	3	1	3	176	55	152
3	3	3	3	176	122	152
Mittelwerte				110	57	76

Die Robustheitsanalyse über einen Versuchsplan liefert einen Überblick über die Prozessvariante, bei der die Gesamtzeit niedriger ist als bei Alternativen. Jedoch ist das Ergebnis jeweils fallbezogen und kann auch im schlechtesten Fall zu längeren Durchlaufzeiten führen. Für eine weitere Abschätzung hilft eine Fuzzy-Set-Analyse.

Diese erfolgt nach dem Erstellen eines Versuchsplans oder auch unabhängig davon. Poeschl et al. stellen eine Variante vor, wie das Prozessplanungsmodell mit der Fuzzy-Set-Analyse verknüpft wird. Die Befragung von Experten ermöglicht darüber hinaus die Bewertung der

vagen Parameter und liefert eine Aussage über die Tendenz der Parameter. Damit erlauben die Ergebnisse von Poeschl et al. die weitere Eingrenzung der Risiken. (Poeschl, S. et al., S. 554f)

9.5 Reflexion des Modells anhand der Analyse- und Gestaltungsanforderungen

Die Analyse- und Gestaltungsanforderungen, die im Hinblick auf Zielsetzung und Forschungsfragen formuliert werden, bilden den Rahmen des Forschungsprojektes. Deshalb wird das Modell im Hinblick auf diese Anforderungen und deren Erfüllung reflektiert.

Als wissenschaftliches Ziel wurde die Entwicklung eines „Modells zur Gestaltung von anforderungsgerechten Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau“ identifiziert. Damit soll ein wissenschaftlicher Beitrag zur Steigerung der Prozessproduktivität, zur Verkürzung der Durchlaufzeit sowie zur Verringerung der Prozessvarianzen geliefert werden. Die Fallbeispiele zeigen die Möglichkeit auf, die Effizienz der betrachteten Prozesse zu erhöhen. Dadurch verkürzt sich die Durchlaufzeit. Nach der Darstellung der Änderungen in der Prozesslandschaft wird der erreichte Zeitvorteil auch für den Gesamtprozess deutlich. Die Prozessvarianzen resultieren demnach zu einem großen Teil aus Fehlerzuständen. Das Modell ermöglicht eine transparente Darstellung der Fehlerzustände über den gesamten Inbetriebnahmeprozess. Eine Multiparameteroptimierung führt den Abgleich der Durchlaufzeit mit dem Fehlerrisiko in der Inbetriebnahme durch.

Die Forschungsfragen konkretisieren die Zielsetzung und Vorgehensweise. Sie können wie folgt beantwortet werden:

Wie können justageintensive Inbetriebnahmeprozesse im Maschinenbau effizienter gestaltet werden?

Justageintensive Inbetriebnahmeprozesse im Maschinenbau kennzeichnen sich besonders durch Fehler in der Konstruktionsphase und deren Auswirkungen. Durch die gezielte Betrachtung von Fehlern im Inbetriebnahmeprozess und die Auswahl der Messmethoden nach Kennzahlen ist eine Optimierung der Messstrategie mit Bezug zum jeweiligen Fehler möglich. Damit ist eine Effizienzsteigerung in allen Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau nachgewiesen.

Welche Methoden können den Inbetriebnahmeprozess und die dafür notwendigen Prozessplanungen unterstützen?

Die Frage nach der Methode bzw. der Analyseanforderung muss auf der planerischen Ebene beantwortet werden. Die etablierte Methode der Prozesslandschaften ermöglicht eine transparente Aufnahme und Visualisierung des Prozesses. Dabei unterstützen heuristische Prozessoptimierungen die Effizienzsteigerung in Prozesslandschaften. Die Arbeit beantwortet die Forschungsfrage mit Heuristiken und ermöglicht eine realistische Bewertung der Prozessparameter aufgrund statistischer Daten und Experteneinschätzungen. Dabei wird nach Abbildung 1-11 jedes Kapitel mit Teilzielen versehen, welche jeweils in den Kapiteln erarbeitet und erreicht werden. Die vorgestellte Forschungsarbeit setzt die Modellierung mit Bayeschen Netzen um. Bekannte Methoden aus der Prozessplanung, kombiniert mit dem entwickelten Prozessmodell und dessen wahrscheinlichkeitsbasierter Auswertung, unterstützen die taktische Planung in der Inbetriebnahme. Weitere Forschungsansätze können die Automatisierung der Prozessplanerstellung auf Basis von Regeln untersuchen. Im vorgestellten Modell wird bereits eine standardisierte Anwendungsmethodik für die

Prozessplanerstellung und Auswertung eingeführt. In einem weiteren Schritt ist die Applikation in Lösungen der vernetzten Produktion erforschbar. Auf der Grundlage des entwickelten Referenzschemas der Prozessplanung besteht dabei die Möglichkeit, Prozesspläne zu erstellen und diese anhand von Echtzeitdaten mit der Inbetriebnahme zu vergleichen. Dadurch lassen sich realitätsbasierte Zieltermine und Risikokennwerte ermitteln, die die Kommunikation und Übergabepfung mit dem Kunden vereinfachen und vorhersagbarer machen können.

10 Zusammenfassung

Der Forschungsansatz für die Effizienzsteigerung von Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau liefert eine Lösung für eine über mehrere Jahrzehnte existierende Problemstellung. Dabei zeigt der Vergleich verschiedener Literaturquellen, dass aufgrund der komplizierter werdenden Aufgabenstellungen der Inbetriebnahmeanteil im Projekt ansteigt. Die volkswirtschaftliche Bedeutung des Maschinenbaus untermauert indes die Notwendigkeit einer effizienten Inbetriebnahme und damit die Lösung dieser Problemstellung. Aufgrund der Verortung der Arbeit in den Handlungswissenschaften ist der Begründungszusammenhang belegt. Der Einsatz von Erkenntnissen aus der Formalwissenschaft zur wahrscheinlichkeitsbasierten Auswertung ermöglicht es einen wesentlichen Beitrag zur Effizienzsteigerung der Inbetriebnahme zu leisten.

Im Prozess der Inbetriebnahme müssen die Fehler aus Vorgängerprozessen behoben werden, wodurch Verzögerungen entstehen und der Prozessplan geändert werden muss. Die in der Literatur etablierten Methoden zur Planung sind allgemeingültig für den Maschinenbau und nicht auf die spezifische Problemstellung in der Inbetriebnahme ausgerichtet. Aus diesem Grund wird zunächst ein generisches Prozessmodell erstellt, das Prozesse im Maschinenbau beschreibt. Zudem werden Entwicklungsanforderungen für Prozesse definiert und ein Referenzschema für die Prozessplanung entwickelt, welches den Übertrag des Modells in eine mit Zielen verknüpfte Planungsmethode erlaubt. In Anbetracht der Zielsetzung ist die heuristische Prozessoptimierung die effektivste Gestaltungsmethode. Darüber hinaus erlaubt die Bewertungsmethode der Bayeschen Netze das Optimieren des Modells hinsichtlich der Durchlaufzeit und des Prozessrisikos. Auf

dieser Basis wird das generische Prozessplanungsmodell in die Kategorien Standard- und Fehlerprozesse eingeteilt, in welchen jeweils zwischen Durchlaufzeit- und Risiko-betrachtung unterschieden wird.

Der Maschinenbau erfordert die Instanziierung des generischen Modells auf dessen Anforderungen, wozu ein Modell zur Bewertung von Inbetriebnahmeprozessen entwickelt wird. Dieses Modell gliedert sich in einzelne Module, die in Reihe oder parallel zueinander stehen. Dadurch ist es möglich, die Anforderungen der Inbetriebnahme im Maschinenbau in einem Prozessplan zu modellieren. Dieser basiert auf einem Bayeschen Netz und ist dadurch nicht nur mit Wahrscheinlichkeiten bewertbar, sondern erlaubt auch den Vergleich unterschiedlicher Prozesse.

Die Prozessoptimierungen sind dadurch nicht nur in einem heuristischen Prinzip einsetzbar, sondern sie sind auch über das Prozessplanungsmodell wahrscheinlichkeitsbasiert auswertbar. Für die Einsatzmöglichkeit, vor allem im Sondermaschinenbau, werden die Methoden der Robustheitsanalyse und der Prozessentscheidung in die Anwendungsmethodik integriert. Sie erlauben eine standardisierte Betrachtung der Fallbeispiele und ermöglichen den Weg zur automatisierten Auswertung der Daten.

Die Anwendung des Modells wird als zentraler Bestandteil des Nachweises für zwei Prozessoptimierungen, der Substitution und der Eliminierung, durchgeführt. Danach erlaubt der vorgestellte Ansatz der theoretischen Validierung den Rückschluss, dass das Modell für alle weiteren Prozessoptimierungen einsetzbar ist.

Abschließend werden die Forschungsfragen beantwortet und das Forschungsziel somit erreicht. Darüber hinaus sind bestehende Methoden im Maschinenbau und weiteren Disziplinen, wie zum Beispiel die Robustheitsanalyse, in die Auswertung des Prozessplanungsmodells

integriert. Die Prozessplanung der Inbetriebnahme im Maschinenbau ist erstmals mit einer quantitativen Vorgehensweise unter Berücksichtigung potenziell auftretender Fehler durchführbar. Damit ermöglicht das vorgestellte Prozessplanungsmodell nicht nur die Erstellung des effizientesten und risikoärmsten Plans, sondern unterstützt präventiv, die größten Fehlerrisiken gezielt zu reduzieren. Neben dem Maschinenbau wird das größte Potenzial für eine Effizienzsteigerung in der Inbetriebnahme im Sondermaschinenbau nachgewiesen, wodurch die Effizienzsteigerung für eine ganze Branche bewiesen ist. Basierend auf der Prozessplanung kann damit ein Beitrag zum Erfolg der Volkswirtschaft geleistet werden.

Literaturverzeichnis

- Abel 2017
Abel, Michael, 2017.
Automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen mit serviceorientierten Paradigmen.
Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
Stuttgarter Beiträge zur
Produktionsforschung 61.
Stuttgart, Univ., Diss., 2016.
ISBN 9783839611333
- Albers *et al.* 2010
Albers, Albert; Düser, Tobias; Sander, Oliver;
Roth, Christoph; Henning, Josef, 2010. X-in-
the-Loop-Framework für Fahrzeuge,
Steuergeräte und Kommunikationssysteme.
ATZelektronik 5 (5), S. 60–65
DOI: 10.1007/BF03224034
- Albers *et al.* 2013
Albers, Albert; Behrendt, Matthias;
Schroeter, Jens; Ott, Sascha; Klinger,
Simon, 2013. X-in-the-loop: A Framework for
supporting Central Engineering Activities and
Contracting Complexity in Product
Engineering Processes.
*Proceedings of the 19th International
Conference on Engineering Design*
- Albrecht *et al.* 2017
Albrecht, Michael; Töpfer, Armin (Hrsg.) ,
2017.
*Handbuch Changemanagement im
Krankenhaus: 20-Punkte Sofortprogramm für*

Kliniken.

2 Auflage.

Berlin: Springer.

ISBN 978-3-642-20361-9

DOI: 10.1007/978-3-642-20362-6

Amos Tversky *et al.* 1981 Amos Tversky; Daniel Kahneman, 1981. The Framing of Decisions and the Psychology of Choice.

Science (211), S. 453–458

Zugriff am: 06.12.2016

Andrews *et al.* 2002

Andrews, John; Dugan, Joanne, 2002.

Fault tree analysis: For reliability and risk assessment.

New York, Chichester: Wiley.

ISBN 0471982792

Bargiela 2010

Bargiela, Andrzej, 2010. Virtual Commissioning of Manufacturing Systems a Review and new Approaches for Simplification.

European Conference on Modelling and Simulation

Bauer 2018

Bauer, Matthias, 2018.

Das Recht des technischen Produkts: Praxishandbuch für Unternehmensjuristen.

Wiesbaden: Springer Vieweg.

ISBN 978-3-658-21584-2

- Bauernhansl 2014 Bauernhansl, Thomas, 2014.
*Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung
und Logistik: Anwendung, Technologien und
Migration.*
Wiesbaden: Springer Vieweg.
ISBN 978-3-658-04681-1
- Bauernhansl 2015 Bauernhansl, Thomas 2015.
Fabrikbetriebslehre I: Schwerpunktsetzung.
Stuttgart, Universität Stuttgart, Vorlesung,
2015.
- Bauernhansl *et al.* 2016 Bauernhansl, Thomas; Dombrowski, Uwe,
2016.
*Einfluss von Industrie 4.0 auf unsere
Fabriken und die Fabrikplanung.*
Braunschweig: Technische Universität
Braunschweig.
ISBN 978-3-946916-01-7
- Baur 1979 Baur, Walter, 1979.
Lerngesetz der industriellen Produktion.
In: Kern, Werner (Hrsg.): *Enzyklopädie der
Betriebswirtschaftslehre.*
Stuttgart: C.E. Poeschel, S. 1115–1125
ISBN 3-7910-8017-2
- Becker *et al.* 2007 Becker, Jörg; Algermissen, Lars; Pfeiffer,
Daniel; Räckers, Michael, 2007.
Bausteinbasierte Modellierung von
Prozesslandschaften mit der PICTURE-
Methode am Beispiel der

- Universitätsverwaltung Münster.
Wirtschaftsinformatik **49** (4), S. 267–279
 DOI: 10.1007/s11576-007-0063-0
- Bedford *et al.* 2001 Bedford, T; Cooke, Roger M., 2001.
Probabilistic risk analysis: Foundations and methods.
 Cambridge, UK, New York, NY, USA:
 Cambridge University Press.
 ISBN 9780511813597
- Ben Said *et al.* 2016 Ben Said, Anis; Shahzad, Muhammad
 Kashif; Zamai, Eric; Hubac, Stéphane;
 Tollenaere, Michel, 2016. Experts'
 Knowledge Renewal And Maintenance
 Actions Effectiveness In High-mix Low-
 volume industries, using Bayesian approach.
Cognition, Technology & Work **18** (1), S.
 193–213
 DOI: 10.1007/s10111-015-0354-y
- Bensmaine *et al.* 2013 Bensmaine, A; Dahane, M; Benyoucef, L.,
 2013. A new Heuristic For Integrated
 Process Planning and Scheduling in
 Reconfigurable Manufacturing Systems.
International Journal of Production Research
52 (12), S. 3583–3594
 DOI: 10.1080/00207543.2013.878056
- Bertrand *et al.* 1993 Bertrand, J.W.M; Muntslag, D. R., 1993.
 Production Control in Engineer-to-order
 Firms.

- International Journal of Production Economics* **30-31**, S. 3–22
DOI: 10.1016/0925-5273(93)90077-X
- Boersch *et al.* 2007 Boersch, Ingo; Heinsohn, Jochen; Socher, Rolf, 2007.
Wissensverarbeitung: Eine Einführung in die künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure.
2. Aufl.
München: Elsevier Spektrum Akad. Verl.
ISBN 9783827418449
- Bouissou *et al.* 2003 Bouissou, M; Pourret, Olivier, 2003. A
Bayesian Belief Network based Method for Performance Evaluation and Troubleshooting of Multistate Systems.
International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering **10** (04), S. 407–416
DOI: 10.1142/S0218539303001275
- Bröckelmann 1995 Bröckelmann, Jörg, 1995.
Entscheidungsorientiertes Qualitätscontrolling: Ein ganzheitliches Instrument der Qualitätssicherung.
Gabler edition Wissenschaft.
Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
ISBN 3322855686
- Bullinger 1997 Bullinger, Hans-Jörg, 1997.
Erfolgreich Produzieren am Standort Deutschland: IAO Produktionsforum '97, 21.

- Januar 1997.*
Berlin: Springer-Verlag.
Forschung und praxis 50.
ISBN 3-540-62588-7
- Cai 1996
Cai, Kai-Yuan, 1996. System failure engineering and fuzzy methodology An introductory overview: An introductory overview.
Fuzzy Sets and Systems **83** (2), S. 113–133
DOI: 10.1016/0165-0114(95)00385-1
- Castillo *et al.* 1997
Castillo, Enrique; Gutiérrez, José Manuel; Hadi, Ali S., 1997.
Expert Systems and Probabilistic Network Models.
New York: Springer.
Monographs in computer science.
ISBN 0387948589
- Chang 1990
Chang, Tien-Chien, 1990.
Expert process planning systems.
Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
ISBN 0201182971
- Correa *et al.* 2009
Correa, M; Bielza, C; Pamies-Teixeira, J., 2009. Comparison of Bayesian Networks and Artificial Neural Networks for Quality Detection in a Machining Process.
Expert Systems with Applications **36** (3), S. 7270–7279
DOI: 10.1016/j.eswa.2008.09.024

- Daly *et al.* 2011
Daly, Rónán; Shen, Qiang; Aitken, Stuart,
2011. Learning Bayesian Networks:
Approaches and Issues.
The Knowledge Engineering Review **26** (02),
S. 99–157
DOI: 10.1017/S0269888910000251
- Dey *et al.* 2005
Dey, S; Stori, J. A., 2005. A Bayesian
Network Approach to Root Cause Diagnosis
of Process Variations.
*International Journal of Machine Tools and
Manufacture* **45** (1), S. 75–91
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.06.018
- Dominka *et al.* 2007
Dominka, Sven; Schiller, Frank; Kain,
Sebastian, 2007. Hybrid Commissioning -
Speeding-up Commissioning of Field Bus
Driven Production Plants.
*2007 IEEE International Conference on
Mechatronics*, S. 1–6
DOI: 10.1109/ICMECH.2007.4280024
- Ertel 2013
Ertel, Wolfgang, 2013.
*Grundkurs Künstliche Intelligenz: Eine
praxisorientierte Einführung.*
3., Aufl.
Wiesbaden: Springer Vieweg.
Lehrbuch.
ISBN 978-3-8348-1677-1
- Eversheim 1990
Eversheim, Walter, 1990.
Inbetriebnahme komplexer Maschinen und

- Anlagen: Strategien und Praxisbeispiele zur Rationalisierung in der Einzel- und Kleinserienproduktion.*
Düsseldorf: VDI-Verl.
ISBN 3184010163
- Eversheim 1996 Eversheim, Walter, 1996.
Organisation in der Produktionstechnik.
3., neu bearb. und erw. Aufl.
Düsseldorf: VDI-Verl.
Studium und Praxis.
ISBN 3184015424
- Eversheim 2008 Eversheim, W., 2008.
Innovation Management for Technical Products: Systematic and Integrated Product Development and Production Planning.
Berlin: Springer.
ISBN 9783540857273
- DIN 8580:2003-09 DIN 8580:2003-09.
Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.
- Finkeissen 2000 Finkeissen, Alexander, 2000.
Prozess-wertsch pfung: Neukonzeption eines Modells für die Analyse und Bewertung:
Books on Demand.
Stuttgart, Univ., Diss., 1999.
ISBN 389811435X
- Friebe et al. 2015 Friebe, Tanja; Schneider, Marcel;
Gausemeier, Jürgen; Trächtler, Ansgar,

2015. Virtuelle Inbetriebnahme mit wählbarer Modellierungstiefe.
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb
110 (4), S. 227–232
DOI: 10.3139/104.111316
- Garcia *et al.* 2008
Garcia, Jose Isidro; Gomez Morales, Roy A; Miyagi, Paulo Eigi, 2008.
Supervisory System for Hybrid Productive Systems based on Bayesian Networks and OO-DPT Nets: *ETFA 2008*.
[Piscataway, N.J.]: IEEE Xplore, S. 1108–1111
ISBN 978-1-4244-1505-2
DOI: 10.1109/ETFA.2008.4638536
- Ghahramani 2001
Ghahramani, Zoubin, 2001. An Introduction to Hidden Markov Models and Bayesian Networks.
International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence **15** (01), S. 9–42
DOI: 10.1142/S0218001401000836
- Gosling *et al.* 2009
Gosling, Jonathan; Naim, Mohamed M., 2009. Engineer-To-Order Supply Chain Management: A Literature Review and Research Agenda.
International Journal of Production Economics **122** (2), S. 741–754
DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.07.002

- Gruhn *et al.* 2000 Gruhn, Volker; Wellen, Ursula, 2000.
Process Landscaping - eine Methode zur
Geschäftsprozessmodellierung.
Wirtschaftsinformatik **42** (4), S. 297–309
DOI: 10.1007/BF03250746
- Gutenberg 1951 Gutenberg, Erich, 1951.
Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre.
Berlin, Heidelberg: Springer
- Hamamoto *et al.* 2016 Hamamoto, Kouki; Kitamura, Akira; Taguchi,
Satoshi; Watanabe, Shingo; Matsuno, Hiroki,
2016. Defect Cause Search Support System
Using Ontology and Bayesian Network in
Liquid Crystal Display Manufacturing
Process.
Procedia Computer Science **96**, S. 859–868
DOI: 10.1016/j.procs.2016.08.264
- Hansen 1964 Hansen, Friedrich, 1964.
*Justierung: Eine Einführung in das Wesen
der Justierung von technischen Gebilden*:
VEB Verlag Technik
- Harrison *et al.* 2017 Harrison, Frederick; Lock, Dennis, 2017.
*Advanced Project Management: A Structured
Approach*.
Routledge: Taylor and Francis Ltd.
ISBN 9781351960717
- Hawkins *et al.* 1998 Hawkins, P. G; Woollons, David J., 1998.
Failure Modes and Effects Analysis of

- Complex Engineering Systems using
Functional Models.
Artificial Intelligence in Engineering **12** (4),
S. 375–397
- Heinen 1968 Heinen, Edmund, 1968.
Einführung in die Betriebswirtschaftslehre.
1. Aufl.
Wiesbaden: Gabler.
ISBN 3409327509
- Heinsohn *et al.* 1999 Heinsohn, Jochen; Socher, Rolf, 1999.
Wissensverarbeitung: Eine Einführung.
Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
Spektrum-Hochschultaschenbuch.
ISBN 9783827403087
- Herb *et al.* 1998 Herb, R; Herb, Th; Kratzer, M., 1998.
Potenzielle Fehler vollständig erfassen.
*München: Carl Hanser Verlag, QZ Qualität
und Zuverlässigkeit Jg 43*, S. 183–187
- Hinrichsen 2003 Hinrichsen, Sven, 2003. Unternehmenserfolg
mit System.
*FIR + IAW-Zeitschrift für Organisation und
Arbeit in Produktion und Dienstleistung* (2),
S. 22–23
Verfügbar unter: [http://www.iaw.rwth-
aachen.de/files/19904_hinrichsen.pdf](http://www.iaw.rwth-aachen.de/files/19904_hinrichsen.pdf)
Zugriff am: 07.07.2017

- Huang *et al.* 2008 Huang, Yingping; McMurrin, Ross; Dhadyalla, Gunwant; Peter Jones, R., 2008. Probability Based Vehicle Fault Diagnosis: Bayesian Network Method. *Journal of Intelligent Manufacturing* **19** (3), S. 301–311
DOI: 10.1007/s10845-008-0083-7
- Hüttmann 2003 Hüttmann, Axel, 2003. *Leistungsabhängige Preiskonzepte im Investitionsgütergeschäft: Funktion, Wirkung, Einsatz*. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. Gabler-Edition Wissenschaft. ISBN 9783824478545
- Jones *et al.* 2010 Jones, B; Jenkinson, I; Yang, Z; Wang, J., 2010. The Use of Bayesian Network Modelling for Maintenance Planning in a Manufacturing Industry. *Reliability Engineering & System Safety* **95** (3), S. 267–277
DOI: 10.1016/j.ress.2009.10.007
- Kagermann *et al.* 2013 Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J., 2013. *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Frankfurt Verfügbar unter:

- https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf
Zugriff am: 02.06.2016
- Karbach *et al.* 1990 Karbach, Werner; Linster, Marc, 1990.
*Wissensakquisition für Expertensysteme:
Techniken, Modelle und Softwarewerkzeuge.*
München u.a.: Hanser.
ISBN 3-446-15979-7
- Karst 1992 Karst, Michael, 1992.
*Methodische Entwicklung von
Expertensystemen.*
Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.
DUV-Wirtschaftswissenschaft.
Saarbrücken, Univ., Diss., 1991.
ISBN 3-8244-0106-1
- Kelley *et al.* 1959 Kelley, James E; Walker, Morgan R., 1959.
Critical-Path Planning and Scheduling.
*Proceedings of the Eastern Joint Computer
Conference*, S. 160–173
Zugriff am: 11.03.2016
- Kempf *et al.* 1992 Kempf, Michael; Wahl, V., 1992.
Fehlerdiagnose und Fehlermöglichkeits- und
-einflussanalyse.
Informatik 7 (4), S. 203–209
- Kempf 2008 Kempf, Michael, 2008. Ein Bayes'scher
Ansatz zur Bewertung technischer Risiken im
Entwicklungsprozess.

- Informatik - Forschung und Entwicklung* **22**
(2), S. 85–94
DOI: 10.1007/s00450-007-0031-3
- Kinkel *et al.* 2007
Kinkel, Steffen; Som, Oliver, 2007. Wie deutsche Maschinenbauer ihren Innovationserfolg sichern.
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb **102** (9), S. 572–578
DOI: 10.3139/104.101187
- Kiritsis 1995
Kiritsis, Dimitris, 1995. A Review of Knowledge-Based Expert Systems for Process Planning. Methods and Problems.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **10** (4), S. 240–262
DOI: 10.1007/BF01186876
- Kjræulff *et al.* 2013
Kjræulff, Uffe B; Madsen, Anders L., 2013.
Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis.
2nd ed.
New York, NY: Springer.
Information Science and Statistics 22.
ISBN 1461451043
- Kobbacy *et al.* 2011
Kobbacy, Khairy A.H; McNaught, Ken; Chan, Andy, 2011. Bayesian Networks in Manufacturing.
Journal of Manufacturing Technology

- Management* **22** (6), S. 734–747
DOI: 10.1108/17410381111149611
- Krause *et al.* 1993 Krause, Paul; Clark, Dominic, 1993.
Representing Uncertain Knowledge: An Artificial Intelligence Approach.
Oxford: Intellect.
ISBN 0792324331
- Kubicek 1977 Kubicek, Herbert, 1977.
Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung.
In: Köhler, Richard (Hrsg.): *Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre.*
1. Aufl.
Stuttgart: Poeschel, S. 3–36
ISBN 3-7910-0214-7
- Lanza 2005 Lanza, G., 2005.
Simulationsbasierte Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen.
Karlsruhe, Univ., Diss., 2005.
ISBN 0724-4967
- Lay 1995 Lay, G., 1995.
Strukturwandel in der ostdeutschen Investitionsgüterindustrie.

- Heidelberg: Physica-Verlag HD.
Technik, Wirtschaft und Politik 17.
ISBN 9783642997815
- Li *et al.* 2007 Li, Jing; Shi, Jianjun, 2007. Knowledge Discovery from Observational Data for Process Control using Causal Bayesian Networks.
IIE Transactions **39** (6), S. 681–690
DOI: 10.1080/07408170600899532
- Liang *et al.* 1993 Liang, Gin-Shuh; Wang, Mao-Jiun J., 1993. Fuzzy Fault-Tree Analysis using Failure Possibility.
Microelectronics Reliability **33** (4), S. 583–597
DOI: 10.1016/0026-2714(93)90326-T
- Liggesmeyer *et al.* 2000 Liggesmeyer, P; Mäckel, O., 2000. Automatisierung erweiterter Fehlerbaumanalysen für komplexe technische Systeme (Automation of Augmented Fault Tree Analyses of Complex Technical Systems).
at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik **48** (2/2000), S. 67
- Liu *et al.* 2009 Liu, Yinhua; Jin, Sun, 2009. BN Approach for Dimensional Variation Diagnosis in Assembly Process.
In: 2009 International Workshop on

- Intelligent Systems and Applications (Hrsg.):
*2009 International Workshop on Intelligent
Systems and Applications.*
Piscataway: I E E E, S. 1–5
ISBN 978-1-4244-3893-8
DOI: 10.1109/IWISA.2009.5072768
- Liu *et al.* 2013 Liu, Yinhua; Jin, Sun, 2013. Application of
Bayesian Networks for Diagnostics in the
Assembly Process by considering Small
Measurement Data Sets.
*The International Journal of Advanced
Manufacturing Technology* **65** (9-12), S.
1229–1237
Verfügbar unter: [http://dx.doi.org/10.1007/
s00170-012-4252-7](http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4252-7) DOI: 10.1007/s00170-
012-4252-7
- Loeschenkohl *et al.* 2005 Loeschenkohl, Sven; Sokolovsky, Zbynek,
2005.
*Handbuch Industrialisierung der
Finanzwirtschaft: Strategien, Management
und Methoden für die Bank der Zukunft.*
Wiesbaden: Gabler Verlag.
SpringerLink : Bücher.
ISBN 3663015777
- Lotter *et al.* 2012 Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter, 2012.
*Montage in der industriellen Produktion: Ein
Handbuch für die Praxis.*

2. Aufl.
Berlin: Springer Vieweg
- Lv *et al.* 2014
Lv, Shengping; Qiao, Lihong, 2014. Process Planning and Scheduling Integration with Optimal Rescheduling Strategies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* **27** (7), S. 638–655
DOI: 10.1080/0951192X.2013.834468
- Mansour *et al.* 2012
Mansour, M. M; Wahab, Mohamed A. A; Soliman, Wael M., 2012. Bayesian Networks for Fault Diagnosis of a Large Power Station and its Transmission Lines. *Electric Power Components and Systems* **40** (8), S. 845–863
DOI: 10.1080/15325008.2012.666615
- Manupati *et al.* 2016
Manupati, Vijaya Kumar; Putnik, Goran D; Tiwari, Manoj Kumar; Ávila, Paulo; Cruz-Cunha, Maria Manuela, 2016. Integration of Process Planning and Scheduling using Mobile-Agent Based Approach in a Networked Manufacturing Environment. *Computers & Industrial Engineering* **94**, S. 63–73
DOI: 10.1016/j.cie.2016.01.017
- Manyika 2012
Manyika, J., 2012. *Manufacturing the Future: The next Era of Global Growth and Innovation*.
New York

Verfügbar unter:

<https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/mep/data/Manufacturing-the-Future.pdf>

Zugriff am: 09.01.2017

Masruroh *et al.* 2007

Masruroh, N. A; Poh, K. L., 2007.

A Bayesian Network Approach to Job-Shop Rescheduling.

In: Helander, Martin (Hrsg.): *IEEE*

International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2007.

Piscataway, NJ: IEEE Service Center,
S. 1098–1102

ISBN 978-1-4244-1528-1

DOI: 10.1109/IEEM.2007.4419362

McNaught *et al.*

McNaught, K. R; Zagorecki, A.

Using Dynamic Bayesian Networks for Prognostic Modelling to inform Maintenance

Decision Making: *2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and*

Engineering Management (Hg.) Jan. 2009,
S. 1155–1159

DOI: 10.1109/IEEM.2009.5372973

Mechraoui *et al.* 2008

Mechraoui, Amine; Medjaher, K; Zerhouni,

N., 2008. Bayesian Based Fault Diagnosis :
Application to an Electrical Motor.

17th IFAC World Congress

- Meier 2011
Meier, Gunter, 2011.
Prozessintegration des Target-Costings in der Fertigungsindustrie am Beispiel Sondermaschinenbau.
Karlsruhe.
Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe Bd. 2, 2011.
Karlsruhe, Univ., Diss., 2011.
ISBN 978-3-86644-679-3
- Mengshoel *et al.* 2008
Mengshoel, Ole J; Darwiche, Adnan; Uckun, Serdar, 2008. Sensor Validation using Bayesian Networks.
9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space
Zugriff am: 12.10.2016
- Mertens 1986
Mertens, P., 1986. Expert Systems in Production Management: An Assessment.
Journal of Operations Management **6** (3-4), S. 393–404
DOI: 10.1016/0272-6963(86)90012-4
- Moore *et al.* 2003
Moore, P. R; Pu, J; Ng, H. C; Wong, C. B; Chong, S. K; Chen, X; Adolfsson, J; Olofsgård, P; Lundgren, J.-O., 2003. Virtual Engineering: An Integrated Approach to Agile Manufacturing Machinery Design and Control.
Mechatronics - a 12 year celebration **13** (10),

- S. 1105–1121
DOI: 10.1016/S0957-4158(03)00045-X
- Nagel 2011
Nagel, Jörg, 2011.
Risikoorientiertes Anlaufmanagement.
Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer
Fachmedien.
Gabler Research. Beiträge zur
Produktionswirtschaft.
ISBN 978-3-8349-3087-3
- Nembhard *et al.* 2001
Nembhard, Harriet Black; Nembhard, David
A., 2001. The Use of Bayesian Forecasting
to make Process Adjustments during
Transitions.
European Journal of Operational Research
130 (2), S. 437–448
DOI: 10.1016/S0377-2217(00)00057-6
- Neugebauer *et al.* 2011
Neugebauer, Reimund; Schob, Uwe, 2011.
Reducing the Model Generation Effort for the
Virtual Commissioning of Control Programs.
Production Engineering **5** (5), S. 539–547
DOI: 10.1007/s11740-011-0317-y
- Newman *et al.* 2015
Newman, Stephen T; Zhu, Zicheng; Dhokia,
Vimal; Shokrani, Alborz, 2015. Process
Planning for Additive and Subtractive
Manufacturing Technologies.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **64**
(1), S. 467–470
DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.109

- Niebel 1965
 Niebel, Benjamin W., 1965. Mechanized Process Selection for Planning new Designs. *ASME paper 737*
- Park *et al.* 2006
 Park, Chang Mok; Bajimaya, Sachin Man; Park, Sang C; Wang, Gi Nam; Kwak, Jong Geun; Han, Kwan Hee; Chang, Minho, 2006. Development of Virtual Simulator for Visual Validation of PLC Program
 Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/4052642/4052643/04052679.pdf?tp=&arnumber=4052679&isnumber=4052643>
 Zugriff am: 03.02.2015
- Penya *et al.* 2008
 Penya, Yoseba K; Bringas, Pablo G; Zabala, Argoitz, 2008.
 Advanced Fault Prediction in High-Precision Foundry Production: *6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2008*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 1672–1677
 ISBN 978-1-4244-2170-1
 DOI: 10.1109/INDIN.2008.4618372
- Perzyk *et al.* 2005
 Perzyk, Marcin; Biernacki, Robert; Kocharński, Andrzej, 2005. Modeling of Manufacturing Processes by Learning Systems: The Naïve Bayesian Classifier versus Artificial Neural Networks. *AMPT/AMME05 Part 2 164–165 (0)*,

S. 1430–1435

DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.043

Plehn *et al.* 2016

Plehn, Christian; Stein, Florian; de Neufville, Richard; Reinhart, Gunter, 2016. Assessing the Impact of Changes and their Knock-on Effects in Manufacturing Systems.

49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016)

Poeschl *et al.* 2016

Poeschl, Sebastian; Helbig, Tobias; Jacobi, Hans-Friedrich; Bauernhansl, Thomas, 2016.

Aktuelle Forschungsansätze für den

Sondermaschinenbau: Der

Sondermaschinenbau –

Gegenstandsbereich, Definition und

Forschungsergebnisse.

wt Werkstatttechnik online **106** (11/12), S.

851–856

Poeschl *et al.* 2016

Poeschl, Sebastian; Wirth, Frank;

Bauernhansl, Thomas, 2016. Process

Planning in Commissioning and its Validation

in Special Machinery using Bayesian

Networks.

International Conference of Industrial

Engineering (IJIE)

Poeschl *et al.* 2016

Poeschl, Sebastian; Wirth, Frank;

Bauernhansl, Thomas, 2016. Situation-based

Methodology for Planning the

Commissioning of Special Machinery using

- Bayesian Networks.
CIRP Conference on Manufacturing Systems
(49), S. 247–252
- Poeschl *et al.* 2017 Poeschl, Sebastian; Lieb, Jannik; Wirth, Frank; Bauernhansl, Thomas, 2017. Expert Systems in Special Machinery: Increasing the Productivity of Processes in Commissioning.
CIRP Conference on Manufacturing Systems
50, S. 545–550
DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.162
- Poeschl *et al.* 2017 Poeschl, Sebastian; Roeck, Dominik; Wirth, Frank; Bauernhansl, Thomas, 2017. Process Planning in Special Machinery: Increasing Reliability in Volatile Surroundings.
CIRP Conference on Manufacturing Systems
50, S. 551–556
DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.163
- Poeschl *et al.* 2018 Poeschl, Sebastian; Wirth, Frank; Bauernhansl, Thomas, 2018. Strategic Process Planning for Commissioning Processes in Mechanical Engineering.
International Journal of Production Research
16 (4), S. 1–13
DOI: 10.1080/00207543.2018.1556408
- Popper 1973 Popper, Karl R., 1973.
Objektive Erkenntnis: Ein evolutionärer Entwurf.

- Hamburg: Hoffmann, Campe.
Kritische Wissenschaft.
ISBN 3-455-09088-5
- Possel-Dölken 2010 Possel-Dölken, Frank, 2010.
Mechatronische Modularisierung im
Sondermaschinenbau: *Paderborner
Workshop Entwurf mechatronischer
Systeme*, S. 357–370
- Pradhan *et al.* 2007 Pradhan, Satyabrata; Singh, Rajveer;
Kachru, Komal; Narasimhamurthy, Srinivas,
2007.
A Bayesian Network Based Approach for
Root-Cause-Analysis in Manufacturing
Process: *International Conference on
Computational*, S. 10–14
DOI: 10.1109/CIS.2007.214
- VDA 4.2 VDA 4.2:2009.
*Produkt-und Prozess-FMEA. Band 4.
Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz,
Qualitätsmanagmenet-Center (QMC).*
- VDI-2247 VDI-2247:1994.
*Qualitätsmanagement in der
Produktentwicklung.*
- Rabe *et al.* 2008 Rabe, Markus; Spieckermann, Sven;
Wenzel, Sigrid, 2008.
*Verifikation und Validierung für die
Simulation in Produktion und Logistik:*

- Vorgehensmodelle und Techniken.*
 Berlin, Heidelberg: Springer.
 VDI-Buch.
 ISBN 978-3-540-35281-5
- Ramesh *et al.* 2003 Ramesh, R; Mannan, M. A; Poo, A. N;
 Keerthi, S. S., 2003. Thermal Error
 Measurement and Modelling in Machine
 Tools. Part II. Hybrid Bayesian Network—
 Support Vector Machine Model.
*International Journal of Machine Tools and
 Manufacture* **43** (4), S. 405–419
 DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00264-X
- Reinhart *et al.* 2007 Reinhart, Gunther; Wünsch, Georg, 2007.
 Economic Application of Virtual
 Commissioning to Mechatronic Production
 Systems.
Production Engineering **1** (4), S. 371–379
 DOI: 10.1007/s11740-007-0066-0
- DIN ISO 31000 DIN ISO 31000:2011.
*Risikomanagement – Grundsätze und
 Leitlinien.*
- Rocek 1972 Rocek, Vladimir, 1972.
*Zerspanungswerkzeuge fuer den
 Sondermaschinenbau und automatische
 Fertigungstaktstrassen.*
 Stuttgart-Vaihingen: Grossmann

- Röck 2007 Röck, Sascha, 2007.
Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungselementen.
Heimsheim: Jost-Jetter.
ISW-Forschung und Praxis 168.
ISBN 9783939890249
- Rodrigues *et al.* 2000 Rodrigues, M. A; Liu, Y; Bottaci, L; Rigas, D. I., 2000.
Learning and Diagnosis in Manufacturing Processes through an Executable Bayesian Network.
In: Loganantharaj, Rasiah (Hrsg.): *Intelligent problem solving.*
Berlin u.a.: Springer, S. 390–396
ISBN 978-3-540-67689-8
DOI: 10.1007/3-540-45049-1_47
- Romessis *et al.* 2006 Romessis, C; Mathioudakis, K., 2006.
Bayesian Network Approach for Gas Path Fault Diagnosis.
Journal of Engineering for Gas Turbines and Power **128** (1), S. 64
DOI: 10.1115/1.1924536
- Sammut *et al.* 2011 Sammut, Claude; Webb, Geoffrey I., 2011.
Encyclopedia of Machine Learning.
New York, NY: Springer.
Springer reference.
ISBN 978-0-387-30164-8

- Sandig *et al.* 1981 Sandig, Curt; Geist, Manfred N; Köhler, Richard, 1981.
Die Führung des Betriebes: Herrn Professor Dr. Dr. h.c. Curt Sandig zu seinem 80. Geburtstag gewidmet.
Stuttgart: Poeschel
- Schares 1999 Schares, Ludwig Peter, 1999.
Methodik zur technischen Auftragsklärung komplexer, kundenspezifischer Sondermaschinen und Anlagen.
Als Ms. gedr.
Aachen: Shaker.
Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 99,1.
ISBN 9783826545771
- Schilke 2010 Schilke, Martin 2010.
Einsatz von Produktdatenmanagement-Systemen im Sondermaschinenbau für die Automobilindustrie.
Saarbrücken, Universität des Saarlandes, 2010.
- Schlick *et al.* 2010 Schlick, Christopher; Luczak, H; Bruder, Ralph, 2010.
Arbeitswissenschaft.
3., vollständig überarbeitete und erw. Aufl.
Heidelberg: Springer
- Schlöter 2003 Schlöter, Wolfram 2003.
Strategien zur Effizienzsteigerung von

- Konstruktion und Fertigung für einen optimierten Produktentwicklungsprozess im Sondermaschinenbau*, Universität Essen, 2003.
- Schuh 2006
 Schuh, G., 2006.
Fabrikplanung: Vorlesung 4 - Production Systems I.
 Aachen
 Verfügbar unter: http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/7bfd32120f8ba69bc1256f330029938b/fp_vorlesung_4_ss2006oa.pdf
 Zugriff am: 30.09.2014
- Schuh 2012
 Schuh, Günther, 2012.
Innovationsmanagement: Handbuch Produktion Und Management 3.
 2., Aufl. 2012.
 Berlin: Springer Verlag.
 Handbuch Produktion und Management 3.
 ISBN 978-3-642-25049-1
- Schuh *et al.* 2013
 Schuh, Günther; Lenders, Michael, 2013.
Lean Innovation.
 Berlin, Heidelberg: Springer.
 VDI-Buch.
 ISBN 3540769153
- DIN EN ISO 12100-1
 DIN EN ISO 12100-1:2004.
Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze – Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodologie.

- VDI-Richtlinie VDI 3633 VDI-Richtlinie VDI 3633:2014.
Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen.
- VDI 3633:2014-12 VDI 3633:2014-12:2014.
Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen, Blatt 1.
- Sossenheimer 1989 Sossenheimer, Karlheinz 1989.
Entwickeln von Instrumentarien zur rationellen Planung und Steuerung der Inbetriebnahme komplexer Produkte des Werkzeugmaschinenbaus.
Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 1989.
- Spiegelhalter *et al.* 1993 Spiegelhalter, David J; Dawid, Philip A; Lauritzen, Steffen L; Cowell, Robert G., 1993. Bayesian Analysis in Expert Systems. *Statistical Science* (8), S. 219–247
- Stefik *et al.* 1982 Stefik, Mark; Aikins, Jan; Balzer, Robert; Benoit, John; Birnbaum, Lawrence; Hayes-Roth, Frederick; Sacerdoti, Earl, 1982. The organization of expert systems, a tutorial. *Artificial Intelligence* **18** (2), S. 135–173
DOI: 10.1016/0004-3702(82)90038-8
- Suwa *et al.* 2013 Suwa, Haruhiko; Sandoh, Hiroaki, 2013.
Online scheduling in manufacturing: A cumulative delay approach.
London, New York: Springer.
ISBN 1283910314

TCW - Transfer-Centrum Wildemann 2015

TCW - Transfer-Centrum Wildemann, 2015.

*Herausforderungen in der
Auftragsabwicklung im
Sondermaschinenbau.*

München

Verfügbar unter:

[http://www.tcw.de/news/herausforderungen-
in-der-auftragsabwicklung-im-
sondermaschinenbau-779](http://www.tcw.de/news/herausforderungen-in-der-auftragsabwicklung-im-sondermaschinenbau-779)

Zugriff am: 05.07.2016

The World Bank Group 2019

The World Bank Group, 2019.

*Manufacturing, Value Added (% of GDP) |
Data*

Verfügbar unter:

[http://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.M
ANF.ZS](http://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS)

Zugriff am: 04.08.2019

Tobon-Mejia *et al.* 2012

Tobon-Mejia, D. A; Medjaher, K; Zerhouni,

N., 2012. CNC Machine Tool's Wear

Diagnostic and Prognostic by using Dynamic
Bayesian Networks.

Mechanical Systems and Signal Processing

28, S. 167–182

DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.10.018

Ulrich *et al.* 1976

Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm, 1976.

Wissenschaftstheoretische Grundlagen der

- Betriebswirtschaftslehre (Teil I).
WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium
5 (7), S. 304–309
Zugriff am: 09.06.2017
- Ulrich 2001
Ulrich, Hans, 2001.
Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich.
Studienausgabe.
Bern: Haupt.
ISBN 3258063591
- VDI 1990
VDI (Hrsg.) , 1990.
Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen: Tagung Frankfurt, 28. Juni 1990.
Düsseldorf: VDI-Verlag.
ISBN 3-18-090831-9
Verfügbar unter:
[http%3A//www.worldcat.org/oclc/22381158](http://www.worldcat.org/oclc/22381158)
- VDMA 2015
VDMA, 2015.
Die VDMA-Fachverbände: Ihre Themen - unsere Experten
Verfügbar unter:
<http://www.vdma.org/organisationen>
Zugriff am: 09.09.2015
- VDMA 2019
VDMA, 2019.
Maschinenbau in Zahl und Bild 2019
Verfügbar unter:
<https://www.vdma.org/v2viewer/->

/v2article/render/26250226

Zugriff am: 04.08.2019

VDMA-McKinsey 2014

VDMA-McKinsey, 2014.

The Future of German Mechanical Engineering: Operating Successfully in a Dynamic Environment

Verfügbar unter: www.vdma.org

Zugriff am: 21.11.2014

Wang *et al.* 1995

Wang, J; Yang, J. B; Sen, P., 1995. Safety Analysis and Synthesis using Fuzzy Sets and Evidential Reasoning.

Reliability Engineering & System Safety **47** (2), S. 103–118

DOI: 10.1016/0951-8320(94)00053-Q

Weber 2006

Weber, Klaus H., 2006.

Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen.

3., vollständig bearbeitete und aktualisierte Aufl.

Berlin, New York: Springer.

VDI

Weber 2016

Weber, Klaus H., 2016.

Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen.

4th vollst. bearb. u. aktualisierte ed. 2016.

- VDI-Buch.
ISBN 9783662481615
- Weck *et al.* 1995 Weck, Manfred; Assmann, Stefan, 1995.
Abteilungsübergreifende Projektierung
komplexer Maschinen und Anlagen.
VDI-Z integrierte Produktion **10** (137), S. 54–
60
- Wiendahl *et al.* 2002 Wiendahl, H.-P; Hegenscheidt, M; Winkler,
H., 2002. Anlaufrobuste Produktionssysteme.
wt Werkstattstechnik online **92** (11/12), S.
650–655
Verfügbar unter: [http://
www.werkstattstechnik.de/wt/
article.php?data%5Barticle_id%5D=528](http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data%5Barticle_id%5D=528)
- Wiendahl *et al.* 2002 Wiendahl, H.-P; Lutz, S., 2002. Production in
Networks.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **51**
(2), S. 573–586
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61701-6
- WRS - Wirtschaftsförderung Region Stuttgart 2011
WRS - Wirtschaftsförderung Region
Stuttgart, 2011.
Strukturbericht Region Stuttgart.
Stuttgart/Tübingen
Verfügbar unter: [http://wrs.region-
stuttgart.de/sixcms/media.php/923/Strukturber-
icht%202011.pdf](http://wrs.region-stuttgart.de/sixcms/media.php/923/Strukturbericht%202011.pdf)
Zugriff am: 28.11.2014

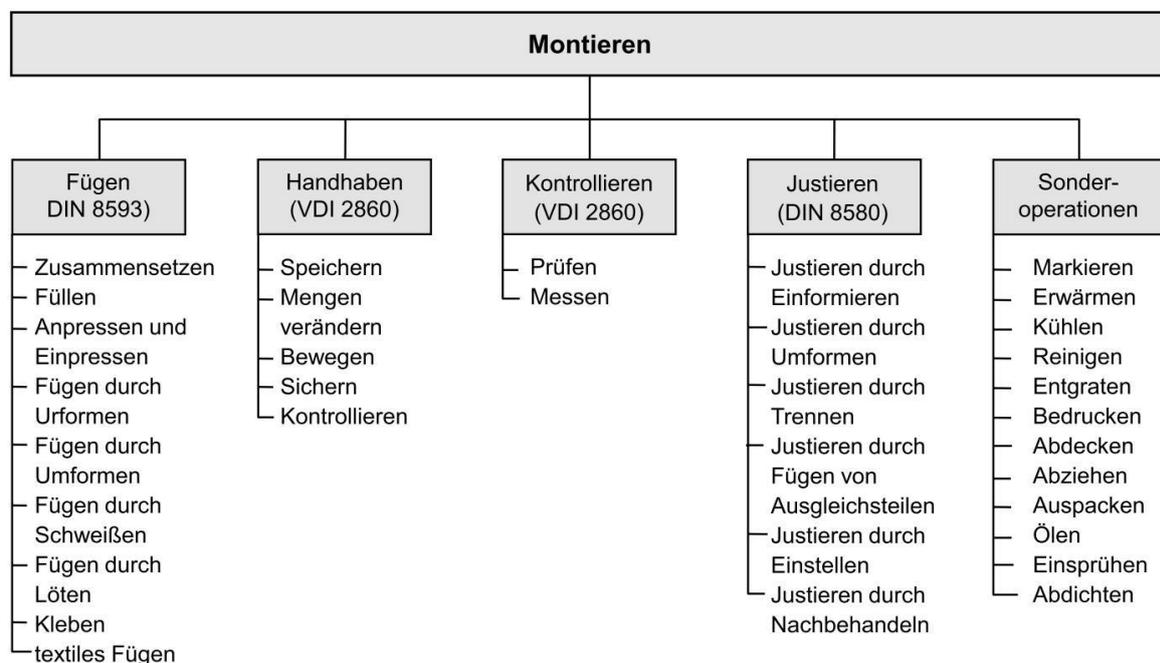
- Wünsch 2008
Wünsch, Georg, 2008.
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme.
München: Utz.
Forschungsberichte IWB 215.
ISBN 978-3-8316-0795-2
- Xu *et al.* 2011
Xu, Xun; Wang, Lihui; Newman, Stephen T.,
2011. Computer-Aided Process Planning—A
Critical Review of Recent Developments and
Future Trends.
*International Journal of Computer Integrated
Manufacturing* **24** (1), S. 1–31
DOI: 10.1080/0951192X.2010.518632
- Yang *et al.* 2012
Yang, Lei; Lee, Jay, 2012. Bayesian Belief
Network-based approach for diagnostics and
prognostics of semiconductor manufacturing
systems.
*Robotics and computer-integrated
manufacturing* **28** (1), S. 66–74
DOI: 10.1016/j.rcim.2011.06.007
- Yuhua *et al.* 2005
Yuhua, Dong; Datao, Yu, 2005. Estimation of
failure probability of oil and gas transmission
pipelines by fuzzy fault tree analysis.
*Journal of Loss Prevention in the Process
Industries* **18** (2), S. 83–88
DOI: 10.1016/j.jlp.2004.12.003

- Zadeh 1965
Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets.
Information and Control **8** (3), S. 338–353
DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- Zäh *et al.* 2005
Zäh, Michael F; Wunsch, Georg, 2005.
Schnelle Inbetriebnahme von
Produktionssystemen.
wt Werkstattstechnik online **95** (9), S. 699–
704
Verfügbar unter: [http://
www.werkstattstechnik.de/wt/
article.php?data%5Barticle_id%5D=2423](http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data%5Barticle_id%5D=2423)
Zugriff am: 28.11.2018
- Zäh *et al.* 2006
Zäh, Michael F; Wunsch, Georg; Hensel,
Thomas; Lindworsky, Alexander, 2006.
Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme: Ein
Experiment.
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb :
ZWF **101** (10), S. 595–599
- Zhang *et al.* 2015
Zhang, Guangquan; Lu, Jie; Gao, Ya, 2015.
*Multi-Level Decision Making: Models,
Methods and Applications.*
s.l.: Springer-Verlag.
Intelligent Systems Reference Library 82.
ISBN 9783662460580

Anhänge

Justieren

Das Justieren ist ein essenzieller Bestandteil der Inbetriebnahme und bedeutet, „Bauelemente während oder nach der Montage so zu bewegen, dass sie die für die **gewünschte Funktion des gesamten technischen Gebildes** notwendige Lage bekommen.“ (Hansen, F.) Lotter und Wiendahl ordnen das Justieren dem Montieren neben dem Fügen, Handhaben, Kontrollieren und Sonderoperationen zu (Lotter, B. & Wiendahl, H.-P., S. 2).



- *Abbildung 0-1: Montieren (Lotter, B. & Wiendahl, H.-P., S. 2)*

Weiter orientieren sie sich an der DIN 8580 und unterteilen das Justieren in die Kategorien Justieren durch Einformieren, Umformen, Trennen, Fügen von Ausgleichsteilen, Einstellen und Nachbehandeln (11; Lotter, B. & Wiendahl, H.-P., S. 2). In der Forschungsfrage kann das Justieren in der allgemeinen Form beibehalten werden. Die Unterkategorien werden aus diesem Grund nicht weiter betrachtet.

Anwendungsmethodik des Prozessmodells

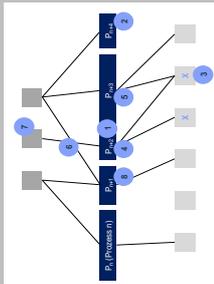
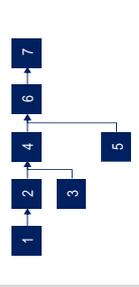
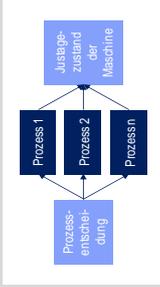
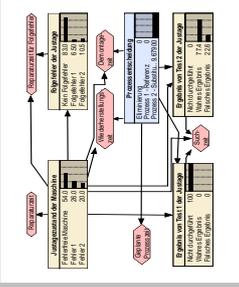
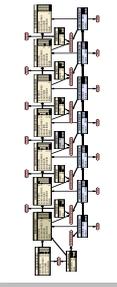
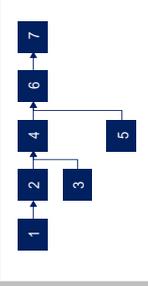
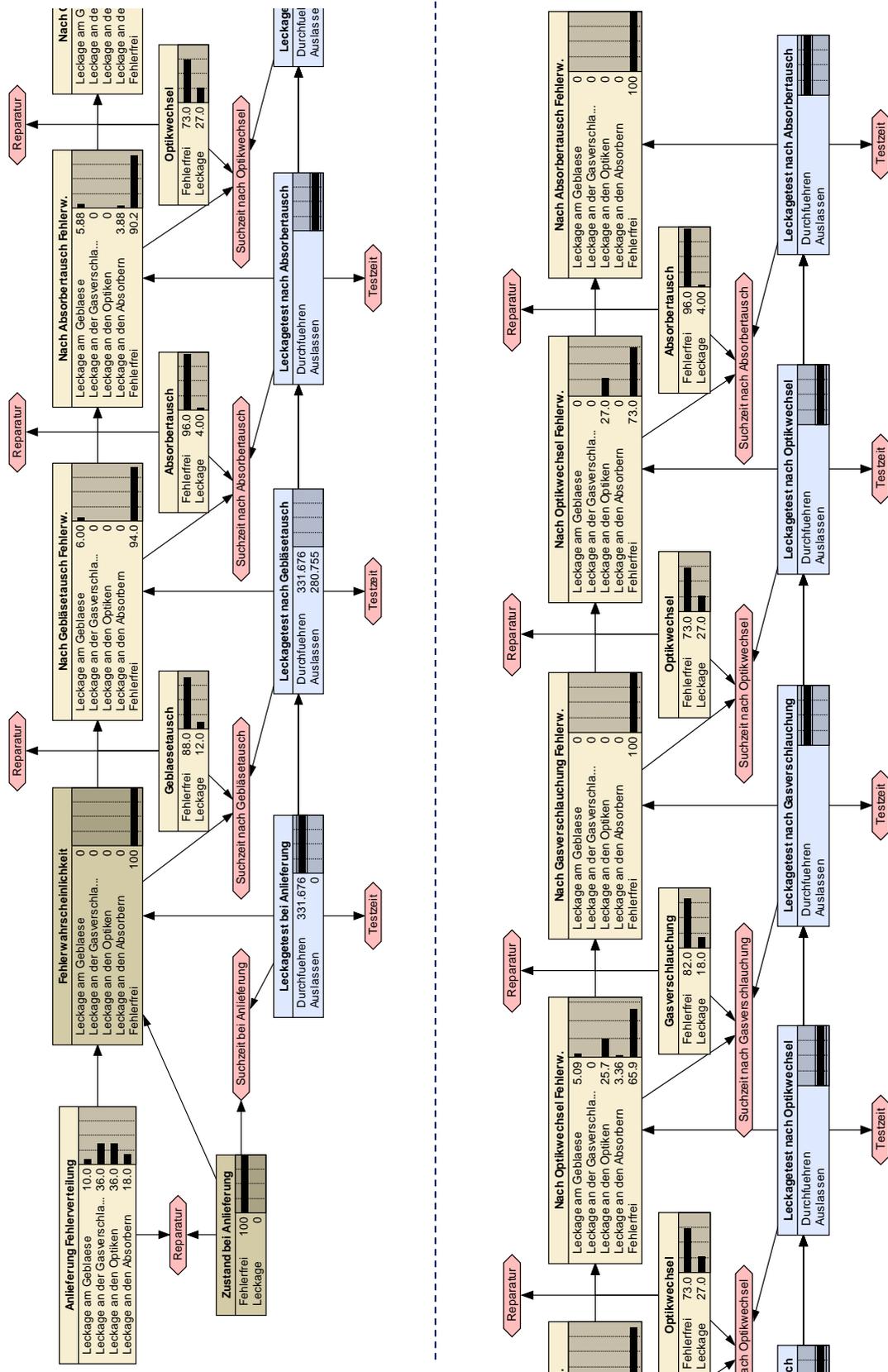
<h2>Prozessplan</h2> <ul style="list-style-type: none"> - Heuristische Prozessoptimierung  <ul style="list-style-type: none"> - Priorisierung 	<h2>Modellbildung</h2> <ul style="list-style-type: none"> - Abgrenzung und Reduktion  <ul style="list-style-type: none"> - Dekomposition  <ul style="list-style-type: none"> - Aggregation Modulbildung und Zusammenfassung - Abstraktion Variablen der Simulation 	<h2>Modell</h2> <ul style="list-style-type: none"> - Instanziierung  <ul style="list-style-type: none"> - Implementierung 	<h2>Simulation</h2> <ul style="list-style-type: none"> - Direktberechnung (valide Datengrundlage) - Versuchsplan (Ergebnisoptimierung) - Robustheits-/Sensitivitätsanalyse 	<h2>Handlungsempfehlung</h2> <ul style="list-style-type: none"> - Restriktionen - Simulationsauswertung - Handlungsempfehlung 
--	--	---	---	---



Abbildung 9-4: Zustandsveränderungen über den Inbetriebnahmeprozess



Weitere Fallbeispiele

Die in den Kapitel 9 vorgestellten Fallbeispiele beweisen die Anwendbarkeit des Prozessplanungsmodells an einem Beispiel der Substitution, der Eliminierung und bei vernetzten Produktionsplänen. Weitere durchgeführte Fallbeispiele sind die Einführung von einer neuen Messmethode und die Verkürzung einer Prüfung an dem Beispiel eines Teilchenbeschleunigers.

Die Einführung einer neuen Messmethode ist stets mit der Unsicherheit behaftet, eine falsche Vorgehensweise festzulegen. Im betrachteten Beispiel wird deswegen der Durchfluss der Kühlwasserverschlauchung über die Temperaturänderung in einem durchflossenen Schlauch getestet. Die Referenzmethode ist das Überprüfen der Verschlauchung über integrale Durchflusstests. Die neue Messmethode sieht vor, dass nach dem Einschalten des Kühlwasserkreislaufs innerhalb einer bestimmten Zeit Temperaturmessungen durchgeführt und so Veränderungen im Fall eines korrekt durchflossenen Schlauchs diagnostiziert werden. Jedoch verfälschen externe Einflüsse das Messergebnis und führen somit zu falschen Rückschlüssen. Diese Unsicherheit ist in einem Prozessplanungsmodul modellierbar. Dafür bewerten Prozessexperten alle Fehlerzustände im Knoten Maschinenzustand nach Auftretenshäufigkeit. Zudem werden zwei Prüfknoten eingeführt, mit Prüfdauern versehen und die Ergebnisgüte bewertet.

Das Ergebnis für das erläuterte Fallbeispiel ergab eine Fehlerzeitreduzierung um 40%. Trotz der deutlich aufwändigeren Temperaturmessungen, im Vergleich zum integralen Durchflusstest, reduzierten sich die Folgefehler und führten damit zu einer Verringerung der Aufwände für Fehler. Damit ist die Anwendbarkeit der Methode Substitution in diesem Fallbeispiel erwiesen.

Eine Anwendung der Prozessplanungsmethode ist beim Teilchenbeschleuniger im Projekt XFEL, welcher aus vielen baugleichen Modulen besteht, geplant. Im finalen Zustand sind alle Module miteinander verbunden und über einen Heliumleckagetest auf Dichtigkeit geprüft. Leckagen können entweder intern im Modul auftreten oder an den Schnittstellen zweier Module. Die Prüfung und Reparatur der internen Leckagen findet auf einem Teststand statt. Dadurch werden die auftretenden Leckagen im verbauten Zustand reduziert. Die Prüfung der Schnittstellen zweier Module kann nur im verbauten Zustand vorgenommen werden. Die Prüfung auf die internen Leckagen ist der längste Prozess und bestimmt die Installationsgeschwindigkeit der Module. Das Prozessplanungsmodell ermöglicht die Modellierung der Prüfung und die Darstellung der Risiken für den Zusammenbau. Modelliert wurden der aktuelle Stand und eine verkürzte Prüfung. Die verkürzte Prüfung ermöglichte eine reduzierte Dauer und damit einen erhöhten Ausstoß der Module aus dem Teststand. Jedoch erhöhte sich damit auch das Risiko, dass eine Leckage im zusammengebauten Teilchenbeschleuniger auftritt. Die verkürzte Prüfung ergab unter Berücksichtigung der Test- und Reparaturdauern eine Reduzierung dieser Zeiten um 40%. Damit ist die gesamte Inbetriebnahme verkürzt, obwohl im verbauten Zustand eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit besteht. Mit Hinblick auf die Durchlaufzeitreduzierung ist dieses Risiko jedoch statistisch vertretbar.

Beide Beispiele, die Einführung einer neuen Messmethode und die Reduzierung der Prüfzeit eines Teilchenbeschleunigers, weisen die Anwendbarkeit der Methode nach. Außerdem sind nennenswerte Zeitreduzierungen in Prüfprozessen aufgrund einer Risikobetrachtung möglich.

Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Name: Sebastian Wolfgang Pöschl
Geburtsdatum: 8. November 1988
Geburtsort: Ludwigsburg
Familienstand: verheiratet
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung:

1995 - 1999 Grundschole, Murr
1999 - 2008 Friedrich-Schiller-Gymnasium, Marbach

Hochschulstudium:

2008 - 2012 Bachelorstudium Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Vertiefungsrichtung „Globale Produktion und Logistik“
2012 - 2014 Masterstudium Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Vertiefungsrichtung „Allgemeiner Maschinenbau“

Berufserfahrung:

2014 - 2017 Stipendiat an der Graduate School of excellence advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart, Erstbetreuer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bauernhansl
2017 - 2021 Produktionsleiter „Beam Transport Systems EUV“ bei der TRUMPF Lasersystems for Semiconductor Manufacturing GmbH

Stuttgart, im Februar 2021

Sebastian Wolfgang Pöschl

Veröffentlichungen

POESCHL, Sebastian; HELBIG, Tobias; JACOBI, Hans-Friedrich;

BAUERNHANSL, Thomas: *Aktuelle Forschungsansätze für den Sondermaschinenbau: Der Sondermaschinenbau – Gegenstandsbereich, Definition und Forschungsergebnisse*. In: **wt Werkstatttechnik online 106 (2016)**, 11/12, S. 851–856

POESCHL, Sebastian; LIEB, Jannik; WIRTH, Frank; BAUERNHANSL, Thomas:

Expert Systems in Special Machinery: Increasing the Productivity of Processes in Commissioning. In: **CIRP Conference on Manufacturing Systems (2017a)**, Nr. 50, S. 545–550

POESCHL, Sebastian; ROECK, Dominik; WIRTH, Frank; BAUERNHANSL,

Thomas: *Process Planning in Special Machinery: Increasing Reliability in Volatile Surroundings*. In: **CIRP Conference on Manufacturing Systems (2017b)**, Nr. 50, S. 551–556

POESCHL, Sebastian; WIRTH, Frank; BAUERNHANSL, Thomas: *Process*

Planning in Commissioning and its Validation in Special Machinery using Bayesian Networks. In: **International Conference of Industrial Engineering (IJIE) (2016a)**

POESCHL, Sebastian; WIRTH, Frank; BAUERNHANS�, Thomas: *Situation-Based Methodology for Planning the Commissioning of Special Machinery using Bayesian Networks*. In: **CIRP Conference on Manufacturing Systems (2016b)**, Nr. 49, S. 247–252

POESCHL, Sebastian; WIRTH, Frank; BAUERNHANS�, Thomas: *Strategic Process Planning for Commissioning Processes in Mechanical Engineering*. In: **International Journal of Production Research 16 (2018)**, Nr. 4, S. 1–13

Der Maschinenbau ist maßgeblich am Erfolg der produzierenden Industrie beteiligt, daher ist ein effizienter Produktentstehungsprozess besonders wichtig. Der Forschungsansatz dieser Arbeit verdeutlicht das Potenzial der Prozessplanung unter der Berücksichtigung von Fehlerrisiken während der Inbetriebnahme. Damit wird in der Prozessplanung erstmals eine Risikoanalyse in die Berechnung der Durchlaufzeit integriert. Auf diese Weise ist es erstmals möglich, nicht nur die Durchlaufzeit eines Projektes zu betrachten, sondern gleichzeitig die wahrscheinlichste Durchlaufzeit und das resultierende Fehlerrisiko für den Kunden zu errechnen. In Fallbeispielen wird eine Prozessoptimierung beschrieben und die Durchlaufzeit um bis zu 40% reduziert.

Der Ansatz dieses Prozessplanungsmodells für eine Effizienzsteigerung in Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau leistet damit einen entscheidenden Beitrag, eine Forschungslücke in der Inbetriebnahme zu schließen.

ISBN 978-3-8396-1734-2



FRAUNHOFER VERLAG