



FAU Studien aus dem Maschinenbau 460

Benjamin Gerschütz

Identifikation von Anwendungsfällen und
Integration datengetriebener Methoden im
Produktentwicklungsprozess

Benjamin Gerschütz

Identifikation von Anwendungsfällen und Integration datengetriebener Methoden im Produktentwicklungsprozess

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 460

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Benjamin Gerschütz

**Identifikation von Anwendungsfällen und
Integration datengetriebener Methoden im
Produktentwicklungsprozess**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
(KTmfk), Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Erlangen
FAU University Press
2025

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

Kontakt: Benjamin Gerschütz, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ([ror https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)), ORCID: 0000-0001-5343-3326

Bitte zitieren als

Gerschütz, Benjamin. 2025. *Identifikation von Anwendungsfällen und Integration datengetriebener Methoden im Produktentwicklungsprozess*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 460. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-815-6

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-814-9 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-815-6 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-815-6

**Identifikation von Anwendungsfällen und Integration
datengetriebener Methoden im
Produktentwicklungsprozess**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Benjamin Bernd Gerschütz, M.Sc.

aus Schweinfurt

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen
Prüfung: 21.03.2025

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark, Technische
Universität Berlin

Vorwort

Die erste Pflicht eines Menschen ist es, die richtige Beziehung zur Gesellschaft einzunehmen – kurz gesagt, seine wahre Aufgabe zu finden und zu erfüllen.

Charlotte Perkins Gilman

Die vorliegende Dissertation ist das Ergebnis meiner intensiven Forschungsarbeit, die ich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) durchgeführt habe. Die Grundlagen dieser Arbeit wurden im Rahmen des Forschungsverbundes BFS FORCuDE (Customized Digital Engineering für bayerische KMU) erarbeitet, dessen Rahmenbedingungen und Unterstützung ich sehr schätze. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei all jenen bedanken, die auf vielfältigste Art und Weise zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack, dessen fachliche Expertise, inspirierende Anleitung und kontinuierliche Unterstützung maßgeblich dazu beigetragen haben, dass dieses Werk entstehen konnte. Für die mir ermöglichten Freiheiten und die zahlreichen fachlichen Diskussionen, ebenso wie die angenehme Arbeitsatmosphäre und die stetige Unterstützung sowohl in wissenschaftlichen als auch persönlichen Angelegenheiten möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenso gilt mein Dank meinem Zweitgutachter Professor Rainer Stark, dessen Mitwirkung und Expertise die Qualität dieser Arbeit weiter gestärkt haben. Weiterhin danke ich Professor Lutz Schröder für die Bereitschaft, die Funktion des fachfremden Prüfers zu übernehmen. Professor Florian Risch möchte ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bei der mündlichen Promotionsprüfung meinen Dank aussprechen.

Die Unterstützung durch die Firmen CADFEM GmbH, PSW engineering GmbH und WAGO GmbH & Co. KG hat einen wesentlichen Beitrag geleistet und mir wertvolle Einblicke in die industrielle Praxis ermöglicht, ohne die diese Arbeit schwer möglich gewesen wäre. Namentlich erwähnen möchte ich hier Yvonne Consten (PSW), Matthias Hörmann (CADFEM) und Jörg Bernsdorf (CADFEM) sowie Frederic Paret (WAGO), Wilhelm Rust (WAGO) und Patrick Grembowietz (WAGO).

Mein aufrichtiger Dank geht auch an meine Kollegen und Freunden am Lehrstuhl KTmfk für die hilfreichen Anregungen, kritischen Diskussionen und die schönen Momente innerhalb und außerhalb des Lehrstuhls. Meinen beiden Oberingenieuren Prof. Dr.-Ing. habil. Benjamin Schleich und Dr.-Ing. Stefan Götz möchte ich für die fachliche und persönliche Begleitung meiner Entwicklung danken. Besonderer Dank gilt meinen Bürokollegen Sebastian Bickel, Jakob Harlan, Dr.-Ing. Marius Fechter und Dr.-Ing. Tobias Sprügel, die mit ihrem kollegialen Umfeld einen positiven Beitrag zur Entstehung dieser Dissertation geleistet haben. Ein herzlicher Dank geht darüber hinaus an Christopher Sauer, sowie das restliche FORCuDE Team für den intensiven fachlichen Austausch.

Eine überaus wertvolle Unterstützung waren die Studierenden Bettina Spießl, Christine Schott, Lara Stöhr, Jonas Nikolaus und Sebastian Penzl. Die hervorragenden Ergebnisse dieser Arbeiten haben dazu beigetragen, dass diese Dissertation einen umfassenden Blick auf das Forschungsthema werfen kann.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Freunden und meiner Familie. Meinen Eltern und meinen Geschwistern danke ich für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr Verständnis während dieser intensiven Forschungsphase. Meiner Feuerwehrfamilie sowie meinen Freunden, namentlich insbesondere Sherry und Tobias, danke ich für die Ablenkung, Abwechslung und Aufmunterung in jeder Phase der Promotion.

Am Ende möchte ich mich noch ganz herzlich bei meiner Partnerin Elisabeth bedanken, die mich immer aufgemuntert hat, wenn die Herausforderungen des wissenschaftlichen Schaffens besonders anspruchsvoll wurden. Danke für deine Geduld, dein Verständnis und deine Unterstützung während der Entstehungszeit dieser Arbeit.

Die Reise von der Idee bis zur Fertigstellung dieser Dissertation war geprägt von Unterstützung, Engagement und Zusammenarbeit. Herzlichen Dank an alle, die einen Teil dieser Reise begleitet haben.

Erlangen, im März 2025

Benjamin B. Gerschütz

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Forschung	7
2.1 Definitionen und Begriffseinordnung	7
2.2 Aktueller Stand der Produktentwicklung	9
2.2.1 Abgrenzung des Digital-Engineering von der virtuellen Produktentwicklung	9
2.2.2 Die Rolle der Produktentwickelnden	10
2.2.3 Ingenieurtools im Wandel	11
2.2.4 Vorgehensmodelle zur Unterstützung der Produktentwicklung	12
2.2.5 Das Wesen der Produktentwicklungsprozesse	14
2.3 Wissensmanagement und KBE	14
2.3.1 Wissensbasierte Produktentwicklung	15
2.3.2 Ontologien als Methode zur Wissensrepräsentation	16
2.4 Datengetriebene Methoden	17
2.4.1 Abgrenzung von Data Mining und Machine Learning	18
2.4.2 Methoden des Data Mining und Machine Learning	19
2.4.3 Validierung von Modellen des Data Mining und Maschinellen Lernens	25
2.4.4 Toolboxen zur Anwendung von datengetriebenen Methoden	29
2.4.5 Vorgehensweisen zur Realisierung von Projekten datengetriebener Methoden	31
2.4.6 Vorhandene Use-Cases Datengetriebener Methoden	34
2.4.7 Zwischenfazit zu datengetriebenen Methoden	37
2.5 Bestehende Herausforderungen der Integration von KBE oder DE Ansätzen	37
2.5.1 Herausforderungen bei der Einführung von KBE-Systemen	38
2.5.2 Herausforderungen bei der Einführung von Digital-Engineering Systemen	39
2.5.3 Zwischenfazit und Vergleich der Herausforderungen	40

2.6	Prozessmanagement	40
2.6.1	Prozess Definition	41
2.6.2	Übergordnete Methoden der Prozessoptimierung	41
2.6.3	Prozessaufnahme	44
2.6.4	Prozessdokumentation	46
2.6.5	Prozessbewertung und Analyse	58
2.6.6	Zwischenfazit zu Prozessmanagement im Kontext des Digital-Engineering	64
3	Forschungsbedarf	67
3.1	Fazit zum Stand der Forschung	67
3.2	Zielsetzung der Arbeit und wissenschaftliche Fragestellungen	69
3.3	Weiteres Vorgehen im Rahmen der Arbeit	71
4	Analyse der Ausgangssituation	73
4.1	Anwendungskontext: Integration von datengetriebenen Methoden in die technisch-mechanische Produktentwicklung	73
4.2	Analyse von Hemmnissen der Methodenintegration	75
5	Konzept zur Integration datengetriebener Methoden in die Produktentwicklung	83
5.1	Gesamtmethodik zur Identifikation von Anwendungsfällen und Integration von Methoden	83
5.1.1	Phase 0: Vorbereitende Tätigkeiten	85
5.1.2	Phase 1: Prozesserfassung	87
5.1.3	Phase 2: Prozessbewertung	94
5.1.4	Phase 3: Potenzialanalyse	97
5.1.5	Phase 4: Integration datengetriebener Methoden	101
5.2	Ontologie zur Verknüpfung von DE und Produktentwicklung	103
5.2.1	Terminologie	104
5.2.2	Bewertung und Ergebnisse	109
5.3	Reifegradmodell Digital Engineering	115
5.3.1	Technologie	116
5.3.2	Daten	118
5.3.3	Qualität	119
5.3.4	Organisation	120
6	Umsetzung der Methode am Modellbeispiel	123
6.1	Case Study 1: Vorhersage von FE-Ergebnissen	123
6.2	Case-Study 2: Automatisiertes Preprocessing von FE-Simulationen	130

6.3	Fazit	134
7	Diskussion	137
8	Zusammenfassung und Ausblick	143
9	Summary and Outlook	147
	Anhang	149
	Literaturverzeichnis	173

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
Acc	–	Genauigkeit (engl. Accuracy)
ϵ	–	genereller Datenfehler
$\hat{\epsilon}$	–	Maß für die Güte eines Modells
$g(\hat{x})$	–	Antwortfunktion
G	€	Gewinn
K	€	Kosten
K_f	€	Fixkosten
k_v	€	Variable Kosten
n	Personen	Stichprobengröße
P	–	Präzision (engl. Precision)
p_v	€	Verkaufspreis pro Einheit
R	–	Trefferquote (engl. Recall)
x, \vec{x}	–	Unabhängige Variable (Feature)
y	–	Abhängige Variable (Target/ Label)
\hat{y}	–	Durch ein ML-Modell berechneter Targetwert

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AI	Artificial Intelligence (Künstliche Intelligenz)
AI4PD	Artificial Intelligence for Product Development (Name der Ontologie)
AR	Augmentierte Realität
ARIS	ARchitektur Integrierter Informationssysteme
BEP	Break-Even-Point
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BPMN	Business Process Modeling Notation
BPMI	Business Process Management Initiative

Abkürzung	Beschreibung
BPR	Business Process Reengineering
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CoD	Coefficient of Determination
CoP	Coefficient of Prognosis
CSV	Comma-Separated-Values (kommagetrennte Datei)
c_o	carries-out (führt aus)
CRISP-DM	Cross-Industry Standard Process for Data Mining
DE	Digital Engineering
DFD	Datenflussdiagramm
DHS	Design History System
DL	Deep Learning
DM	Data Mining
DOI	Digital Object Identifier
eEPK	erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette
engl.	englisch (Übersetzung)
EFQM	European Foundation for Quality Management
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FN	False-Negative (Klassifikation)
FOAF	Friends-of-a-Friend Ontologie
FORCuDE	Forschungsverbund zum Customized Digital-Engineering
FP	False-Positive (Klassifikation)
GERT	Graphical Evaluation and Review Technique
GUI	Graphical User Interface
h_in_out	has Input/Output (hat Eingangs- Ausgangsdaten)
IDEF	Integrated Definition of Function Modelling
IRI	Internationalized Resource Identifier
impl.	implementiert
is	is-a (ist ein)
JSON	JavaScript Object Notation
KBE	Knowledge-Based-Engineering

Abkürzung	Beschreibung
KDD	Knowledge-Discovery in Databases
KF	Kompetenzfrage
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KPI	Key-Performance-Indicator
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
ML	Maschinelles Lernen
n_a	needs-a (benötigt)
NLP	Natural Language Processing
PE	Produktentwicklung
PEP	Produktentwicklungsprozess
PROV-O	PROV-Ontologie
PERT	Process Evaluation and Review Technique
Pkw	Personenkraftwagen (umgangssprachlich: Auto)
p_o	part-of (Teil von)
Q-GERT	Queue Graphical Evaluation and Review Technique
RMSE	Root-Mean-Squared-Error
ROI	Return of Investment
RSM	Response Surface Modelle
TN	True-Negative (Klassifikation)
TP	True-Positive (Klassifikation)
VR	Virtuelle Realität
w_o	works on (arbeitet an)

1 Einleitung

Ich glaube, dass KI entscheiden wird, ob wir bei Wachstum,
bei Arbeitsplätzen, bei Wohlstand die nächsten
Jahre Schritt halten.

Lars Klingbeil

Die fortschreitende Digitalisierung und der verstärkte Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI), wie Maschinellem Lernen (ML) und Deep Learning (DL) finden im akademischen und industriellen Umfeld zunehmende Beachtung [1]. Insbesondere in Deutschland ist ein deutlicher Trend zu erkennen, sich verstärkt dem Thema KI zu öffnen, wie aktuelle Studien [2] belegen. Auch die Politik hat diesen Trend erkannt und investiert im Rahmen der nationalen KI-Strategie [3] in deutsche KI Initiativen, um den Slogan „Artificial Intelligence (AI)¹ made in Germany“ zu etablieren [4, 5]. Diese Entwicklung wird als entscheidend für Organisationen und Unternehmen betrachtet, eröffnet neue Perspektiven [6] und wird die Art, wie Produkte entwickelt werden, radikal verändern [7, 8]. So prägt Arbeit 4.0 als Synonym für die digitale Transformation, die Zukunft Deutschlands als Produktionsstandort [9] und wird von Führungskräften als zentraler, zukünftiger Wettbewerbsvorteil gesehen [10].

Die Produktentwicklung steht im Zuge dieser Veränderungen vor einer Herausforderung: Trotz der enormen Menge an generierten Daten werden diese oft nicht in vollem Umfang genutzt [11]. Hier setzt das Konzept des Digital-Engineering (DE) an, welches das Potenzial birgt, diese Daten gezielt zu nutzen und somit einen Paradigmenwechsel in der Produktentwicklung einzuleiten [12]. Der letzte große Paradigmenwechsel dieser Art war die wissensbasierte Produktentwicklung² im Sinne eines „Predictive Engineering“ [13] und ist gleichzusetzen mit disruptiven Entwicklungen wie der Einführung der Elektrizität oder der Erfindung des Pkw. Unternehmen haben erkannt, dass eine Transformation der Produktentwicklung unumgänglich ist, um mit den technologischen Entwicklungen Schritt zu halten [14]. Allerdings stockt die Digitalisierung, da Unternehmen Schwierigkeiten bei der Integration der vielfältigen DE-Methoden in ihre bestehenden Prozesse erleben [15].

¹ Die Begriffe Artificial Intelligence (AI) und Künstliche Intelligenz (KI) können synonym verwendet werden.

² engl. Knowledge Based Engineering (KBE)

Die digitale Transformation im deutschen Maschinenbau stellt kleine und mittlere Unternehmen (KMU) vor eine Reihe zusätzlicher Herausforderungen. KMU sind ein entscheidender Wirtschaftsfaktor für Deutschland, da sie das Rückgrat des Wohlstandes bilden [16] und maßgeblich zum Bruttoinlandsprodukt (BIP) beitragen. Grundsätzlich profitieren diese Unternehmen von ihrer Flexibilität und Reaktionsfähigkeit [17]. VOIGT et al. [18] identifizieren für KMU zum einen Kostensenkung und Wissen als kritische Erfolgsfaktoren, zum anderen Markterweiterung und Innovation als zentrale Herausforderungen. Zusätzlich müssen sie sich in digitalen Ökosystemen positionieren und mit Partnern zusammenarbeiten, um Digitalisierungsbarrieren zu überwinden [19]. RIEKE & KLASSEN [20] unterstreichen die Bedeutung der Auswahl und Bewertung digitaler Technologien, um die Effizienz zu steigern und einen Wettbewerbsvorteil zu erlangen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen und die Chancen der digitalen Transformation zu nutzen, müssen die KMU des deutschen Maschinenbaus langfristige Digitalisierungsstrategien entwickeln, in die Ausbildung der Mitarbeiter investieren und dazu mit anderen Unternehmen zusammenarbeiten, wie diese Studien deutlich machen.

1.1 Problemstellung

Die bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten im Kontext des Digital-Engineering konzentrieren sich jedoch primär auf einzelne Aspekte der digitalen Transformation oder auf fallbezogene Probleme [21]. Die Integration digitaler Technologien in bestehende Prozesse erfordert einen strategischen Ansatz, der jedoch mit der Unternehmenskultur und der Geschäftsstrategie in Einklang stehen muss [22]. Hierzu soll aufgezeigt werden, wie KMU in Deutschland datengetriebene Methoden erfolgreich in ihre Produktentwicklung integrieren können und bei der Überwindung bestehender Hürden unterstützt werden können.

Die Produktentwicklung arbeitet zumeist auf Basis von Vorgehensmodellen. Hierzu existieren vielfältige Vorgehensmodelle für den Entwicklungsprozess, die in der Regel ihren Ursprung in Deutschland haben. Zu diesen Modellen zählen unter anderem das Pahl/Beitz-Modell [23], die VDI-Richtlinie 2206 [24], die VDI-Richtlinie 2221 [25]. Im Rahmen dieser Arbeit soll die VDI 2206 verwendet werden. Die VDI/VDE 2206 baut auf dem V-Modell, einem klassischen Modell für die Softwareentwicklung, auf, das aus einem absteigenden und einem aufsteigendem Ast besteht. Im absteigenden Ast wird die Entwicklung des Systems von der Anforderungserhebung bis zur Implementierung beschrieben, während der aufsteigende Ast Test und Integrationsaufgaben

enthält. Übergreifende begleitenden Aktivitäten, wie Qualitätssicherung, Dokumentation und Abnahme werden zusätzlich außerhalb des V's erfasst.

Die erfolgreiche Integration datengetriebener Methoden in die Produktentwicklung erfordert die Überwindung verschiedener Herausforderungen, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Aus Sicht des Autors sind insbesondere die folgenden Problemstellungen kritisch:

- Obwohl eine Vielzahl an datengetriebenen Methoden verfügbar sind, fehlt den Anwendern³ das Wissen über diese Methoden. Im schlimmsten Fall ist schon die Existenz dieser Methoden unbekannt. Wenn bereits Kenntnis über diese Methoden besteht, fehlt Wissen über die Voraussetzungen, Potenziale und Grenzen bestimmter Methoden.
- Ein weiteres Problem stellen schlecht oder wenig definierte Prozesse in der Produktentwicklung dar. Durch diese Unklarheit in Kombination mit dem fehlenden Methodenwissen kann nicht eingeschätzt werden, welche bestehenden Probleme sich effizient mit datengetriebenen Methoden lösen lassen. Dadurch ist die Identifikation passender und vielversprechender Anwendungsfälle eine große Herausforderung. [P11]
- Eine unklare Datenlage kann negative Auswirkungen auf datengetriebene Methoden haben, einschließlich der Beeinträchtigung der Datenqualität, Erschwernisse bei der Modellentwicklung, das Risiko ungenauer Ergebnisse und Einschränkungen in der Anwendbarkeit auf bestimmte Problemstellungen oder Szenarien. Daher ist es entscheidend, eine klare und zuverlässige Datenbasis sicherzustellen, um die Wirksamkeit und Genauigkeit datengetriebener Methoden zu gewährleisten. [26, 27]
- Viele Menschen haben Schwierigkeiten, die Funktionsweise und den Nutzen von KI zu verstehen [28]. Weiterhin besteht die Befürchtung, dass KI Arbeitsplätze ersetzen oder die eigene Kompetenz beschneiden könnte [P3]. Dies kann zu Misstrauen und Widerstand gegenüber der Implementierung von KI in der Produktentwicklung führen.
- Nach der Identifikation geeigneter Methoden und Anwendungsfällen müssen die Methoden abschließend noch an den jeweiligen Anwendungsfall und die vorliegenden Rahmenbedingungen angepasst werden.

Die Arbeit fokussiert sich speziell auf die Bereiche des Methodenwissens, der Anwendungsfallidentifikation und der Methodenanpassung, da diese als zusammenhängende Schlüsselaspekte identifiziert wurden, um die genannten Herausforderungen zu bewältigen. Durch die Zusammenführung dieser

³ Die in dieser Arbeit verwendeten geschlechtsspezifischen Ausdrücke dienen lediglich der Lesbarkeit und beziehen sich gleichermaßen auf alle Geschlechter. Jegliche Verwendung von männlichen, weiblichen oder neutralen Formen hat ausdrücklich keinen Einfluss auf geschlechtsspezifische Präferenzen.

Schwerpunkte wird angestrebt, ein niederschwelliges Werkzeug zu schaffen und dieses Unternehmen und Entwicklern bereitzustellen, um die Vorteile datengetriebener Methoden nutzbar zu machen und erfolgreich in Produktentwicklungsprozesse zu integrieren. Der Problembereich der menschlichen Vorbehalte soll in dieser Arbeit nicht detailliert analysiert werden, hierzu sei auf weitere Arbeiten verwiesen [29, 30]. Ebenso soll der Problembereich der unklaren Datenlage nicht explizit betrachtet werden, da auch hierzu umfangreiche Vorarbeiten bestehen [31–33].

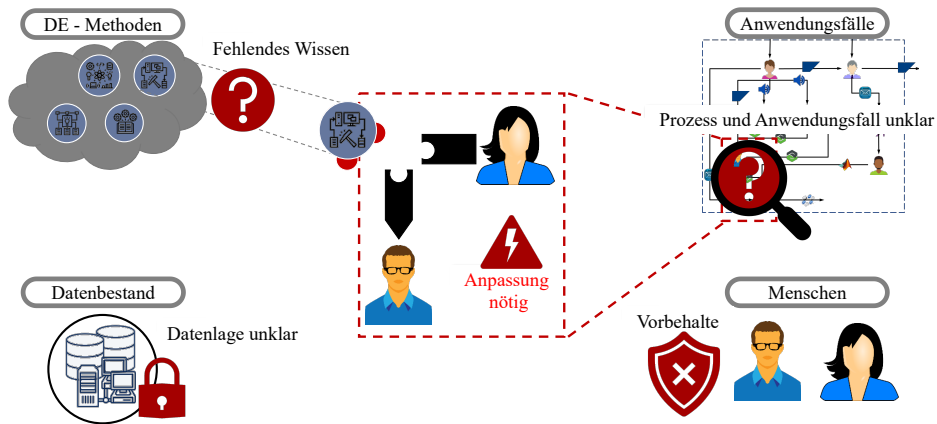


Bild 1: Aktuelle Probleme bei der Methodenintegration

1.2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, eine systematische Methode zu entwickeln, die eine umfassende Bestandsaufnahme konkreter digitaler Prozessketten in Unternehmen und darauf aufbauend die Identifikation von Anwendungsfällen für datengetriebene Methoden ermöglicht. Um den Bereich des Methodenwissens zu stärken, soll Wissen über datengetriebene Methoden strukturiert erfasst und niederschwellig zugänglich gemacht werden. Auf dieser Grundlage werden Anpassungsschritte analysiert, die geeigneten Methoden angepasst und erfolgreich in den industriellen Einsatz überführt.

Hierzu wird zunächst in Kapitel 2 auf den Stand der Wissenschaft und Technik der relevanten Themenbereiche eingegangen. Dies sind insbesondere die Hintergründe des Digital-Engineering (Kapitel 2.4) und des Prozessmanagements (Kapitel 2.6). Zur Analyse der Ausgangssituation der Methodenentwicklung wird eine Industriestudie durchgeführt und in Kapitel 4 präsentiert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird in Kapitel 5 eine Methode

zur Identifikation von Anwendungsfällen und Integration datengetriebener Methoden in die technisch-mechanische Produktentwicklung dargestellt. Im Rahmen der Methodenentwicklung wird zusätzlich in Kapitel 5.2 eine Ontologie zur Darstellung des Wissens über datengetriebene Methoden und in Kapitel 5.3 ein Reifegradmodell Digital-Engineering entwickelt und eingeführt. Das methodische Konzept wird anschließend im Rahmen von zwei Modellbeispielen umgesetzt, die in Kapitel 6 dargestellt werden. Die daraus folgenden Erfahrungen und Ergebnisse werden in Kapitel 7 kritisch diskutiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 8 eine Zusammenfassung und ein Ausblick. Bild 2 gibt einen Überblick über den Aufbau der Arbeit.

Kapitel 1	Einführung		S. 1 – 5
	Problembeschreibung	Aufgabenstellung	
Kapitel 2	Stand der Forschung		S. 7 – 65
	Produktentwicklung	Digital-Engineering	Prozessmanagement
Kapitel 3	Forschungsbedarf		S. 67 – 71
	Zielsetzung	Forschungsfragen	
Kapitel 4	Analyse der Ausgangssituation		S. 73 – 82
	Anwendungskontext	Digital-Engineering Hemmnisse	
Kapitel 5	Konzept zur Methodenintegration		S. 83 – 121
	Entwicklung der Gesamtmethode	Ontologie Digital-Engineering	Reifegradmodell Digital-Engineering
Kapitel 6	Umsetzung der Methode		S. 123 – 135
	Case-Study 1: Vorhersage von FE-Ergebnissen	Case-Study 2: Automatisches Preprocessing	
Kapitel 7	Diskussion der Ergebnisse		S. 137 – 142
Kapitel 8	Zusammenfassung und Ausblick		S. 143 – 145

Bild 2: Überblick zum Aufbau der Arbeit

2 Stand der Forschung

Die digitale Welt ist wie ein Werkzeug. Wenn du es nicht benutzt, bist du nicht wettbewerbsfähig.

Thomas Friedmann

In diesem Kapitel erfolgt in einem ersten Schritt die Definition und Einordnung wichtiger Begriffe in Kapitel 2.1. Anschließend wird in Kapitel 2.2 auf den aktuellen Stand der virtuellen Produktentwicklung und der Weiterentwicklung zum Digital-Engineering eingegangen. Nachfolgend werden in Kapitel 2.3 die Themengebiete Knowledge-Based-Engineering (KBE) und Wissensmanagement in der Produktentwicklung diskutiert. Das Kapitel 2.4 führt datengetriebene Methoden sowie bestehende Vorgehensweisen zur Integration dieser ein und diskutiert vorhandene Use Cases für die Produktentwicklung. Im darauffolgenden Kapitel 2.5 werden Herausforderungen bei der Realisierung von KBE und Digital-Engineering-Projekten analysiert und verglichen. Die Relevanz von Prozessmodellen und Prozessanalyse zur systematischen Prozessoptimierung wird im darauffolgenden letzten Abschnitt 2.6 aufgezeigt.

2.1 Definitionen und Begriffseinordnung

Im Kapitel 2.1 werden eingangs relevante Begriffe im Kontext der Produktentwicklung und des Prozessmanagements vorgestellt und eingeordnet. Aus dem disziplinübergreifenden Wesen dieser Arbeit folgt, dass einige Begriffe je nach Fachkontext unterschiedlich verwendet werden können. In diesem Abschnitt werden deshalb ausgewählte Definitionen vorweggenommen. Ziel ist hierbei die Einordnung und Klarstellung des Verwendungskontextes der Begriffe im Rahmen dieser Arbeit, keine allgemeingültige Definition.

Unter dem Begriff **virtuelle Produktentwicklung** wird generell die Entwicklung physischer Produkte in virtuellen Umgebungen verstanden, bevor diese in reale Prototypen und Bauteile überführt werden. Hierzu zählt insbesondere die Beschreibung von Geometrie mithilfe von rechnerunterstützten Einzelmodellen [34], sowie die Vorhersage und Bestimmung der relevanten Produkteigenschaften [35].

In Abgrenzung zur virtuellen Produktentwicklung wird das **Digital-Engineering** als Weiterentwicklung des erstgenannten Entwicklungsparadigmas verstanden. Die konsequente Nutzung und Nachverfolgbarkeit

bestehender Daten aus allen Phasen des Produktlebenszyklus stehen hier im Vordergrund. Dies wird effizient durch datengetriebene Methoden und Werkzeuge sichergestellt. [12, 36, 37]

Daten sind essenzieller Bestandteil eines Prozesses und werden durch diesen generiert oder verändert. Sie dienen zur Kommunikation zwischen Fachabteilungen und Mitarbeitenden sowie zur Dokumentation von Ergebnissen. [P5]

Als **Informationen** werden Daten bezeichnet, die mit einem Kontext verbunden werden. Zusätzlich werden im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses Hilfsmaterialien in Form von Tabellenwerken, Richtlinien oder Unterstützung durch Kollegen als Informationen bezeichnet. Die Unterscheidung zu Daten wird speziell dadurch getroffen, dass Informationen während des Prozesses genutzt, aber nicht verändert werden. [38]

Vernetzte Informationen werden, in Anlehnung an die Wissenstreppe nach NORTH [39] als **Wissen** definiert. Dieses Wissen ist für Mitarbeitende nötig, um die Aufgaben im Rahmen der Produktentwicklung effizient zu erledigen. Daher kommt dem Erhalt von Wissen im Unternehmen eine besondere Bedeutung zu.

Künstliche Intelligenz (KI) bezeichnet die Integration von Anlagen menschlicher Intelligenz in Maschinen, insbesondere in Computerprogramme. Dies umfasst verschiedene Fähigkeiten wie Denken, Lernen, Zielsetzung und Problemlösung. Ein wesentliches Merkmal von KI ist die Integration einer Selbstkorrekturregelung, um eine eigenständige Anpassung und Fehlerkorrektur zu ermöglichen. Es ist wichtig zu betonen, dass KI nicht zwangsläufig darauf abzielt, menschliche Intelligenz exakt zu simulieren oder zu imitieren. Stattdessen können KI-Lösungen die Anlagen menschliche Intelligenz auf innovative Weise nutzen, beispielsweise durch die beschleunigte Bearbeitung umfangreicher Berechnungen. [3, 40, 41]

Datengetriebene Methoden befähigen die Produktentwickelnde aus einer Vielzahl heterogener Daten, Informationen als Entscheidungsgrundlage zu extrahieren oder sogar Entscheidungen autonom treffen zu lassen. Grundlage für die Entscheidungsfindung innerhalb der Methode ist daher immer ein Modell, das bestehende Daten nutzt. [42]

Ein **Prozess** ist eine Abfolge von Tätigkeiten, die nötig sind, um ein vorgegebenes Ziel zu erreichen. Start und Zielpunkt sind klar definiert. [43, 44]

Der **Produktentwicklungsprozess** beschreibt die notwendigen Prozessschritte, um aus Anforderungen ein Endprodukt zu gestalten und auf den

Markt zu bringen. Dieser ist im Normalfall hochiterativ und unternehmensspezifisch. [45]

Ein **Tool** unterstützt Produktentwickelnde bei den notwendigen Aufgaben und Tätigkeiten. In Tools sind zusätzlich Methoden implementiert, wobei jedes Tool ausschließlich einer bestimmten Aufgabe zuzuordnen ist. [46]

Eine **Toolbox** beschreibt ein Rahmenwerk zur Sammlung verschiedener Tools, die in der Regel dem gleichen Kontext zuzuordnen sind. Im Softwarebereich können Toolboxes ermöglichen, verschiedene Tools über eine einheitliche Schnittstelle anzusteuern.

2.2 Aktueller Stand der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung in Deutschland ist geprägt von etablierten Methoden und Tools, die sich über Jahrzehnte bewährt haben. Doch neue Herausforderungen wie dezentrale Teams, Forderungen des Marktes nach schnellen Produktanpassungen und -innovationen und komplexere Produkte hinterfragen diese Methoden und Tools [45]. Unternehmen müssen ihre Produktentwicklung neu denken, um den neuen Anforderungen gerecht zu werden. Dabei ist die Digitalisierung der Produktentwicklung ein zentraler Trend, den führende Experten als Schlüsselfaktor für den zukünftigen Unternehmenserfolg sehen [47]. Die Transformation vom virtuellen Engineering zum Digital-Engineering ermöglicht es Unternehmen, ihre Produktentwicklung effizienter, effektiver und agiler zu gestalten. Zur Einordnung und Abgrenzung der Begriffe virtuelles Engineering und Digital-Engineering erfolgt eine Begriffseinführung.

2.2.1 Abgrenzung des Digital-Engineering von der virtuellen Produktentwicklung

Die virtuelle Produktentwicklung (VE) beschreibt die Entwicklung physischer Artefakte in virtuellen Umgebungen. Ziel ist die rechnerinterne Repräsentation eines Produkts und seiner Eigenschaften [34] ohne Modelldurchgängigkeit. VAJNA et al. [35] erweitern diese Beschreibung auf die Bestimmung der relevanten Eigenschaften eines Produkts, ohne dass physische Prototypen existieren. Ausgangspunkt für virtuelle Absicherung von Produkten ist in der Regel ein CAD-Modell, das anschließend im Rahmen des Computer-Aided-Engineering (CAE) analysiert wird. Die vorhandenen Werkzeuge und Methoden werden mit dem Begriff CAx zusammengefasst.

Es existieren verschiedene Definitionen von Digital-Engineering, wobei die von SCHUMANN et al. [36] eine der Ersten ist. Sie definieren Digital-

Engineering als die durchgängige Nutzung digitaler Methoden und Werkzeuge über den gesamten Produktentstehungs- und Produktionsprozess hinweg. Ziel ist die Verbesserung der Produktqualität und die umfassende Beherrschung der Prozesse über den gesamten Produktlebenszyklus. Diese Definition wird im Folgenden um die Nachverfolgbarkeit aller Daten, insbesondere im Änderungs- und Variantenmanagement, erweitert [37]. Dabei ist ein zentraler Aspekt im Vergleich zur rein virtuellen Produktentwicklung die systematische Bereitstellung von Wissen aus späteren Phasen des Produktlebenszyklus und die Nutzung dieser Informationen in früheren Phasen⁴. Digital-Engineering ist somit als Weiterentwicklung der virtuellen Produktentwicklung zu sehen [48]. Im Gegensatz zu SCHUMANN et al. [36] schließen DUIGOU et al. [48] Digital-Engineering mit dem Ende der Prozessplanung und dem Beginn der Produktion ab. Die konsequente Auswertung und Nutzung von Daten, sowohl aus der Konstruktion als auch dem Versuch und dem Realbetrieb, stellt einen bedeutenden Fortschritt im Vergleich zur virtuellen Produktentwicklung dar. In dieser Arbeit wird die Definition verwendet, dass virtuelle Produktentwicklung zum Digital-Engineering übergeht, wenn systematisch Wissen und Informationen aus Daten extrahiert und in den Produktentwicklungsprozess integriert werden. So werden Produkte oder Prozesse automatisiert, optimiert und weiterentwickelt. Zusätzlich ist zur ganzheitlichen Transformation Modell-Durchgängigkeit und Nachverfolgbarkeit notwendig.

2.2.2 Die Rolle der Produktentwickelnden

Die fortschreitende Digitalisierung hat einen tiefgreifenden Einfluss auf die Produktentwicklung ausgeübt, wobei sich die Rolle der Produktentwicklungsteams in der digitalen Ära grundlegend gewandelt hat [49, 50]. Neben den klassischen Anforderungen im Bereich der Ingenieurwissenschaften sind nun auch digitale Kompetenzen, Datenanalysefähigkeiten und die Nutzung kollaborativer Werkzeuge von entscheidender Bedeutung [51]. Diese Veränderungen resultieren in einer erweiterten Palette von Fähigkeiten und Qualifikationen, die von Produktentwicklungsteams erwartet werden. MARGAROV & KONOVALOVA [51] betonen den Bedarf an interdisziplinären Kompetenzen, einschließlich kognitiver, sozialer und digitaler Fähigkeiten, um effektiv mit künstlicher Intelligenz arbeiten zu können. MAKAROVA et al. [52] unterstreichen zusätzlich die Bedeutung von sozialer Verantwortung, Nachhaltigkeit und kreativem Denken in der Ingenieurausbildung, insbesondere in der digitalen Gesellschaft. EBERT & DUARTE [53] sowie RICHERT et al. [54] betonen

⁴ Der Begriff frühe oder frühere Phase ist nicht eindeutig definiert. Im Rahmen dieser Definition wird darunter ein Frontloading von Informationen verstanden, die unter normalen Umständen erst später im Prozess verfügbar wären.

die sich verändernde Rolle des Engineerings und die Notwendigkeit, dass Produktentwickelnde im Zeitalter von Industrie 4.0 mit Big Data, komplexen Problemen und der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine umgehen können. Diese Studien unterstreichen die Notwendigkeit für Produktentwicklungsteams, sich durch den Erwerb neuer Fähigkeiten und Kompetenzen an den digitalen Wandel anzupassen.

Die Digitalisierung hat somit die Rolle von Produktentwicklungsteams von rein technischen Aufgaben zu einer stärker vernetzten, analytischen und innovationsgetriebenen Tätigkeit transformiert. Teammitglieder müssen nicht nur über technisches Know-how verfügen, sondern auch in der Lage sein, mit digitalen Werkzeugen umzugehen und sich auf eine schnell verändernde, technologische Landschaft einzustellen. Die Rolle der Menschen in KI-gestützten Unternehmen besteht darin, Entwicklungsprobleme zu verstehen und den Rahmen für die Bemühungen abzustecken, anstatt vollständige Lösungen zu entwickeln [8].

2.2.3 Ingenieurtools im Wandel

Die Toollandschaft für Ingenieure hat sich im Zuge der Digitalisierung erheblich verändert [47, 55]. Diese Veränderungen betreffen verschiedene Aspekte der ingenieurwissenschaftlichen Arbeit, angefangen von Entwurfs- und Simulationswerkzeugen bis zu Kommunikations- und Kollaborationstechnologien. VAJNA et al. [35] erläutern die Möglichkeiten der virtuellen Produktentwicklung im Sinne des CAx. Einen Überblick über die dort verfügbaren Möglichkeiten bietet Bild 3.

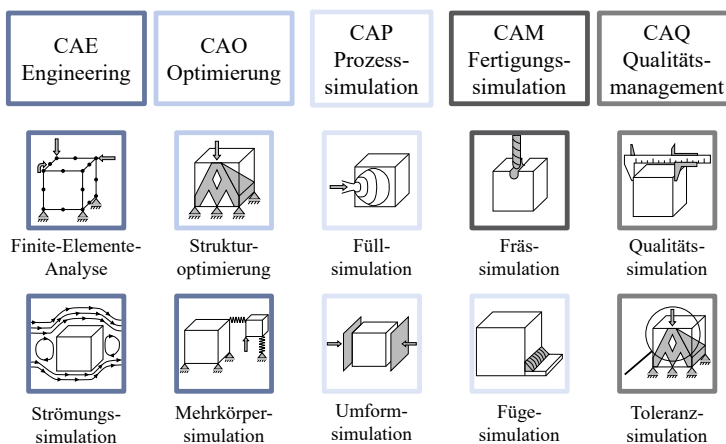


Bild 3: Übersicht über CAx Simulationstools nach [35, 56]. Die Farben signalisieren die Zuordnung zu einer Ausprägung des CAx.

Hierbei ermöglicht CAD präzise und komplexe 3D-Modelle, die nicht nur das Design erleichtern, sondern auch die virtuelle Simulation von Produkten oder Anlagen ermöglichen. In der Simulation und Analyse setzen Ingenieure die Finite-Elemente-Methode (FEM) ein, um das Verhalten von Strukturen unter verschiedenen Bedingungen zu analysieren. Computational Fluid Dynamics (CFD)-Tools kommen bei Fluidmechanik und Wärmeübertragungsanalysen zum Einsatz. Im Kontext des Internet of Things (IoT) nutzen Ingenieure Sensorintegration, um Echtzeitinformationen von Produkten oder Anlagen zu erhalten, was zu einer verbesserten Überwachung und Analyse führt [57]. Data Analytics und Künstliche Intelligenz (KI) spielen eine immer bedeutendere Rolle [6, 49]. Ingenieure analysieren große Datenmengen, identifizieren Muster und entwickeln präventive Wartungsstrategien. KI-Algorithmen, darunter Machine Learning, werden für komplexe Aufgaben wie Mustererkennung, Optimierung und autonomes Systemmanagement eingesetzt. Kollaborative Tools, wie cloud basierte Zusammenarbeit und Versionskontrollsysteme wie Git, ermöglichen Ingenieuren die Echtzeit-Zusammenarbeit an Projekten, unabhängig von ihrem physischen Standort [58]. Augmented und Virtual Reality (AR/VR) werden für Konstruktions-, Simulations- und Schulungsumgebungen sowie das Testen von Prototypen verwendet [P1, 59, 60]. Insgesamt hat die Digitalisierung die Effizienz, Genauigkeit und Innovationsfähigkeit in der Ingenieurarbeit erheblich verbessert. Ingenieure müssen sich kontinuierlich mit neuen Technologien vertraut machen, um wettbewerbsfähig zu bleiben und die Vorteile der digitalen Transformation voll auszuschöpfen.

2.2.4 Vorgehensmodelle zur Unterstützung der Produktentwicklung

In der Welt der Produktentwicklung spielt das Vorgehensmodell eine entscheidende Rolle bei der effizienten Umsetzung von Ideen in marktfähige Produkte. Ein Paradigma, das in diesem Kontext oft diskutiert wird, ist das „generate-test-analyze-advise-modify“ Modell [61–64]. Dieses Paradigma betont die iterative Natur des Produktentwicklungsprozesses, in dem das Generieren von Ideen, das Testen von Konzepten, die Analyse der Ergebnisse, die Beratung durch interdisziplinäre Expertenteams und die anschließende Modifikation von Designs nahtlos miteinander verbunden sind.

Die Entwicklung und der Lebenszyklus von Produkten sind in verschiedenen methodischen Ansätzen beschrieben, wobei die weltweit bekannteste Norm die DIN EN ISO 9001:2015-11 ist [65]. Die Ingenieurwissenschaften haben ebenfalls detaillierte Beschreibungen des Produktentwicklungsprozesses hervorgebracht, wobei die im deutschsprachigen Raum entwickelte Richtlinie

VDI 2221:1993-05 [25] international bekannt und allgemein anerkannt ist [66]. Um die Unterschiede der einzelnen Domänen⁵ zu minimieren und eine erfolgreiche Zusammenarbeit zu erleichtern, wurden domänenübergreifende Vorgehensmodelle erarbeitet. Diese basieren oftmals auf einem Prozessverständnis auf Grundlage des Vorgehens von PAHL & BEITZ [34] oder dem V-Modell nach der VDI Richtlinie 2206 [24]. Es existieren zwar zahlreiche andere Beschreibungen von Produktentwicklungsprozessen [67–70], doch der Fokus dieses Abschnitts liegt weniger auf einem umfassenden Überblick über verschiedene Entwicklungsprozesse. Interessierte Leserinnen und Leser können für eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Themenfeld „Methodische Entwicklung von Produkten“ auf die Grundlagenliteratur zurückgreifen, beispielsweise Werke von KESSELRING [71], LINDEMANN [72] oder FELDHUSEN & GROTE [23]. Diese Werke bieten umfassende Einsichten und vertiefte Informationen, um ein tieferes Verständnis für die methodischen Aspekte der Produktentwicklung zu erlangen.

Die Umsetzung dieser Modelle in der Praxis verläuft jedoch schleppend, und es besteht Bedarf an einer besseren Integration [73]. Daher bleibt, trotz dieser Vielfalt, die Verwendung von Meilensteinplänen ein gängiger Standard zur Koordination und Kontrolle von Produktentwicklungsprozessen [45]. Diese Pläne bieten klare Zeitpunkte für wichtige Etappen im Entwicklungsprozess und dienen als Orientierung für das gesamte Team. Trotz der weit verbreiteten Anwendung von Meilensteinplänen beginnen diese an Bedeutung zu verlieren. Dies liegt vor allem daran, dass die starre und lineare Prozessführung bei neuen und komplexen Produkten an ihre Grenzen stößt. LUNNEMANN et al. [45] weisen zusätzlich darauf hin, dass der Fokus auf strikte Zeitpläne und festgelegte Ergebnisse die Kommunikation und den Wissensaustausch vernachlässigt. In der heutigen dynamischen und schnelllebigen Umgebung ist es entscheidend, flexiblere Ansätze zu verfolgen, die die Bedeutung von kontinuierlicher Kommunikation und Wissensintegration in den Vordergrund rücken. Daher sind in den letzten Jahren neue Trends und Praktiken in der Industrie aufgekommen, die die herkömmlichen Ansätze herausfordern [74]. Agile Methoden, wie Scrum, haben sich als effektive Alternativen etabliert und ermöglichen eine flexiblere und kollaborativere Arbeitsweise [75]. Das Konzept des verteilten Arbeitens gewinnt ebenfalls an Bedeutung, da Teams zunehmend global verteilt sind und die Zusammenarbeit über geografische Grenzen hinweg notwendig wird [76].

⁵ Insbesondere Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik

2.2.5 Das Wesen der Produktentwicklungsprozesse

Produktentwicklungsprozesse unterscheiden sich in mehreren wesentlichen Punkten von anderen Prozessen aus Produktion und Management [77]. Grund hierfür ist insbesondere der problemlösende Charakter [78].

Der Produktentwicklungsprozess beginnt mit schlecht definierten Problemen, deren Spezifikationen oft unvollständig, inkonsistent und vage sind, da vor dem Designstart der Kontext, die Einschränkungen und Möglichkeiten nicht vollständig verstanden werden [79]. Dies liegt zusätzlich daran, dass die Interpretation, Reformulierung und Konkretisierung der Bedürfnisse der Beteiligten gängige Praxis ist. Weiterhin erfolgt die Entwicklung von Produktanforderungen – und damit den zu lösenden Problemen – und Lösungen gemeinsam, da die Evaluation möglicher Lösungen dazu führen kann, dass Probleme oder Anforderungen neu formuliert werden [80].

Empirische Forschung zeigt auch, dass Produktentwickelnde Probleme vorstrukturieren, wobei bestehendes Wissen und frühere Erfahrungen den Lösungsprozess beeinflussen [81]. Anforderungen werden modifiziert oder neue Randbedingungen eingeführt, sodass neue, innovative Möglichkeiten ermöglicht werden, was zusätzlich neues Wissen generiert [82]. Das Lösen eines Problems erzeugt oft auf einer detaillierteren Ebene neue Probleme, was in einer hierarchischen Struktur des Designprozesses⁶ resultiert [83]. Design ist situativ, progressiv und iterativ, was bedeutet, dass eine Lösung nicht in einem einzigen Schritt, sondern schrittweise und wiederholt entwickelt wird [84, 85].

2.3 Wissensmanagement und KBE

Bereits vor vielen Jahren wurde erkannt, dass die Produktentwicklung maßgeblich auf dem Wissen der beteiligten Personen aufbaut [86]. Aus diesen Gründen wurden bereits zu Beginn der 2000er-Jahre Assistenzsysteme der wissensbasierten Produktentwicklung (z. B. [13]) entwickelt, um den Produktentwickler bei Know-How intensiven Tätigkeiten zu unterstützen. Da nach der Meinung des Autors das Digital-Engineering eine Weiterentwicklung der wissensbasierten Produktentwicklung auf die Domäne der Daten darstellt, soll im Folgenden auf die Grundlagen des Wissensmanagements und der wissensbasierten Produktentwicklung eingegangen werden.

⁶ Der Designprozess berücksichtigt sowohl ästhetische als auch funktionale Aspekte. Er berücksichtigt technologische Machbarkeit, Ergonomie und nachhaltige Materialien, die den Bedürfnissen der Nutzer gerecht werden.

2.3.1 Wissensbasierte Produktentwicklung

Wissensbasierte Produktentwicklung (engl. Knowledge-Based Engineering (KBE)) ist ein Ansatz in der Ingenieurs- und Produktentwicklung, der darauf abzielt, das Wissen und die Erfahrung von Ingenieuren systematisch zu erfassen, zu formalisieren und in computerbasierten Systemen zu integrieren [87, 88]. KBE wurde lange als Schlüssel zur Wettbewerbsfähigkeit angesehen, da sie Zeiteinsparungen und eine Optimierung des Designprozesses ermöglicht [89]. Im Wesentlichen geht es bei KBE darum, ingenieurwissenschaftliches Wissen in computerbasierten Modelle, Regeln und Algorithmen zu übersetzen. Diese Modelle können dann in speziellen Softwareanwendungen oder in die bestehenden CAD-Systeme integriert werden [90]. Durch die Anwendung von KBE können Ingenieure automatisiert Entscheidungen hinsichtlich verschiedener Entwürfe treffen, komplexe Analysen durchführen und schneller auf Änderungen reagieren.

KBE hat das Ziel, die Zugänglichkeit von Konstruktionswissen sicherzustellen und Routinetätigkeiten zu entlasten. Dies wird durch die Wiederverwendbarkeit des Wissens gefördert, was wiederum Standardisierung und Automatisierung in der Produktentwicklung ermöglicht. KBE ermöglicht eine effizientere Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, da vorhandenes Wissen automatisiert eingebracht wird, was den Prozess verkürzt. Die eingesparte Zeit kann für kreative Tätigkeiten genutzt werden. Neben den genannten Zielen bietet die Einführung von KBE auch folgende Potenziale: Qualitätssteigerung und -sicherung durch die Wiederverwendung von Baugruppen und Expertenwissen, Schaffung von Transparenz durch die Dokumentation von Produktwissen, Erhöhung der Kundenzufriedenheit durch webbasierte Produktkonfiguratoren und beschleunigte Angebotserstellung, sowie Erhöhung der Mitarbeiterzufriedenheit durch die Integration von Verwaltungsprozessen in den Produktentwicklungsprozess. Alle diese Potenziale ermöglichen eine Entlastung der Produktentwickler. [90]

Eine detaillierte Auseinandersetzung mit den Fähigkeiten, Voraussetzungen und Anwendungsfällen von KBE-Projekten soll nicht der Fokus dieser Arbeit sein. Hierzu sei auf bestehende Literaturreviews von VERHAGEN et al. [88] und KÜGLER et al. [91] verwiesen. Auf Herausforderungen bei der Realisierung von KBE-Projekten und die Frage, ob Lösungsansätze dieser Herausforderungen auf die Realisierung von Digital-Engineering-Projekten herangezogen werden können, wird in Kapitel 2.5 eingegangen.

2.3.2 Ontologien als Methode zur Wissensrepräsentation

Das zur Realisierung von Methoden der wissensbasierten Produktentwicklung notwendige Wissen⁷ kann in unterschiedlicher Weise gespeichert werden. Diese Wissensrepräsentation kann nach unterschiedlichen Ansätzen wie logikbasierte, netzwerkbasierte und funktionsbasierte Modelle, sowie sprachbasierte, geometrische und statistische Repräsentationen, die je nach Anwendungsfall kombiniert werden können, realisiert werden [92]. Eine spezifische, mögliche Repräsentationsart stellen Ontologien dar. Da diese im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden, werden die theoretischen Grundlagen und mögliche Anwendungsfälle in der Produktentwicklung nachfolgend erläutert. Eine Ontologie wird als *explizite Spezifikation einer Konzeptualisierung* definiert [93], die domänen-relevante Konzepte sowie andere relevante Objekte und deren Beziehungen bereitstellt. Die Wirksamkeit dieser Ontologien wurde bereits in verschiedenen, hauptsächlich experimentellen Anwendungsfällen wie Tribologie [94] oder genbasierten Ansätzen in der Biologie [95] gezeigt. Obwohl erste Ansätze für eine Ontologie des Digital-Engineerings existieren, konzentrieren sie sich hauptsächlich auf einzelne Aspekte oder geschlossene Teilbereiche. Zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses haben CHEN et al. [96] die Erfassung von Kundenbedürfnissen in der Produktentwicklung mithilfe einer ontologiebasierten Struktur realisiert. Um die Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Montage zu verbessern, kann ein ontologiegestütztes Framework Montageeinschränkungen analysieren und eine Standardisierung des Design unterstützen. [97]. Der nächste Schritt im Entwicklungsprozess ist die simulationsbasierte Validierung von Designs, bei der eine Automatisierung hilfreich ist, um Kapazitätsengpässe bei Simulationsexperten zu vermeiden. Daher bietet die von KESTEL et al. [98] präsentierte Ontologie ein strukturiertes Vokabular für die Verknüpfung von Simulationswissen, die durch Textmining gewonnen wurden, und für den Aufbau von Simulationen verwendet werden kann. Da Produktwissen veralten kann, ist das Vergessen ein entscheidender Bestandteil des Wissensmanagements und kann ebenfalls von Ontologien unterstützt werden [99]. Für einen allgemeineren Blick auf die Produktentwicklung präsentierten YANG et al. [100] eine Ontologie, die den Produktentwicklungsprozess repräsentiert und verwaltet. Neben diesen ingenieurbasierten Ontologien werden Beschreibungen abstrakter Prozesse in der PROV-ontology (PROV-O) realisiert [101] und Personen und Teams können durch die Friend-of-a-Friend (FOAF)-Ontologie dargestellt werden [102].

⁷ Wissen ist vernetzte Information, die in die Lage versetzt, Vergleiche anzustellen, Verknüpfungen herzustellen und Entscheidungen zu treffen. [90]

2.4 Datengetriebene Methoden

Unter dem Begriff **datengetriebene Methode** werden Vorgehensweisen subsumiert, die Daten auswerten und so Entscheidungen der Produktentwickelnden unterstützen oder teilweise selbstständig treffen [42]. Leider gibt es noch keine allgemein gültige Definition des Begriffes „datengetrieben“, was sich unter anderem durch die fortlaufenden Diskussionen in der wissenschaftlichen Community sowie die unterschiedliche Verwendung in Publikationen widerspiegelt. Dies hat zur Entstehung verschiedener weiterer Begrifflichkeiten geführt [6]. Im Kontext des Begriffes „datengetrieben“ erfolgt eine Nutzung von Daten zum Treffen von Entscheidungen [103], wobei dies teilweise weiter spezifiziert wird, indem die Entscheidung automatisch durch Maschinen getroffen werden muss [8, 104]. Verschiedene Autoren führten zusätzlich die Begriffe „Daten-inspiriert“ und „Daten-informiert“ ein [105, 106], wobei „Daten-informierte“ Entscheidungen von Menschen getroffen werden, die von Daten unterstützt werden, während „Daten-inspirierte“ Tätigkeiten darauf abzielen, basierend auf bestehenden Daten Inspiration für neue Innovationen zu generieren. Zusätzlich existieren die Begriffe „Daten-augmentiert“ [107], „Daten-aktiviert“ [103, 108] und „Daten-geführt“ [104], die sich alle darauf beziehen, dass Entscheidungen durch den Menschen getroffen werden, der hierbei von Daten geführt und informiert wird. Die hierzu zur Verfügung stehenden Methoden werden primär unter den Begriffen **Data Mining** [109] und **Machine Learning** [110] zusammengefasst, welche wiederum Untermethoden und Algorithmen beinhalten, wie in Bild 4 dargestellt.

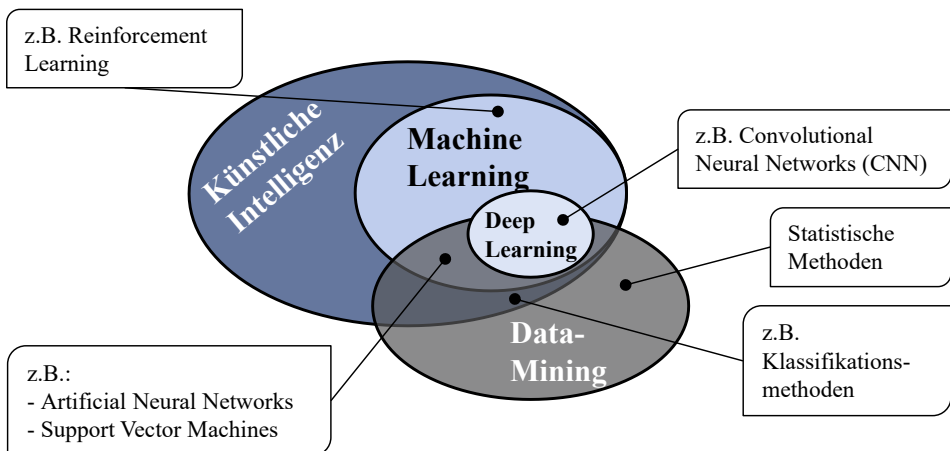


Bild 4: Einordnung und Überblick der Begriffe Data Mining und Machine Learning nach [P13, III]

Bereits hier zeigt sich das Problem einer allgemeingültigen Definition der einzelnen Begriffe, da einige Teilbereiche eine synonyme Verwendung der Begriffe erlauben. Daher erfolgt in Kapitel 2.4.1 eine Begriffsabgrenzung und -klarstellung. Im folgenden Unterkapitel 2.4.2 werden die verfügbaren Methoden erläutert. Im anschließenden Unterkapitel 2.4.5 werden aktuelle Vorgehensweisen für die Umsetzung von Data Mining- und Machine Learning-Projekten vorgestellt. Das darauf folgende Unterkapitel 2.4.6 beschreibt bereits realisierte Use Cases datengetriebener Methoden in Industrie und Wissenschaft.

2.4.1 **Abgrenzung von Data Mining und Machine Learning**

Viele Autoren nutzen die Begriffe **Data Mining** und **Machine Learning** synonym oder verwenden gegensätzliche Definitionen, was eine allgemeingültige und klare Abgrenzung sehr schwierig macht. Zusätzlich wird **Data Mining** teilweise als Teilschritt des **Machine Learning** [112] oder als Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens auf einer großen Datenbasis gesehen [113].

Grundsätzlich entstammt das Data Mining den Forschungsbereichen der Statistik, Mustererkennung und künstlicher Intelligenz [114, 115]. Wie eingangs bereits erwähnt, wird der Begriff des Data Minings nicht einheitlich verwendet. So wird er manchmal als Prozess der Wissensakquisition und manchmal als spezifische Phase des maschinellen Lernens gesehen [113]. Wird das **Data Mining** als eigenständige Methode gesehen, so beschreibt es die automatische Suche und Extraktion von Mustern in Datenbeständen [116]. Hierbei wird lediglich die Aufgabe der Erkennung unbekannter Zusammenhänge im Datenbestand durch das **Data Mining** durchgeführt, die Interpretation und das Ziehen von Schlüssen aus diesen Zusammenhängen obliegt dem Menschen [109, 116]. Zur Anwendung von Data Mining-Methoden werden strukturierte Lern- oder Trainingsdaten benötigt. Je nach verwendeter Methode (siehe Abschnitt 2.4.2) besteht dieser aus unabhängigen Eingangsgrößen (Features) und abhängigen Zielgrößen (Targets, Labels) [117].

Die Definitionen des **Machine Learning** sind ebenfalls vielschichtig. So wird es von verschiedenen Autoren als die Anwendung von statistischen Modellen und Algorithmen bezeichnet, die Computer in die Lage versetzen sollen, eine Aufgabe effektiv zu erfüllen [118, 119]. Die Abgrenzung zur klassischen Programmierung erfolgt hierbei dadurch, dass der Computer keine expliziten Anweisungen erhält, sondern sein Verhalten auf Mustern in den Daten basiert [118, 119]. Weitere Ansätze der Definition sprechen davon, dass beim Machine Learning dem Computer ein Verhalten antrainiert werden soll, um Routineprobleme von Experten zu lösen [120] oder dass sich Computer selbstständig

auf Basis von Erfahrungen verbessern [121]. Im Falle des **Machine Learning** ist eine selbstständige Entscheidungsfindung, auch bei unbekanntem Daten, durch den Algorithmus möglich. Zusätzlich sind Methoden des Machine Learning in der Lage, sich selbstständig an neue Daten anzupassen und aus ihnen zu lernen [122].

Aus den dargestellten Definitionen zeigt sich die Schwierigkeit einer einheitlichen Benennung, insbesondere, da es Teilbereiche gibt, in denen die beiden Begriffe tatsächlich synonym verwendet werden können, wie in Bild 4 dargestellt. Für diese Arbeit soll die Unterscheidung primär im Hinblick auf die eigenständige Entscheidungsfindung erfolgen. So werden im Kontext des Data Minings vorrangig Analysen von Datensätzen oder neuen Daten ausgeführt; die Interpretation des Ergebnisses, das Ziehen von Schlüssen und Entscheidungen aus den präsentierten Informationen obliegt jedoch dem Menschen. Beim Machine Learning hingegen erfolgt zusätzlich eine Interpretation und Entscheidung auf Basis der Eingangsdaten, die dem Menschen als Entscheidungsvorschlag präsentiert wird.

2.4.2 Methoden des Data Mining und Machine Learning

Zusätzlich zur im vorangegangenen Kapitel aufgezeigten Definitionsunschärfe teilen sich **Data Mining** und **Machine Learning** viele Methoden und Algorithmen, wie in Bild 5 gezeigt. Die Auswahl der passenden Methoden erfordert Wissen über diese Methoden. Zusätzlich ist dies von den zur Verfügung stehenden Daten und der durchzuführenden Aufgabe abhängig. Eine umfassende Darstellung sämtlicher verfügbarer Algorithmen würde den Umfang dieser Arbeit überschreiten. Bild 5 gibt einen Überblick über einige dieser Algorithmen. Für eine detaillierte Auseinandersetzung mit diesem Thema wird auf einschlägige Grundlagenliteratur (z. B. [115, 116, 123–127]) verwiesen.

Überwachte Lernverfahren

Das auch als „Lernen aus Beispielen“ bezeichnete [112] überwachte Lernen als bedeutendes Teilgebiet des Machine Learning zeichnet sich durch die Erfassung statistischer Zusammenhänge zwischen unabhängigen Features und bekannten, abhängigen Targets in einem Datensatz aus. Während des Lernprozesses wird das gewählte Modell mit Hilfe eines Trainingsdatensatzes auf diese bekannten, abhängigen Targets generalisiert, um auch bei unbekanntem Feature-Target-Paaren eine Klassifikation oder Regression durchführen zu können. Dabei wird darauf geachtet, eine Verallgemeinerung der Daten zu erzielen und Überanpassung (overfitting) zu verhindern, bei der das Modell nur auf die Trainingsdaten spezialisiert ist und eine hohe Modellgüte erreicht, jedoch bei unbekanntem Daten markant niedrigere Werte für die Modellgüte

Data Mining						
Klassifikation/ Regression		Segmentierung/ Clustering		Korrelations- analyse	Anomalie- erkennung	Prognose
K-nearest Neighbour	Principal component analysis	K-means	Linkage	Apriori-Algorithm	Local Outlier Factor	Time series analysis
Support Vector Machine	Case-Based-Reasoning	Fuzzy-c-means Algorithmus	Ward-procedure	Frequent Pattern Growth Algorithmus	Isolation Forest	...
Probabilistic Regression	Extrem Learning Machine	DBSCAN/OPTICS	Extreme Learning Machine	...	Elliptic envelope	Visualisierung
Decision Trees	Gradient Boosting	Expectation maximization	Gradient Boosting		One-Class SVM	Monte Carlo methods
Linear Regression	Similar Nearest Neighbours	Maximum Margin Clustering	Similar Nearest Neighbours			Temporal Difference Learning
Discriminant analysis			Policy Search
Überwachtes Lernen		Unüberwachtes Lernen				Verstärkendes Lernen
Maschinelles Lernen						

Bild 5: Überblick über Data Mining und Machine Learning Methoden nach [P10]

aufweist [128, 129]. Gleichzeitig wird auch darauf geachtet, Underfitting zu vermeiden, bei dem das Modell weder bei den Trainingsdaten noch bei unbekannten Daten eine ausreichende Modellgüte erreicht, weil die Komplexität des Modells nicht ausreichend ist [129, 130]. Das trainierte Modell ermöglicht somit im Rahmen eines bestimmten Eingabebereichs für zukünftige unbekannte Datenpunkte eine Vorhersage zu treffen [122]. Die wichtigsten Anwendungsgebiete des überwachten Lernens sind die Klassifikation (s. Seite 23) und die Regression (s. Seite 22), auf die in den nachfolgenden Kapiteln genauer eingegangen wird. [114, 115]

Unüberwachte Lernverfahren

Im Bereich des unüberwachten Lernens liegt der Fokus auf der eigenständigen Identifikation von Mustern, Zusammenhängen, Tendenzen und Strukturen in Daten, ohne dass diese an ein bestimmtes Ziel (Target) gebunden oder gelabelt sind. Diese Form des Machine Learning versucht eigenständig, aus Eingabewerten neue, zuvor unbekannte Muster oder Abhängigkeiten zu ermitteln, ohne bekannte Zielwerte oder ein Belohnungssystem für Aktionen [131]. Zu den Schlüsselverfahren gehören Clustering (s. Seite 24), Korrelationsanalyse (s. Seite 24), Anomalieerkennung (s. Seite 25) und Visualisierung (s. Seite 25)[132]. Im Gegensatz zum überwachten Lernen werden die aufgedeckten Muster nicht direkt genutzt, ihr Nutzen entsteht erst im nachgelagerten Post-Processing durch eine gründliche Validierung und Kontextualisierung. [114, 115]

Verstärkendes Lernen

Das verstärkende Lernen [133, 134] repräsentiert das dritte bedeutende Teilgebiet des Machine Learning und basiert auf einem Belohnungssystem, das die Auswahl zukünftiger Aktionen positiv beeinflusst, wie in Bild 6 dargestellt. Die Faszination dieses Forschungsfeldes liegt in der Fähigkeit seiner Methoden, eigenständig Vorgehensweisen zur Lösung des gestellten Problems durch Erfahrungen zu generieren, wozu keine Eingangsdaten, Regeln etc. vorab nötig sind. Allerdings muss der Algorithmus mit vielen iterativen Schritten seine Strategie erlernen, weshalb die Realisierung solcher Systeme als aufwändig betrachtet wird [134, 135]. Ein digitaler Repräsentant erlernt Strategien durch Interaktionen in einer Umgebung mit einem Bonus-Malus-System, wobei das Ziel die Maximierung der Belohnung ist, die durch die Approximation einer Nutzenfunktion erreicht wird. Diese Nutzenfunktion beschreibt den Wert einer Aktion oder eines Status zu einem bestimmten Zeitpunkt für den Repräsentanten. Ein bedeutender Aspekt des verstärkenden Lernens ist das ausgewogene Abwägen des Repräsentanten zwischen der Exploration neuer Stati und der Exploitation vorhandener Informatio-

nen, um eine maximale Belohnung zu erzielen [131]. Zur Bewältigung dieses Dilemmas werden oft verzögerte Belohnungen oder Zufallskomponenten im Aktionswahlprozess eingeführt [135]. Diese Erkenntnisse bieten Einblicke in die Herausforderungen und Strategien des verstärkenden Lernens.

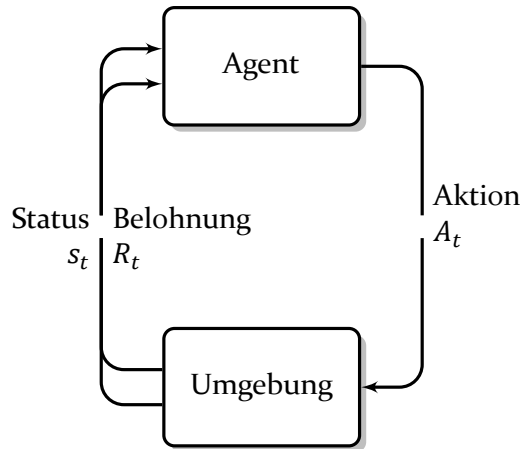


Bild 6: Schematische Darstellung der Zusammenhänge im verstärkenden Lernen nach [134]

Regression

Regression ist die am häufigsten verwendete Methode der Datenanalyse [136]. Die Verfahren der Regression beschreiben die Abbildung von numerischen Zielgrößen (Targets) y zu ebenfalls numerischen Eingangsgrößen (Features) x [115, 137]. Im einfachen zweidimensionalen Fall handelt es sich bei Regressionsmodellen um Ausgleichsgeraden oder Ausgleichskurven, wie in Bild 7 dargestellt. Die vorhandenen Datenpunkte stellen hierbei die Stützpunkte der Ausgleichskurve dar. In mehrdimensionalen, ingenieursnahen Problemen wird dies sehr schnell visuell nicht mehr greifbar, sodass hier oftmals auch von Response Surface Modellen (RSM) gesprochen wird [138].

Gleichung 1 zeigt den funktionalen Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable y und mehreren unabhängigen Variablen \vec{x} [139]. Dieser funktionale Zusammenhang wird durch die Funktion $f(\vec{x})$ ausgedrückt, der im Normalfall unbekannt ist. Messfehler oder generelle Unsicherheiten in den Ausgangsdaten werden durch die Fehlervariable ϵ berücksichtigt [140]. Während des Modelltrainings wird die Antwortfunktion $g(\vec{x})$ approximiert, wie in Gleichung 2 dargestellt. Durch diese Approximation entsteht immer auch ein Fehler in der vorhergesagten Variable \hat{y} . Dieser Fehler kann durch das Fehlermaß $\hat{\epsilon}$, das auch als Score oder Modellperformanz bezeichnet wird,

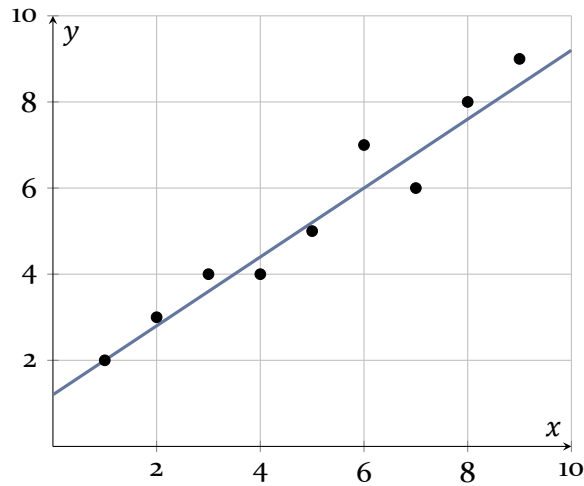


Bild 7: Darstellung einer Regression am Beispiel einer 2-D Ausgleichskurve

erfasst werden [116]. Auf die Bedeutung und die Anwendung von Scores im Bereich des Machine Learning wird im Kapitel 2.4.3 näher eingegangen.

$$y = f(\underbrace{x_1, x_2, \dots, x_m}_{\vec{x}}) + \epsilon \quad (1)$$

$$\hat{y} = g(\vec{x}) \pm \hat{\epsilon} \quad (2)$$

Durch die Untersuchung der Antwortfunktion $g(\vec{x})$ lassen sich zudem Zusammenhänge zwischen Features und Targets verstehen und steuern [131]. Zudem ist es mit einem Regressionsmodell möglich, Prognosen zu fehlenden Merkmalswerten zu treffen [127].

Klassifikation

Zentrales Ziel der Methoden der Klassifikation ist die Zuordnung der einzelnen Elemente eines Datensatzes auf vorab definierte Klassen (Labels) auf Basis dessen Features [141, 142]. Die Definition der Klassen erfolgt hierbei vorab auf Basis ähnlicher Objekte, wie in Bild 8 dargestellt. Die Zuordnung der Klasse erfolgt somit unter bekannten Regeln auf Basis eines Metamodells [115, 125] und den Gleichungen 1 und 2 der Regression. Zentrales Merkmal der Klassifikationstargets ist der diskrete, finite Wertebereich. Das grundsätzliche Vorgehen bei der Klassifikation ist identisch mit der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Regression. So lässt sich die Klassifikation auch als Regression mit diskreten Zielgrößen beschreiben.

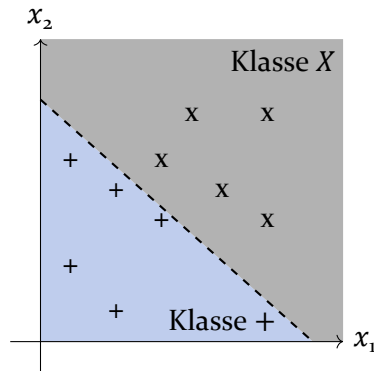


Bild 8: Darstellung einer Klassifikation mit zwei Klassen (x/+)

Clustering

In einem Clusteringprozess werden Klassen oder Muster in einem Datensatz identifiziert, selbst wenn diese im Voraus nicht bekannt sind oder erkundet werden sollen. Anders als bei der Klassifikation, bei der vorab definierte Klassen existieren, ermöglicht das Clustering die Entdeckung von bisher unbekanntem Strukturen. Die Gruppierung der Datensätze erfolgt auf Grundlage von Ähnlichkeiten oder gleichen Merkmalen \vec{x} , wobei die Zuordnung zu den Klassen n_c basierend auf diesen Ähnlichkeiten erfolgt [125, 127, 143]. Es ist zu beachten, dass die Unbekanntheit von Klassen keine zwingende Voraussetzung für das Clustering darstellt. Das Hauptziel beim Clustering besteht darin, homogene Gruppen zu identifizieren, wobei die Ähnlichkeitsmaße eine bedeutende Rolle spielen. Diese Gruppen sollen innerhalb möglichst homogen sein, jedoch im Gesamtkontext heterogen zueinander stehen, um eine Vielfalt an Strukturen zu erfassen. Dies erfordert klare Definitionen von Metriken für Ähnlichkeit und Unterschiedlichkeit, die idealerweise einen praxisbezogenen Bezug haben. Ein herausfordernder Aspekt beim Clustering besteht in der Schätzung der notwendigen Anzahl von Gruppen n_c , insbesondere wenn diese nicht durch den Anwendungskontext vorgegeben ist. Die Auswahl dieser Gruppenanzahl stellt eine bedeutende Herausforderung in der Clusteranalyse dar [123, 144].

Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse, teilweise auch Assoziationsanalyse genannt, beschreibt Methoden zur Ableitung qualitativer Regeln aus Daten [145]. Die Korrelationsanalyse identifiziert hierbei Zusammenhänge oder Regelmäßigkeiten in den Features \vec{x} eines Trainingsdatensatzes. Das Ergebnis der Analyse

ist ein Set von Assoziationsregeln zur Beschreibung dieser Zusammenhänge [146, 147].

Anomalieerkennung

Anders als die bisherigen Methoden, die immer den gesamten Datensatz betrachteten, ist das Ziel der Anomalieerkennung die Identifikation von Anomalien oder Ausreißern im Datensatz, die nicht zum erwarteten Verhalten passen [148]. Der Fokus liegt somit auf Datenpunkten, die sich signifikant von den restlichen Feature-Target-Paaren unterscheiden [125].

Prognose

Im Bereich der Prognose werden Modelle entwickelt, die versuchen, Zielgrößen anhand von Einflussgrößen vorherzusagen. Bei der Prognose, die auf zukünftigen Zeiträumen basiert, kommen häufig Zeitreihenanalysen zum Einsatz. Im Fokus steht dabei nicht nur die Auswertung vergangener Daten, sondern vor allem die zuverlässige Vorhersage künftiger Daten. Dies erfordert die Berücksichtigung von Einflussfaktoren, die nicht allein aus einem vorhandenen Datensatz abgeleitet werden können. Die abschließende Gestaltung des Prognosemodells stellt somit eine Regressionsaufgabe dar. [127]

Visualisierung

Die Methoden der Visualisierung nutzen gezielt die Stärken der menschlichen Wahrnehmung, um durch visuelle Darstellungen eine Erfassung von komplexen Zusammenhängen zu erleichtern [127, 149]. Sie spielen dabei eine entscheidende Rolle bei der Identifikation von Mustern, Beziehungen und implizitem Wissen in umfangreichen Datensätzen, die auf den ersten Blick schwer erkennbar sind [150]. Die grafische Repräsentation der Daten ermöglicht eine intuitive Erfassung und Analyse, die über die bloße Betrachtung der Rohdaten hinausgeht und besonders hilfreich bei der Dokumentation und Kommunikation von Analyseergebnissen ist. Gängige Formate für solche Darstellungen sind Diagramme oder Histogramme. Insgesamt tragen Datenvisualisierung und ihre Methoden dazu bei, komplexe Zusammenhänge verständlich zu machen und ermöglichen es Analysten und Entscheidungsträgern, relevante Muster und Informationen aus den Daten zu extrahieren.

2.4.3 Validierung von Modellen des Data Mining und Maschinellen Lernens

Nach dem Training der Modelle erfolgt in den meisten Fällen die Sicherstellung der Modellqualität. Dies ist jedoch lediglich für die überwachten

Verfahren, Klassifikation und Regression möglich, da hier die Zielgrößen (Targets oder Label) bekannt sind und eine Überprüfung durchgeführt werden kann. Um diese Überprüfung durchzuführen, wird der verfügbare Datensatz bereits vor dem Modelltraining in Trainings-, Test- und ggf. Validierungsdaten aufgeteilt. Hierzu hat sich eine Aufteilung von 80% zu 20% im Falle von Trainings- und Testdaten [116] oder 60% zu 20% zu 20%, wenn der Algorithmus explizite Validierungsdaten benötigt [151], etabliert. Der Trainingsdatensatz wird verwendet, um das Modell anzulernen [152]. Währenddessen kann bereits über das Resubstitutionsmaß geprüft werden, wie gut das Modell bekannte Daten abbilden kann [115]. Gleichzeitig kann auf diese Weise eine erste Einschätzung erfolgen, ob der gewählte Algorithmus für die vorliegende Aufgabe geeignet ist [116]. Nach dem Training wird der Testdatensatz verwendet, um das Generalisierungsmaß, eine Prognosegüte für unbekannte Daten, zu ermitteln [115, 124]. Zur Ermittlung des Generalisierungsmaßes können, sofern kein Testdatensatz abgespalten wurde, außerdem neue Datensätze generiert und verwendet werden. Zur Teilung des initialen Datensatzes kann die oben beschriebene Aufteilung genutzt werden. Alternativ können statistische Methoden wie die Kreuzvalidierung verwendet werden, die eine umfangreichere Aussage über die Prognosegüte des Modells treffen können [116]. Hierzu wird der Trainingsdatensatz in zehn⁸ gleich große Teile aufgeteilt. Von diesen werden neun Teile für das Training des Modells verwendet und der verbleibende Teil für das Testing. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, dass jeder Teil der Daten einmal als Testdatensatz fungiert. Aus den ermittelten Qualitätsmerkmalen (engl. Scores) kann anschließend ein Mittelwert gebildet werden. Für weiterführende Erklärungen und Ausführungen zu statistischen Validierungsmethoden sei auf WITTEN et al. [116] und TAN et al. [115] verwiesen.

Ein optimales Metamodell zeichnet sich durch positive Bewertungen sowohl im Resubstitutions- als auch im Generalisierungsmaß aus. Wenn das Resubstitutionsmaß einen guten Score aufweist, während das Generalisierungsmaß schlecht ist, liegt möglicherweise eine Überanpassung (engl. Overfitting) vor. In solchen Fällen könnte der Lernalgorithmus eine zu große Anzahl von Variablen für die Zuordnung Feature-Target gewählt haben, so dass eine ausreichende Generalisierung nicht möglich ist. Im Gegensatz dazu spricht man von Unteranpassung (engl. Underfitting), wenn der Score des Resubstitutionsmaßes sehr niedrig ist. Dies könnte darauf hindeuten, dass der Lernalgorithmus für die Komplexität der Aufgabenstellung nicht geeignet ist oder relevante Variablen außer Acht gelassen hat. In beiden Szenarien ist die Vertrauenswürdigkeit der berechneten Metamodellwerte als gering einzustufen. Um ein zuverlässiges Metamodell zu entwickeln, ist es wichtig, sowohl

⁸ Hier sind auch andere Teilungen möglich, zehn hat sich in der Praxis jedoch bewährt [116].

das Resubstitutions- als auch das Generalisierungsmaß zu berücksichtigen. [115]

Zur Berechnung der Scores stehen, je nach verwendetem Modell, verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden soll.

Kennzahlen für die Klassifikation

Die Kennzahlen der Klassifikation leiten sich aus der sogenannten Konfusionsmatrix ab, die in Bild 9 dargestellt ist. In der Konfusionsmatrix werden die durch das Modell ermittelten Klassenzuweisungen \hat{y} den wahren Klassen y gegenübergestellt. Richtig zugeordnete Datenpunkte werden in den Zellen der True-Positives (TP) und True-Negatives (TN) aufsummiert, während falsch zugeordnete Datenpunkte in den Zellen False-Positive (FP) und False-Negative (FN) erfasst werden [115].

		Berechnete Klasse \hat{y}	
		Klasse x	Klasse +
Bekannte Klasse y	Klasse x	True-Positive (TP)	False-Negative (FN)
	Klasse +	False-Positive (FP)	True-Negative (TN)

Bild 9: Konfusionsmatrix einer binären Klassifikationsaufgabe nach [115]

Aus der Konfusionsmatrix lassen sich anschließend die folgenden wichtigsten Kennzahlen berechnen, wie TAN et al. [115] schreiben. Hierbei ist ein Ergebnis als umso besser zu interpretieren, je näher dieses an der Zahl 1 liegt.

Die **Genauigkeit** (engl. Accuracy, Acc) beschreibt das Verhältnis aus richtig ermittelten Klassenzuordnungen zu allen durchgeführten Klassenzuordnungen:

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (3)$$

Ist eine Klasse von besonderer Relevanz, so ist die Genauigkeit kein passendes Maß, da hier alle Klassen gleich gewichtet eingehen. Hierzu stehen die Kennzahlen **Präzision** (engl. precision, P) und **Trefferquote** (engl. recall, R) zur Verfügung. Die Präzision gibt Aufschluss darüber, wie gut ein Modell eine bestimmte Klasse ermitteln kann, wobei der Fehler durch die Zuordnung eines anderen Datensatzes zu dieser Klasse berücksichtigt wird:

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

Die Trefferquote hingegen ermittelt, wie viele der vorhandenen Datenpunkte einer Klasse korrekt zugeordnet wurden:

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

Es existieren noch verschiedene weitere Kennzahlen wie die **Prävalenz**, **False Discovery Rate** oder **False Omission Rate**. Hierzu sei auf weiterführende Literatur [153–156] verwiesen.

Kennzahlen für die Regression

Die Berechnung der Score-Kennzahlen für die Regression beruht immer auf einem Vergleich der bekannten Target-Werte y in einem Datensatz mit denen durch das Metamodell vorhergesagten Werten \hat{y} . Hierzu existieren verschiedene Kennzahlen; ein Auszug dieser wird im Folgenden vorgestellt, für weitere Ausführungen sei auf WITTEN et al. [116] verwiesen.

Der, besonders aus der linearen Regression bekannte, **Coefficient of Determination** (CoD oder R^2) stellt die erste betrachtete Kennzahl dar. Sie wird berechnet als [157]:

$$CoD = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Hierbei stellen \hat{y}_i die durch das Metamodell vorhergesagten Werte, y_i die wahren Target-Werte dar. Mit \bar{y} wird der Mittelwert der wahren Werte bezeichnet. Die Variable n stellt die Gesamtzahl der Datenpunkt dar. Je näher dieser Wert an 1 liegt, desto besser ist das vorliegende Modell. Die Verwendung des Modells bei nichtlinearen Verfahren ist nicht zielführend [157–159]. Da auch mit nicht-linearem Verhalten gerechnet werden muss, kann der CoD nur mit Hilfe weiterer Kennzahlen (z. B. Residuendiagrammen, Modellstatistikern und v.a. Fachwissen) ausgewertet werden. Auch im nicht-linearen Fall könnte ein hoher CoD Wert erreicht werden, obwohl die Daten nicht einem linearen Zusammenhang entsprechen.

Daher haben MOST und WILL [160] den **Coefficient of Prognosis** (CoP) als Erweiterung zum CoD entwickelt. Dieser wird berechnet als:

$$CoP = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{\hat{y}})(y - \bar{y})}{(n - 1)\hat{\sigma}} \right)^2 \quad (7)$$

Hier werden die vorhergesagten Werte ebenfalls mit \hat{y} und die wahren Werte mit y bezeichnet. Von beiden wird der Mittelwert berechnet, der mit $\bar{\hat{y}}$ und \bar{y} dargestellt wird. Zusätzlich gehen die Standardabweichung der wahren Werte σ und die der vorhergesagten Werte $\hat{\sigma}$ in die Berechnung mit ein. Die Gesamtzahl der Datenpunkte ist durch die Variable n repräsentiert.

Der **Mean Absolute Error** (MAE) gibt den durchschnittlichen absoluten Fehler zwischen den vorhergesagten Werten \hat{y} und wahren Werten y an und wird mit nachfolgender Formel berechnet [161]:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (8)$$

Eng verwandt mit dem MAE ist der **Root-Mean Squared-Error** (RMSE), der als klassisches Ingenieursmaß gesehen werden kann. Dieser wird, mit den gleichen Variablenbezeichnungen wie der MAE, berechnet als [116]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (9)$$

Beim MAE und RMSE handelt es sich um ein absolutes Maß, was die Vergleichbarkeit zwischen Modellen erschwert. Hierzu wurde der **Mean Absolute Percentage Error** (MAPE) entwickelt, der als relatives Maß einen Modellvergleich zulässt [116]:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{|y_i|}} \quad (10)$$

Die Modellgüte bei MAE, MAPE und RMSE kann als umso besser angesehen werden, je kleiner die jeweilige Kennzahl ist.

2.4.4 Toolboxes zur Anwendung von datengetriebenen Methoden

Für die Verwendung der Methoden des Data Minings und maschinellen Lernens sind Tools und Toolboxes notwendig. Eine Toolbox beschreibt eine Sammlung unterschiedlicher Tools, die dem gleichen Kontext zuzuordnen sind. Ein Tool ist definiert als eine Aktion, ein Vorgang oder ein Objekt, das andere Aktionen, andere Vorgänge oder andere Objekte unterstützt, vereinfacht oder begünstigt. [162]

Angesichts der kontinuierlich steigenden Anzahl an verfügbaren Toolboxes für Data Mining und Machine Learning wird die Wahl der richtigen Software zunehmend anspruchsvoller [163]. Eine erste Marktübersicht⁹ über Software für Data Mining und Machine Learning gibt Bild 10. Hierbei werden 20 Anbieter für Toolboxes anhand ihrer Fähigkeit der Durchführung und ihrer Vollständigkeit der Vision in die vier Rubriken Marktführer, Verfolger, Visionäre und Nischenakteure eingeteilt. Es gilt zu berücksichtigen, dass in der Marktübersicht vor allem kommerzielle Toolboxes dargestellt sind. Darüber hinaus gibt es auch Open-Source-Software, die ebenso leistungsstark ist. Als Software für Data Mining und Machine Learning gelten dabei sowohl Kernprodukte als auch eine ergänzende Auswahl an sich integrierenden Produkten, Komponenten, Bibliotheken oder Frameworks. Die primären Nutzer sind Experten aus dem Bereich der Datenwissenschaften. [166]

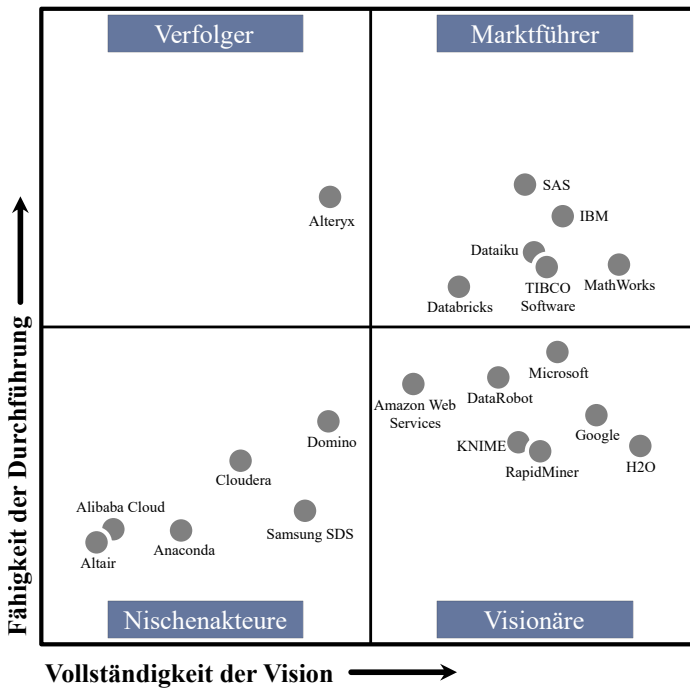


Bild 10: Marktübersicht über Software für Data Mining und Machine Learning nach [166]

Weitere kommerzielle (siehe Tabelle A1) sowie Open-Source (siehe Tabelle A2) Software für Data Mining und Machine Learning können den genannten Tabellen im Anhang entnommen werden.

⁹ Diese ist selbstverständlich nicht als abschließend anzusehen. Für einen ausführlicheren Überblick sei auf [163–165] verwiesen.

2.4.5 Vorgehensweisen zur Realisierung von Projekten datengetriebener Methoden

Die Entwicklung von Anwendungen datengetriebener Methoden erfordert ein systematisches Vorgehen, um zum Erfolg zu führen. Hierbei sind insbesondere die Schritte der initialen Datenanalyse, der Identifikation relevanter Muster sowie das Ziehen der korrekten Schlüsse von zentraler Bedeutung [126, 167]. In den letzten Jahren hat sich hierbei, ausgehend von einem generischen Datenanalyseprozess [115, 167] bestehend aus den Phasen Pre-Processing (Vorbereitung der Daten), Processing (dem eigentlichen Data Mining) und Post-Processing (Auswertung der Ergebnisse), der KDD-Prozess¹⁰ nach FAYYAD et al. [109] und der CRISP-DM¹¹ nach CHAPMAN et al. [168] etabliert, auf die in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

Knowledge Discovery in Databases

Der KDD-Prozess (Knowledge Discovery in Databases) [169] ist eine umfassende Prozessbeschreibung für die Gewinnung von wertvollem Wissen und Erkenntnissen aus großen Datenbeständen. Er umfasst eine Reihe von Schritten, die den Entdeckungsprozess von der Datenauswahl bis zur endgültigen Bereitstellung von Wissen leiten, wie in Bild 11 dargestellt und besteht aus den folgenden Phasen [169]:

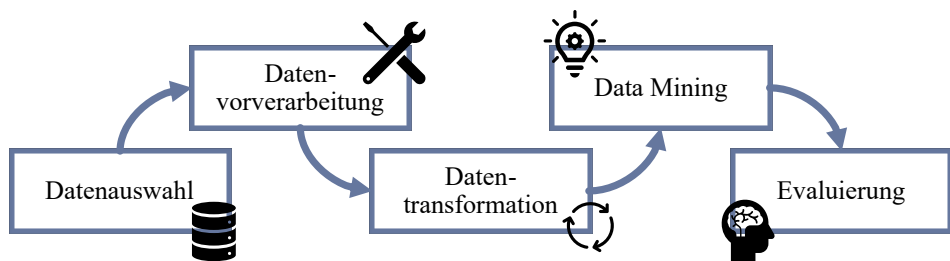


Bild 11: Vorgehensweise zum KDD-Prozess nach FAYYAD et al. [109]

1. **Datenauswahl:** In dieser ersten Phase identifiziert und selektiert man relevante Daten für die Analyse. Dabei orientiert man sich an den Projektzielen, dem Fachwissen und der Datenverfügbarkeit. Die Auswahl der Daten sollte mit dem spezifischen Problem oder der Forschungsfrage in Einklang stehen.

¹⁰ KDD steht hierbei für Knowledge Discovery in Databases.

¹¹ CRISP-DM steht hierbei für Cross-Industry-Standard-Process for Data Mining.

2. **Datenvorverarbeitung:** Nach der Auswahl der Daten erfolgt deren Vorverarbeitung zur Vorbereitung auf die Analyse. Dabei werden Daten bereinigt, indem fehlende Werte behandelt, Fehler korrigiert und Inkonsistenzen behoben werden. Gegebenenfalls erfolgt auch eine Datenintegration, um verschiedene Datensätze in ein einheitliches Format zu überführen. Transformationstechniken wie Normalisierung oder Aggregation kommen zum Einsatz, um die Daten für die weitere Analyse optimal zu gestalten.
3. **Datentransformation:** In dieser Phase transformiert man die vorverarbeiteten Daten in eine für die Analyse geeignete Darstellung. Dies beinhaltet typischerweise die Umwandlung der Daten in ein Format, das effektiv von Data-Mining-Algorithmen verarbeitet werden kann. Es können auch Techniken zur Merkmalsauswahl oder -extraktion angewendet werden, um die Dimensionalität des Datensatzes zu reduzieren und relevante Informationen zu erfassen.
4. **Data Mining:** Der Kern des KDD-Prozesses liegt in dieser Phase, in der fortschrittliche Algorithmen und Techniken eingesetzt werden, um Muster, Beziehungen und Erkenntnisse aus den transformierten Daten zu extrahieren. Die Auswahl der Data-Mining-Algorithmen richtet sich nach der Art des Problems und dem gewünschten Wissen, das extrahiert werden soll. Hierzu zählen Klassifizierung, Clustering, Regression, Assoziationsregel-Mining und andere.
5. **Evaluierung:** Nach der Entdeckung von Mustern und Beziehungen durch Data Mining erfolgt eine Bewertung ihrer Qualität, Bedeutung und Nützlichkeit. Diese Evaluation basiert auf Fachwissen, statistischen Messungen und spezifischen Bewertungsmetriken der Problemdomäne. Muster, die den gewünschten Kriterien entsprechen, gelten als wertvoll und können weiterführend analysiert werden.

Der KDD-Prozess ist iterativ und ermöglicht eine Rückmeldung und Verfeinerung in jeder Phase. Die Ergebnisse einer Iteration können in die nachfolgenden Iterationen einfließen, was zu einem iterativen und interaktiven Wissensentdeckungsprozess führt.

Cross Industry Process for Data Mining

Neben dem KDD ist das CRISP-DM (**CR**oss-**I**ndustry **S**tandard **P**rocess for **D**ata **M**ining) [168] eine weit verbreitete Prozessbeschreibung für die Durchführung von Data Mining und Analyseprojekten. Der Prozess ist in Bild 12 dargestellt und besteht aus sechs Hauptphasen [168]:

1. **Geschäftsverständnis:** In dieser ersten Phase steht das Verständnis der Projektziele, Anforderungen und Unternehmensbeschränkungen im Fokus. Ziele werden identifiziert, die Problemstellung definiert, und es

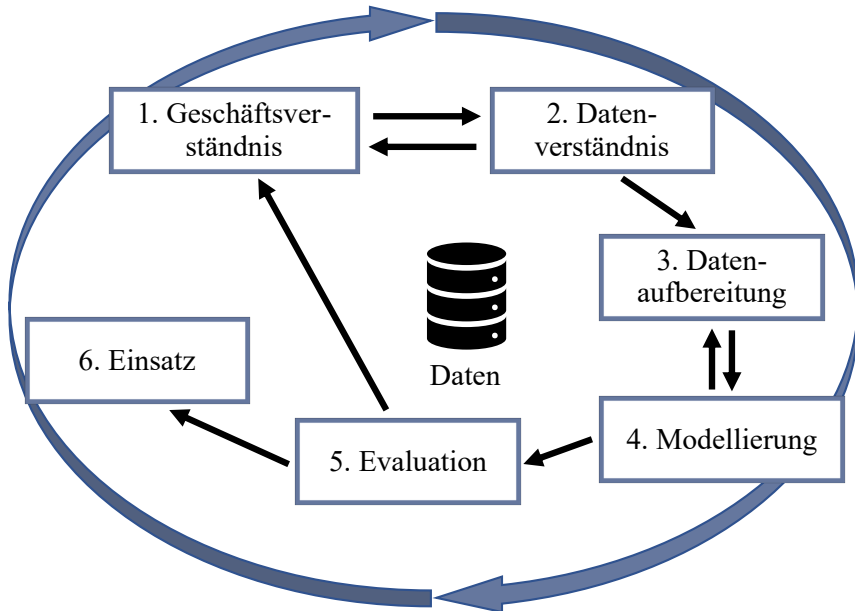


Bild 12: Vorgehensweise zum CRISP-DM nach CHAPMAN et al. [168]

entsteht ein klares Bild davon, wie die Projektergebnisse der Organisation zugutekommen.

2. **Datenverständnis:** Hier werden Datenquellen identifiziert und gesammelt. Eine umfassende Analyse der Datenstruktur, Qualität und möglichen Einschränkungen erfolgt. Datenprobleme werden adressiert, erste Erkenntnisse gewonnen, um die Durchführbarkeit des Projekts zu bestimmen.
3. **Datenaufbereitung:** Diese Phase bereitet die Daten für die Analyse vor. Dabei werden Techniken wie die Behandlung fehlender Werte oder Ausreißer angewendet, um einen sauberen und zuverlässigen Datensatz zu erstellen.
4. **Modellierung:** Hier kommen Data Mining- und Machine Learning-Techniken zum Einsatz, um Modelle zu erstellen und zu validieren. Die Auswahl basiert auf Projektzielen und Datentypen. Iterative Experimente und Modellverfeinerungen erfolgen für die gewünschte Genauigkeit und Leistung.
5. **Evaluation:** Entwickelte Modelle werden anhand vorher festgelegter Geschäftsziele und Kriterien bewertet. Die Leistung und Effektivität werden anhand geeigneter Maßstäbe beurteilt, um zu entscheiden, ob die Modelle den Anforderungen entsprechen oder Verbesserungen nötig sind.

6. **Einsatz:** Die letzte Phase fokussiert sich auf den Einsatz der Data Mining-Ergebnisse im betrieblichen Umfeld. Dies umfasst die Integration von Modellen in bestehende Systeme oder Prozesse, die Erstellung von Benutzeroberflächen oder Berichten für Endbenutzer sowie die Bereitstellung von Dokumentation und Schulungen für eine erfolgreiche Implementierung und Übernahme der Ergebnisse.

Während des gesamten Prozesses gibt es Feedbackschleifen, die Iterationen und Verfeinerungen auf der Grundlage neuer Erkenntnisse oder sich ändernder Geschäftsanforderungen ermöglichen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Projekt auf die Ziele des Unternehmens abgestimmt bleibt und sich bei Bedarf weiterentwickelt.

2.4.6 **Vorhandene Use-Cases Datengetriebener Methoden**

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten waren Anwendungsfälle datengetriebener Methoden im starken Fokus von Industrie und Forschung. Bild 13 veranschaulicht die Entwicklung der Veröffentlichungszahlen von 1996 bis 2021, aufgeteilt nach den Forschungskategorien Systementwurf, Implementierung, Systemintegration und Validierung des V-Modells nach VDI 2206 [24].

Ein stetiger Anstieg der Veröffentlichungen in allen Kategorien ist seit 1996 zu beobachten. Im Jahr 1998 wurden erstmalig Veröffentlichungen in den Kategorien Implementierung und Systemintegration registriert, während bereits 1996 die erste Validierungsstudie erschien. In den folgenden Jahren schwankte die Anzahl der Veröffentlichungen. Besonders auffällig ist der Höhepunkt im Jahr 2019, in dem die höchste Gesamtzahl von Veröffentlichungen verzeichnet wurde. Diese zeitliche Entwicklung spiegelt den wachsenden Stellenwert des Digital-Engineering wider, insbesondere in den Bereichen Systemdesign und -implementierung. Die vermehrten Veröffentlichungen gehen einher mit der fortlaufenden Integration digitaler Technologien in die Ingenieurwissenschaften. Eine Schlussfolgerung dieser Analyse ist, dass bisherige Forschungsarbeiten hauptsächlich auf Systemdesign und -implementierung fokussierten. Obwohl die Systemintegration in der Literatur vertreten ist, nimmt sie einen vergleichsweise geringen Anteil an den Gesamtveröffentlichungen ein.

Die detaillierte Beschreibung dieser Quellen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, angesichts dessen sind in der folgenden Tabelle 1 nur einige Auszüge dargestellt. Für einen umfangreichen Blick auf Anwendungsfälle datengetriebener Methoden sei auf die verschiedenen existierenden Literaturstudien verwiesen [P13, 88, 170–175].

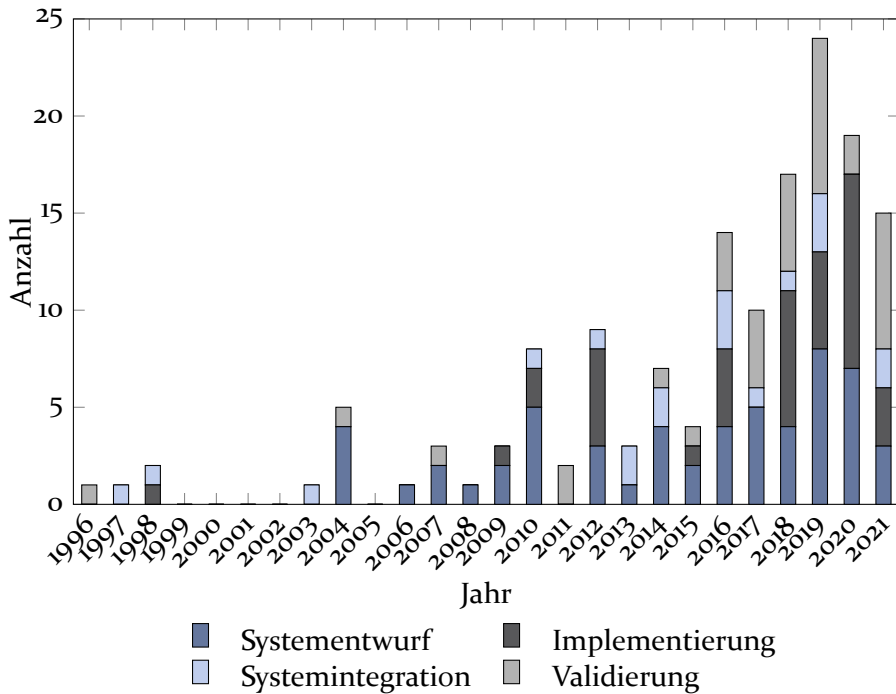


Bild 13: Zeitliche Verteilung der Veröffentlichungen zu datengetriebenen Methoden in der mechatronischen Produktentwicklung nach [P13]

Tabelle 1: Auszug möglicher Anwendungsfälle datengetriebener Methoden in der Produktentwicklung

Autoren	Jahr	Anwendung
AGARD & KUSIAK [176]	2004	Produktfamilienmanagement
ARBABI et al. [177]	2021	Bewertung von Konzepten
BERTONI et al. [178]	2020	Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung
CHAN et al. [179]	2010	Einsatz von KI zur Unterstützung grüner Produktziele
CHEUNG et al. [180]	2015	Kostenschätzung für Unternehmen mit geringen Stückzahlen, hoher Komplexität und langer Lebensdauer
DIESTMANN et al. [181]	2021	Einsatz von Data Mining-Techniken zur Unsicherheitsquantifizierung in der Getriebeentwicklung
DWORSCHAK et al. [182]	2019	Generierung neuer Geometrien basierend auf sich ändernden Teileanforderungen

Autoren	Jahr	Anwendung
GUSSEN et al. [183]	2019	Vorhersage der wahrgenommenen Qualität von Oberflächenmaterialien während der Systementwicklung
HOEFER & FRANK [184]	2018	Unterstützung des Konzeptstadiums durch Bereitstellung von Vorschlägen für spätere Fertigungsstrategien
KASHKOUSH & EL MARAGHY [185]	2017	Unterstützung des Konzeptstadiums durch Bereitstellung von Vorschlägen für Fertigungskapazitäten
KRETSCHMER et al. [186]	2014	Unterstützung des Konzeptstadiums durch Bereitstellung von Vorschlägen für die Montage
LINDEMANN et al. [187]	2019	Integration von Bewertungen zur wahrgenommenen Qualität in den Produktentwicklungsprozess
LIN & CHIU [188]	2017	Text Mining in Verbindung mit Kansei Engineering zur Analyse von Kundenanforderungen
LÜTZENBERGER et al. [189]	2016	Verbesserung von Produkt-Service-Systemen (PSS) unter Verwendung von Daten aus der Nutzungsphase
PRAJAPATI et al. [190]	2021	KI-gestützte pädagogische Unterstützungstools für das Skizzieren in der Systementwicklung
SAUER et al. [191]	2021	Unterstützung bei fertigungsgerechten Bauteildesigns
SAUER et al. [P8]	2022	Evaluation von Live-Simulationsergebnissen mithilfe von maschinellem Lernen
SETTALURI et al. [192]	2020	Einsatz von Reinforcement Learning für das Design analoger Schaltungen
SCHREIBER et al. [193]	2021	ML- und datengetriebener Ansatz für das Design von Gebäudekühlsystemen
SPRÜGEL et al. [194]	2018	Plausibilitätsprüfung von Simulationen
TRAUER et al. [103]	2020	Datengetriebenes Design in der Entwicklung von industriellen Klimasystemen
TÜCHSEN et al. [195]	2019	Portfolioanalyse durch Data-Driven-Ansatz mit Metamodellen
WOLF et al. [196]	2019	Datengetriebene Vorhersage und Analyse von physischen Interaktionen zwischen Benutzern und Produkten
ZHANG et al. [197]	2013	Nutzung der Datengetriebenen Entwicklung zur Planung von Zuverlässigkeitstests
ZHANG et al. [198]	2017	Clustering von Produktkonzeptanalysen

Die geringe Anzahl von Veröffentlichungen zum Thema Systemintegration im Zusammenhang mit Digital Engineering könnte auf verschiedene Faktoren zurückzuführen sein, darunter die begrenzte Verfügbarkeit von

Daten zu diesem spezifischen Prozessschritt und möglicherweise auch auf die Tatsache, dass Unternehmen datenschutztechnische Bedenken in der Anwendung von Digital Engineering Lösungen haben, die ihre innovativen Neuheiten beinhalten. Eine Herausforderung besteht darin, dass Datenakquise und -bereitstellung oft als eine der größten Hürden bei der Anwendung von digitalen Engineering-Methoden angesehen werden. Vorschläge für weitere Forschung umfassen daher die Untersuchung von datengetriebenen Ansätzen, die Produktionsdaten nutzen und diese zurück in den Produktentwicklungsprozess integrieren, sowie die verstärkte Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung, um den Technologietransfer zu unterstützen und realistische Daten für Forschungszwecke zu erhalten

2.4.7 Zwischenfazit zu datengetriebenen Methoden

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die wissenschaftlichen Grundlagen zur Anwendung datengetriebener Methoden dargestellt. Die in Kapitel 2.4.2 gezeigten Methoden können dazu verwendet werden, Daten der Produktentwicklung zielgerichtet zu verwenden. Ebenso zeigt Kapitel 2.4.5, dass mit dem KKD Prozess nach FAYYAD et al. [109] und dem CRISP-DM nach CHAPMAN et al. [168] bereits leistungsfähige Vorgehensmodelle zur Realisierung von datengetriebenen Projekten zur Verfügung stehen. Weiterhin existieren zwar bereits industriennahe Anwendungsfälle datengetriebener Methoden, diese sind allerdings oftmals akademischer Natur und bisher nicht in das Tagesgeschäft, insbesondere von KMU, integriert. Diese speziell für die deutsche Wirtschaft so relevanten Leistungsträger haben Probleme mit den Einführungsprozessen, was sie vor extreme Wettbewerbsnachteile stellt, da Informationen [199] und Daten [200], sowie deren Nutzung in der heutigen Zeit als zentraler Produktionsfaktor gesehen werden. Mögliche Gründe für diese Hemmnisse werden im Kapitel 4 genauer analysiert.

2.5 Bestehende Herausforderungen der Integration von KBE oder DE Ansätzen

Bei der Einführung von KBE-Systemen und Digital-Engineering-Anwendungen stehen verschiedene Herausforderungen im Vordergrund. Diese Herausforderungen werden zunächst separat eingeführt, um anschließend einen Vergleich anzustellen. Ziel dieses Vergleichs ist es zu prüfen, inwiefern bestehende Lösungsansätze und Herausforderungen im Kontext von KBE-Systemen auf die aktuellen Problemstellungen im Digital Engineering übertragbar sind. Besonders relevant ist dabei die Frage, ob die Erfahrungen und Lösungen, die während der Einführung von KBE-Systemen gewonnen wurden, auch bei den aktuellen Herausforderungen im Digital

Engineering anwendbar sind. Dieser Ansatz zielt darauf ab, Synergien zwischen den beiden Domänen zu identifizieren und bestehende bewährte Praktiken auf das Digital Engineering zu übertragen. Durch eine kritische Bewertung und Anpassung der bisherigen Lösungen können potenzielle Verbesserungen und Optimierungen im Einführungsprozess des Digital Engineerings erreicht werden.

2.5.1 Herausforderungen bei der Einführung von KBE-Systemen

Die Einführung von KBE-Systemen stößt auf verschiedene technologische Herausforderungen, die seit den 1980er-Jahren bestehen. Ein zentrales Problem ist die Unvollständigkeit von Wissen [201]. Dies führt zu einem Dilemma für das Management bei der Wahl zwischen aufwändiger Entwicklung mit hohem Detaillierungsgrad und schneller Anwendung [201]. Die Wiederverwendbarkeit und Austauschbarkeit von Wissen zwischen verschiedenen KBE-Anwendungen und Plattformen sind weitere Herausforderungen. Interoperabilität ist entscheidend, erfordert jedoch einen Standard, der syntaktische und semantische Übereinstimmung zwischen verschiedenen KBE-Plattformen ermöglicht [202]. Die Implementierung von KBE-Systemen erfordert eine „Wissensverbindung“, um die gemeinsame Bedeutung der Daten auszutauschen [203]. Die fehlende Quantifizierung der Vorteile und Kosten von KBE-Systemen ist ein weiteres Problem. Eine effiziente Implementierung kann jedoch die Durchlaufzeiten für Engineering-Aufgaben erheblich verkürzen [204]. Die Tendenz KBE-Systeme als „Black-Box“-Anwendungen einzusetzen, bei der Entscheidungen und Ergebnisse schwer nachvollziehbar sind, stellt ein ernsthaftes Problem dar. Transparenz ist entscheidend, um die Einführung von KBE zu erleichtern und Wissensverluste zu vermeiden [205]. Die Methode MOKA wurde entwickelt, um bei der Entwicklung von KBE Anwendungen zu unterstützen [206] und wird insbesondere zur Modellierung von Konstruktionswissen verwendet [207]. Dennoch weist diese Methode einige Schwachstellen auf. Sie fokussiert sich stark auf die Unterstützung des Wissensingenieurs und vernachlässigt den Endbenutzer [88]. Dies kann zu einer geringen Nutzung im Entwurfsprozess, Wartung und Wiederverwendung der KBE-Anwendung führen. Die genannten Herausforderungen verdeutlichen die Notwendigkeit von Transparenz, Standardisierung und Bewertungsfaktoren zur Messung des Erfolges für eine erfolgreiche Einführung von KBE-Systemen [201, 202, 208].

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Misserfolge von KBE-Systemen darauf zurückgeführt, dass die Forschung und Entwicklung sich zu stark auf die Erfassung und Strukturierung von Wissen konzentriert haben, wobei die Rolle des Menschen in diesem Prozess vernachlässigt wurde [209]. Bei Pilot-

projekten zeigen sich in der Vorprojektphase unklare Ziele, falsche Erwartungen der Auftraggeber und die richtige Wahl von Experten als entscheidende Faktoren, die über einen späteren Erfolg oder Misserfolg entscheiden [210]. Die Rolle des Wissensingenieurs ist in dieser Phase oft nicht besetzt oder mit unzureichenden zeitlichen und fachlichen Kapazitäten ausgestattet [210, 211]. Schwierigkeiten beim Wissenserwerb werden insbesondere durch die Probleme von Menschen, ihr implizites Wissen zu erklären und formal zu dokumentieren, da Fachjargon und die Annahme, dass andere die Terminologie verstehen, zu Verständnisproblemen führen [212]. Zudem haben Experten Schwierigkeiten, die Eingabeumgebung von Akquisitionskomponenten zu verstehen [210]. Hinzu kommt außerdem mangelnde Bereitschaft der Benutzer, ihr Wissen zu teilen [213]. Die Unterstützung durch das Management wird als entscheidender Faktor für den Erfolg von KBE-Systemen betrachtet [209]. Schulungen, Anreize und klare Kommunikation sind erforderlich, um die Nutzungsbereitschaft zu fördern [209]. Die Unternehmenskultur spielt eine entscheidende Rolle bei der Implementierung von KBE-Systemen [201, 209]. Eine fortschrittliche Kultur fördert die Zusammenarbeit zwischen Anwendungsexperten, Wissensingenieuren und Endbenutzern [201]. Unternehmen müssen Mitarbeiter über die Vorteile von Wissensmanagement aufklären und Feedback integrieren [209]. Erfolgreiche Anwender passen möglicherweise ihre Organisationsstruktur an, um KBE effektiv einzusetzen [201].

2.5.2 Herausforderungen bei der Einführung von Digital-Engineering Systemen

Die Einführung von datengetriebenen Methoden in der Produktentwicklung bringt verschiedene technologische Herausforderungen mit sich. Dazu gehören die Bewältigung umfangreicher Datenmengen, -formate und -quellen sowie die Gewährleistung der Interoperabilität zwischen Systemen [214]. Die Erfassung, Bereinigung und Analyse von Daten stellen laut AL-JAROUDI et al. [215] eine Herausforderung dar, da enorme Mengen an Rohdaten anfallen können, die zusätzlich aus inkompatiblen Datentypen oder -quellen bestehen können. Die steigende Digitalisierung führt zu einer rasanten Datenproduktion, deren Analyse kosten- und zeitaufwendig ist [P3]. Eine weitere Hürde stellt die Auswahl geeigneter Datenanalysewerkzeuge und -techniken im Entwurfsprozess dar [214]. Gesammelten Daten müssen von höchster Qualität sein, um zuverlässige Analysen zu ermöglichen. Hierbei ist insbesondere auf Datenvollständigkeit und -richtigkeit zu achten, um fehlerhafte Schlussfolgerungen zu vermeiden [216]. Die Notwendigkeit, Modelle transparent und verständlich zu gestalten, um Missverständnisse zu vermeiden, wird betont [217]. Prädiktive Techniken des Data Minings im Produktentwicklungsprozess, wie die Vorhersage von FEM-Evaluationsergebnissen, haben enormes

Potenzial, Unternehmen neigen jedoch dazu, sich auf deskriptive Datenanalysen zu beschränken [214]. Neben den technischen Herausforderungen weist WILBERG et al. darauf hin, dass auch organisatorische und menschliche Hürden überwunden werden müssen [218]. Hierzu zählen mentale Hindernisse, mangelndes Problembewusstsein und Akzeptanzprobleme der Mitarbeiter [219]. Die mangelnde Nutzungsbereitschaft muss durch Gespräche erkannt und beseitigt werden, wobei die taktische Anwendung der Technologie zur Durchsetzung von Unternehmenszielen im Vordergrund stehen sollte [P3].

2.5.3 Zwischenfazit und Vergleich der Herausforderungen

Da es bei der Umsetzung der beiden Ansätze gewisse Herausforderungen zu überwinden gilt, scheitern Projekte oft an unzureichender Vorbereitung. Viele technische Herausforderungen der KBE-Methoden wurden durch die Digitalisierung gelöst, wobei diese auch weitere Herausforderungen bei den datengetriebenen Methoden verursacht haben, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert. Besonders vielversprechend waren folgende Ansätze: Durch die Semantik-Web-Technologie können nun stark verteilte Informationen und Ressourcen, sowie Daten mit uneinheitlichem Format analysiert werden. Cloud-Computing ermöglicht auch kleinen und mittleren Unternehmen durch die Nutzung von externen Computerressourcen den Zugang zu leistungsintensiven, datengetriebenen Methoden. Die aktuelle Forschung an „Explainable AI“ könnte die Interpretation von schwer nachvollziehbaren Ergebnissen, von sogenannten „Black-Box-Modellen“, erleichtern. Allgemeine Einführungsprobleme, wie die Nutzerakzeptanz konnten bisher weniger gelöst werden. Durch das neu geschaffene Verständnis der datengetriebenen Methoden könnte die Nutzungsbereitschaft und Akzeptanz steigen, was eine reibungslose Einführung unterstützen würde. Soziale Hindernisse haben sich während des Technologiewandels allerdings kaum verändert. Aufgrund der sich stark unterscheidenden Unternehmens- und Bereichsstrukturen können meist nur individuelle Lösungen Abhilfe schaffen. Es ist klar zu sehen, dass technologischer Fortschritt nicht immer automatisch Begeisterung sowie ein Umdenken bei den Benutzern auslöst. Dies kann nur durch gutes Management und eine zukunftsgerichtete Unternehmenskultur erreicht werden.

2.6 Prozessmanagement

Zur erfolgreichen Durchführung eines Digital-Engineering-Projekt ist in einem ersten Schritt ein passender Anwendungsfall nötig. Um diesen zu identifizieren, können Prozessmodelle und Methoden des Prozessmanagements herangezogen werden. Diese Möglichkeiten werden nachfolgend näher vorgestellt. Nach einer Definition des Prozessbegriffs in Kapitel 2.6.1 wird im

Kapitel 2.6.2 auf die übergeordneten Methoden der Prozessoptimierung und in Kapitel 2.6.3 auf die Möglichkeiten der Prozesserfassung eingegangen. Die darauffolgenden Kapitel behandeln die Prozessdokumentation (Kap. 2.6.4) sowie die nachfolgende Bewertung und Analyse (Kap. 2.6.5). Der Abschnitt schließt mit einem Zwischenfazit zum Prozessmanagement im Kontext des Digital-Engineering (Kap. 2.6.6).

2.6.1 Prozess Definition

Gemäß ISO 9001:2015 [43] ist ein Prozess definiert als eine Abfolge von zusammenhängenden oder einander beeinflussenden Tätigkeiten, die spezifische Eingaben nutzen, um ein vorgegebenes Ergebnis zu erzielen. Eine ähnliche Definition liefert BEST und WETH [44], die Prozesse als eine Abfolge einzelner Aufgaben bezeichnen, die ein klar definiertes Ergebnis liefern. Zusätzlich kann ein Prozess gemäß den Autoren wiederholt durchgeführt werden und parallel zu anderen Prozessen ablaufen. Hierbei sind Start- und Zielpunkt klar definiert und können weiterhin als Schnittstellen zu vor- oder nachgelagerten Prozessen gesehen werden.

In Abgrenzung zum Prozess findet zusätzlich der Geschäftsprozess Anwendung. Obgleich die Begriffe oftmals synonym verwendet werden, existieren Unterschiede. Nach DUMAS et al. [220] ist ein Geschäftsprozess eine Abfolge von Aufgaben oder Aktivitäten, die sich über mehrere Organisationseinheiten erstrecken und die eine allgemeine Geschäftsstrategie verfolgen. Dementsprechend ist der Geschäftsprozess die operative Umsetzung der Unternehmensstrategie. In Anlehnung an SCHEER [221] ist der Geschäftsprozess die modellhafte Beschreibung der auszuführenden Funktion eines Unternehmens in seiner inhaltlichen und zeitlichen Abhängigkeit. Zusätzlich sind Geschäftsprozesse durch steuernde und unterstützende Aufgaben beeinflusst, die nicht direkt auf Inputs oder Outputs abgebildet werden können, wie in Bild 14 visualisiert.

2.6.2 Übergordnete Methoden der Prozessoptimierung

Im Rahmen des Lebenszyklus eines Geschäftsprozesses soll jeder Prozess regelmäßig kritisch hinterfragt und verbessert werden. Daher ist die Prozessoptimierung zentraler Teil dieses Lebenszyklus [222]. Ziel ist dabei, die Komponenten Kosten, Qualität und Zeit zu verbessern [223]. Hierbei lassen sich zwei Ansätze unterscheiden. Das Business-Process-Re-Engineering (BPR) hat zum Ziel, Geschäftsprozesse fundamental zu überdenken und strebt eine radikale Neugestaltung an [224]. Die Geschäftsprozessoptimierung verfolgt hingegen einen weniger tiefgreifenden Ansatz, da hier lediglich

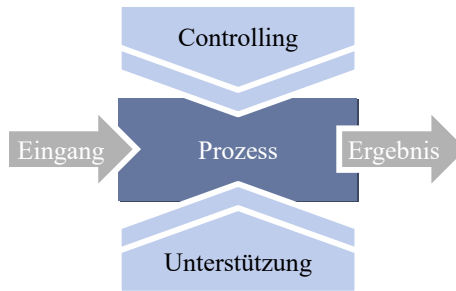


Bild 14: Repräsentation eines Business Prozesses mit Eingang, Ergebnis, Controlling und unterstützende Aufgaben

eine nachhaltige Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens angestrebt wird, ohne die Prozesse grundsätzlich zu hinterfragen [225].

In der Literatur werden Methoden zur Prozessanalyse von denen zur Prozessoptimierung unterschieden. Prozessanalyse und Prozessoptimierung stehen jedoch in einem direkten Zusammenhang, da im Rahmen der Prozessanalyse eine Ist-Analyse durchgeführt wird, während bei der Prozessoptimierung Schwachstellen und Optimierungspotentiale identifiziert werden [226].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle Modelle der gleichen groben Struktur folgen, die in Bild 15 dargestellt ist. Die Modelle werden in der Regel in drei oder vier Stufen aufgebaut. Ein Verfahren zur Erfassung von Geschäftsprozessen wird von SHARP und MCDERMOTT [227] vorgeschlagen. Zu Beginn wird der Rahmen definiert und ein Team aus den am Prozess beteiligten Mitarbeitern gebildet. In einem zweiten Schritt werden die Informationen gesammelt und ein Verständnis für den Prozess entwickelt. Anschließend wird der Prozess im dritten Schritt modelliert. Dazu werden die Prozessgrenzen identifiziert, die Ereignisse und Aktivitäten benannt, notwendige Ressourcen und deren Standorte bestimmt und schließlich der Kontrollfluss und andere prozessabhängige Objekte identifiziert. In Schritt vier wird der Prozess verifiziert. BRENNER [228] stellt einen ähnlichen Ansatz vor, wobei er die eigentliche Informationserfassung in eine qualitative Analyse durch Interviews und eine quantitative Analyse durch Prozesskennzahlen unterteilt. Ein weiteres Modell zur Prozesserfassung wird von BEST und WETH [44] vorgestellt, die ihren Ansatz in drei grobe Phasen unterteilen. BEST und WETH wählen das Experteninterview und den Workshop als bevorzugte Methoden für ihre Prozessaufnahme, um Informationen von den Mitarbeitern zu sammeln. KOUBARAKIS und PLEXOUSAKIS [229] stellen einen weiteren Ansatz zur Erfassung von Geschäftsprozessen vor. Der Ansatz

	Sharp [227]	Best/Weth [44]	Brenner [228]	Koubarakis [229]
Definition	Rahmenbedingungen festlegen	Prozesslandkarte erstellen	Start und Endpunkt definieren	Ziele definieren
		Ausgrenzen des Prozesses		Rollen und Verantwortlichkeiten
		Detailierungsgrad festlegen	Teilprozesse identifizieren	
		Organisationseinheiten identifizieren	Beschreibung der Prozessschritte	
		Analyseverfahren definieren	Formulare, Systeme, Medien	
		Leitfaden formulieren	Verschwendungen identifizieren	
Informationserfassung	Informationen erfassen	Experten identifizieren	Zeiten analysieren	Hauptaktivitäten identifizieren
		Interviews durchführen	Schnittstellen analysieren	
Modellierung	Modellierungsaufgabe durchführen	Dokumentation erstellen		Kontext von Aktivitäten und Rollen
		Durchlaufzeit und Prozesskosten	Varianten erfassen	
Verifizierung	Qualität sicherstellen	Verifizierung	Verbesserungen definieren	Verifizierung

Bild 15: Überblick über bestehende Prozessoptimierungsmethoden (nach [P5]). Hellblaue Kästen symbolisieren übergordnete Phasen, graue Kästen Einzelschritte.

umfasst fünf Schritte, die nicht nur bei der Erfassung von Prozessen, sondern auch bei der Entwicklung eines Informationssystems angewandt werden.

2.6.3 Prozessaufnahme

Im vorangegangenen Abschnitt wurden verschiedene übergeordnete Methoden zur Analyse und Optimierung von Geschäftsprozessen vorgestellt. Um die dort notwendigen Informationen zu erlangen, stehen Methoden zur Prozessaufnahme zur Verfügung. Diese teilen sich in primäre und sekundäre Methoden, wie in Bild 16 dargestellt. Bei der Primärerhebung werden die Informationen erstmalig und zweckbezogen erhoben, wohingegen die Sekundärerhebung auf vorhandene Dokumente zurückgreift [223]. Im Folgenden werden die einzelnen Methoden kurz vorgestellt. Hierbei liegt der Fokus auf den grundlegenden Vorgehensweisen. Für eine tiefere Betrachtung weitergehender Aspekte der empirischen Sozialforschung, wie kulturelle oder persönliche Aspekte, sei auf einschlägige Fachliteratur (z. B. [230, 231]) verwiesen. Techniken der Prozessbeobachtung werden nicht weiter ausgeführt, da diese primär für operative Prozesse geeignet sind.

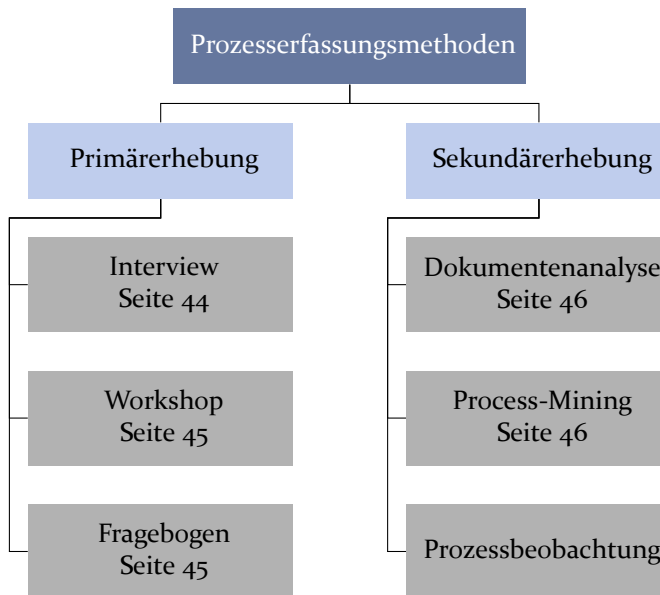


Bild 16: Methoden zur Ist-Aufnahme von Prozessen (erweitert und ergänzt nach [223])

Interview

Zentrale Eigenschaft eines Interviews ist der persönliche Kontakt zwischen dem Interviewer und dem Befragten, wobei dieser Kontakt physisch oder

über Telefon- und Videokonferenzen erfolgen kann [44]. Das Interview kann weiter unterscheiden werden in standardisierte und nicht standardisierte Formen, sowie offene und verdeckte Befragungen. Im weiteren Verlauf werden ausschließlich offene Formate betrachtet, da verdeckte Befragungen vorrangig in klinischen Studien Anwendung finden, um eine Beeinflussung der Probanden zu vermeiden [223]. Standardisierte Interviews folgen einem vorgegebenen Verlauf mit definierten Fragen, was zu einer Reproduzierbarkeit der Gespräche führt. So lassen sich Ergebnisse vergleichen und Abweichungen reduzieren. Im Gegensatz hierzu stehen nicht standardisierte Interviews, die lediglich Themengebiete als Richtschnur vorgeben, aber keine feste Reihenfolge vorschreiben.

Durch den offenen Gesprächscharakter erhöht sich das Akzeptanzlevel unter den Mitarbeitenden, da sich diese als Teil der Analyse sehen. Weiterhin können Mitarbeitende Anregungen einbringen und Verbesserungsvorschläge vorbringen. Die gemachten Angaben müssen jedoch immer im Kontext der subjektiven Eindrücke der Mitarbeitenden gesehen werden. Zudem erfordert die Erstellung eines qualitativen Leitfadens einen hohen Zeitbedarf und qualifiziertes Personal. [223]

Workshop

In einem Workshop diskutieren die beteiligten Mitarbeitenden gemeinsam über den aktuellen Prozess, Schwierigkeiten und Herausforderungen. Dabei regt die Atmosphäre die Mitarbeitenden zu einer aktiven Teilnahme an und der Prozessablauf wird gemeinsam erarbeitet. Durch einen Workshop können insbesondere verschiedene Blickwinkel auf einen Prozess in kurzer Zeit erfasst und diskutiert werden. Einem zielführenden Workshop liegt ein Ablaufplan zugrunde, der die verfügbare Zeit in Phasen einteilt, in denen die Mitarbeitenden durch verschiedene Kreativitätstechniken den aktuellen Prozessablauf abbilden [232].

Ein großer Pluspunkt des Workshops ist die Gegenüberstellung und Erfassung vieler subjektiver Eindrücke. Allerdings ist der Erfolg des Workshops von der Motivation des Teams abhängig. Bei Mitarbeitenden, die aufgrund ihrer Persönlichkeit etwas zurückhaltender sind, besteht die Gefahr, dass deren Meinung in der Gruppendiskussion untergeht. Der Workshop eignet sich nach FELDBRÜGGE [232] besonders gut, um Mitarbeitende für das Vorhaben zu motivieren.

Fragebogen

Eine alternative Methodik zur Erfassung von Prozessen besteht in der Anwendung von Fragebögen zur Informationsgewinnung. Ähnlich wie beim Inter-

view bildet eine vordefinierte Fragestellung die Grundlage des Fragebogens. Diese Methode ermöglicht es, die gestellten Fragen gleichzeitig an mehrere Personen zu richten [233]. Insbesondere in Organisationen mit zahlreichen Mitarbeitenden werden in Fragebögen häufig geschlossene Fragen bevorzugt. Geschlossene Fragen erleichtern die spätere Auswertung der Antworten, erfordern jedoch möglicherweise eine Einschränkung der Antwortmöglichkeiten. Im Gegensatz dazu bedürfen offene Fragen bei der Analyse zwar zusätzlicher Ressourcen, schränken die Antworten jedoch nicht ein. Sie ermutigen die Befragten, ihre Erfahrungen selbst zu verbalisieren und den Grad der Differenzierung eigenständig zu bestimmen [233].

Dokumentenanalyse

Im Rahmen der Dokumentenanalyse werden elektronische und analoge Informationen und Daten geprüft und ausgewertet [234]. Die Methode liefert Einstiegsmöglichkeiten, den Prozess näher zu analysieren und liefert schnell viele Informationen, ohne in den täglichen Betriebsablauf einzugreifen. Die gewonnenen Ergebnisse müssen durch eine zweite Erhebungsmethode verifiziert werden.

Prozess-Mining

Eine Weiterentwicklung der Dokumentenanalyse stellt das Prozess-Mining dar. Hierbei werden aus Dokumenten und Ereignisprotokollen Prozessabläufe generiert [235]. Vorteil hierbei ist, dass direkt bei der Prozesserfassung genaue Informationen über Engpässe, Durchlaufzeiten und Anzahl des Auftretens einzelner Prozessschritte genau erfasst werden können [236].

Signifikanten Mehrwert bei der Anwendung bietet das Prozess-Mining beispielsweise in der Fertigung, im Supply-Chain-Management oder aber im Service. Unterstützenden Mehrwert bietet es in den Feldern Verwaltung, Beschaffung sowie im Finanz- und Rechnungswesen [237].

2.6.4 Prozessdokumentation

Nach oder während der Prozessaufnahme muss der Prozess zur Dokumentation und weiteren Analyse in ein Prozessmodell überführt werden. Hierzu stehen verschiedene allgemeine Modellierungsstrategien zur Verfügung, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden. Die Methoden zur Modellierung von Geschäftsprozessen können weiter unterteilt werden, wie Bild 17 zeigt. Liegt der Fokus auf dem Datenfluss zwischen den einzelnen Prozesselementen, so stehen datenflussorientierte Methoden zur Verfügung [225]. Hierbei stehen nicht die Prozesstätigkeiten im Fokus, weshalb diese

Methoden weniger im Prozessmanagement angewendet werden [238]. Dies wird durch kontrollflussorientierte Methoden sichergestellt, welche insbesondere die Abfolge von Tätigkeiten in den Fokus stellen [225]. Zusätzlich existieren verschiedene objektorientierte Methoden mit Anleihen aus der Softwareentwicklung sowie hybride Methoden, die Aspekte verschiedener Ansätze kombinieren.

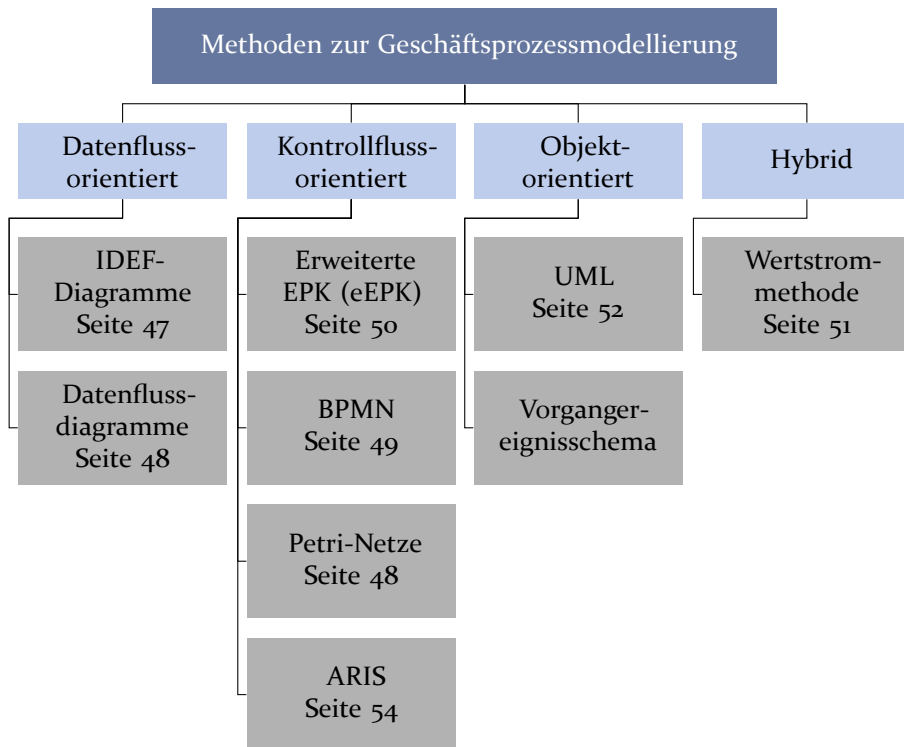


Bild 17: Überblick über die verfügbaren Prozessmodellierungsoptionen nach [P15]

Weiterhin existieren mindestens 23 Modellierungsansätze, die explizit für Produktentwicklungsprozesse konzeptioniert wurden [239]. Diese speziellen Methoden werden ebenfalls am Ende dieses Kapitels eingeführt. Die Auswahl des passenden Modells ist insbesondere abhängig vom Ziel der Analyse [240].

IDEF-Diagramme

Die Integrated-Definition-of-Function-Modelling (IDEF) Methodik ermöglicht die Beschreibung von Systemen, Prozessen und Daten in verschiedenen Organisationen [241]. Initial entwickelt vom US-Verteidigungsministerium finden die verschiedenen Varianten mittlerweile Anwendung in den Bereichen Ingenieurwesen, Softwareentwicklung, Geschäftsprozessmodellierung

sowie Systemanalyse [240]. Die IDEF Methodik teilt sich in verschiedene Teile¹² auf. Für die Modellierung von Geschäftsprozessen sind vornehmlich IDEFo und IDEF3 relevant [240].

Die IDEFo Methode ermöglicht die Modellierung von funktionalen Zusammenhängen und kann somit als Basis für die übrigen IDEF Teile gesehen werden. Der funktionale Zusammenhang besteht in der IDEFo-Definition aus Aktivitäten, die Eingaben nutzen, um auf Basis verschiedener Mechanismen unter Berücksichtigung von kontrollierenden Instanzen Ergebnisse zu generieren [242].

Um das zeitliche Verhalten von Prozessen und Systemen zu beschreiben, wurde die IDEF3-Notation entwickelt[243]. Weiterhin können mit IDEF3 Sequenzen, Zeitpläne und Zustände dargestellt werden [244]. Hierzu stehen Prozessfluss-Netzwerke und Objektzustandsübergangsnetze zur Verfügung [240].

Datenflussdiagramme

Das Datenflussdiagramm (DFD) repräsentiert eine strukturierte Methode für die Analyse und den Entwurf von Systemen [245]. Als visuelles Instrument dient es dazu, Logikmodelle zu veranschaulichen und den Datenfluss innerhalb eines Systems zu beschreiben. Das DFD bietet einen Mechanismus zur Modellierung von Datenflüssen und unterstützt die schrittweise Dekomposition, um detaillierte Einblicke in Datenflüsse und Funktionen zu ermöglichen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass das DFD keine Informationen über den Ablauf von Operationen darstellen kann und daher nicht als Methode für die Modellierung von Prozessen oder Verfahren betrachtet wird. Ein DFD weist mehrere charakteristische Merkmale auf:

- Es unterstützt die Analyse- und Anforderungsphase im Systementwurfprozess.
- Es verwendet eine Diagrammtechnik, die durch Anmerkungen ergänzt werden kann.
- Es beschreibt ein Netzwerk von Aktivitäten und Prozessen im Zielsystem.
- Es ermöglicht die Darstellung paralleler und asynchroner Verhaltensweisen.
- Es erlaubt eine schrittweise Verfeinerung durch die hierarchische Zerlegung von Prozessen.

Petri-Netze

Petri-Netze sind eine mathematische Modellierungssprache zur Darstellung von Systemen, insbesondere zur Modellierung von nebenläufigen, verteil-

¹² Diese sind IDEFo, IDEF1, IDEF1X, IDEF2, IDEF3, IDEF4 und IDEF5.

ten und parallelen Prozessen [246]. Zur Darstellung der mathematischen Hintergründe von Petri-Netzen sei auf weiterführende Literatur verwiesen [247, 248]. Im Kontext der Modellierung von Geschäftsprozessen wurden die Eigenschaften der Petri-Netze ebenfalls genutzt. Besonderer Vorteil dieser Methode ist die adäquate Beschreibung und Analyse von Kommunikation und Ressourcen zwischen Prozessen [240]. Da Petri-Netze bei komplexen Produktentwicklungsprozessen oftmals enorm groß und unhandlich werden [240] und verschiedene Sichten auf einen Geschäftsprozess nicht abgebildet werden können [242], werden diese nicht weiter ausgeführt. Dennoch existieren verschiedene Anwendungen aus dem Bereich der Produktentwicklung [249, 250].

Business Process Modelling Notation

Die Business Process Modelling Notation (BPMN) wurde 2004 von der Business Process Management Initiative (BPMI) veröffentlicht. Zentrales Ziel dieser Methode ist eine einfache und verständliche Notation sowohl für Mitarbeitende als auch für Modellierende und Entwickelnde zu entwickeln. Das resultierende Business-Process-Diagramm ist an der Swimlane-Methodik angelehnt [251]. Zur Modellierung der Prozesse stehen verschiedene Notationselemente zur Verfügung, die im Folgenden näher erläutert werden [225, 252].

Aktivitäten Eine Aktivität besteht aus einer einzelnen (siehe Bild 18a) oder mehreren (siehe Bild 18b) zusammengesetzten Aufgaben. Im Allgemeinen beschreibt eine Aktivität einen ausführbaren Vorgang, der durch das Unternehmen zur Zielerreichung genutzt wird.



(a) Aktivität (atomar)



(b) Aktivität (mit Unterprozessen)

Bild 18: BPMN-Notationselemente der Aktivitäten-Klasse

Ereignisse Während der Prozessdurchführung treten Ereignisse auf. Durch diese Ereignisse können Aktivitäten oder weitere Ereignisse ausgelöst werden. Zusätzlich können Ereignisse das Ergebnis einer Aktivität sein. Es wird zwischen den drei grundlegenden Ereignissen Start- (Bild 19a), Zwischen- (Bild 19b) und End-Ereignis (Bild 19c) unterschieden.



Bild 19: BPMN-Notationselemente der Ereignis-Klasse

Gateways Verschiedene Aktivitäten im Prozessablauf werden an Gateways synchronisiert. Diese Entscheidungspunkte beeinflussen den weiteren Verlauf des Prozesses und unterscheiden sich je nachdem, welche Bedingungen (XOR, OR, AND oder spezifische Ereignisse, siehe Abbildung 20) vorausgesetzt werden.

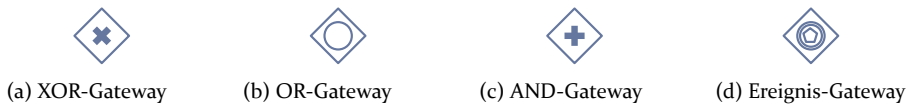


Bild 20: BPMN-Notationselemente der Gateway-Klasse

Verbindungselemente Durch Verbindungselemente wird angezeigt, dass Objekte in Beziehung zueinander stehen. Der Kontrollfluss (Bild 21a) beschreibt hierbei die zeitliche Abfolge im Prozess, während der Austausch von Nachrichten durch den Nachrichtenfluss (Bild 21b) dargestellt wird. Besteht lediglich eine Verbindung ohne zeitliche Komponente, so wird diese durch eine Verknüpfung (Bild 21c) angezeigt. Dies können unter anderem Inputs oder Outputs einer Aktivität sein.

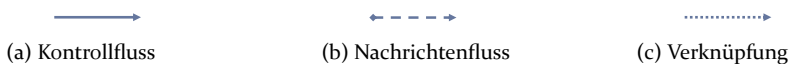


Bild 21: BPMN-Notationselemente der Verbindungselemente-Klasse

Artefakte Daten und Informationen sowie der Input und Output von Aktivitäten können über Artefakte, wie in Bild 22 gezeigt, symbolisiert werden.

Ereignisgesteuerte Prozessketten

Die von KELLER , NÜTTGENS und SCHEER entwickelte ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK) eignet sich aufgrund der einfachen Notation und der vollständigen Prozessdarstellung besonders für die Beschreibung von Geschäftsprozessen [233]. Die Basisnotation besteht aus den drei Objekttypen Funktion, Ereignis und Konnektor/Operator [225].

Funktion Funktionen beschreiben einen Transformationsprozess von Informationsobjekten, um die Unternehmensziele zu erreichen [225]. Als Funktion werden Aufgaben oder Tätigkeiten beschrieben, die im Rahmen des Prozesses automatisiert oder aktiv durch einen Menschen durchgeführt werden [233]. Jede Funktion endet in einem oder mehreren Ereignissen und wird durch ein oder mehrere Informationsobjekte sowie die eigentliche Tätigkeit definiert. Die Darstellung erfolgt durch das in Bild 23 dargestellte Symbol in Verbindung mit einer Beschreibung der Funktion im „Substantiv + Verb“ Stil (z. B. Rechnung stellen).

Ereignis Der Ausgangspunkt, um den Prozessablauf zu starten oder zu beenden, wird als Ereignis bezeichnet. Ein Prozess beginnt mit dem Start-Ereignis und schließt mit dem End-Ereignis ab. Ereignisse beschreiben weiterhin einen gewissen Zustand und können sowohl als Funktions-Input als auch als Funktions-Output eingesetzt werden [225]. Dargestellt werden Ereignisse wie in Bild 24 gezeigt. Zusätzlich erfolgt eine Beschreibung durch „Substantiv + Verb“ im Perfekt (z. B. Rechnung gestellt).

Konnektor Konnektoren (auch Operatoren genannt) gehören ebenfalls zu den Grundtypen der ereignisgesteuerten Prozessketten. Mit ihnen lassen sich der Ablauf und die Struktur der Prozesse darstellen. Eine Funktion kann hierbei von mehreren Ereignissen ausgelöst werden und auch in mehreren Ereignissen enden [225]. Die drei Operatoren in Bild 25 visualisieren den Zusammenhang zwischen Ereignissen und Funktionen.

Weitere Notationselemente Um industrielle Anwendungsfälle im nötigen Detailgrad darzustellen, reichen diese drei Notationselemente oftmals nicht aus. Angesichts dessen wurde die EPK um verschiedene Elemente zur erweiterten Ereignisgesteuerten Prozesskette (eEPK) erweitert. Diese sind unter anderem [225]:

- organisatorische Einheit (Personen, Rollen, Abteilungen, Unternehmen)
- Informationsobjekt (In- und Output)
- Anwendungssystem (IT-Unterstützung)
- Datenfluss (Nutzung, Veränderung und Erzeugung von Daten durch Funktionen)



Bild 22: BPMN-Notationselement der Artefakt-Klasse



Bild 23: EPK-Notationselement der Funktion-Klasse



Bild 24: EPK-Notationselement der Ereignis-Klasse

Wertstrommethode

Die Wertstrommethode oder Wertstromanalyse ist eine Methode aus dem Lean Management [253], die den aktuellen Prozess abbildet, wertschöpfende Aktivitäten und Schritte identifiziert und hilft, einen Aktionsplan zu erstellen, um einen verbesserten zukünftigen Zustand des Prozesses zu erreichen [254]. In der Produktentwicklung steht eine angepasste Version aus dem Aerospace-Bereich zur Verfügung [255]. Fokus bei der Wertstrommethode liegt traditionell auf der Analyse von Materialflüssen [256], im Zuge der Transformation zur Industrie 4.0 steht in den neuen Entwicklungen auch die Darstellung von Informationsflüssen innerhalb des Prozesses im Fokus [257].

Die Wertstrommethode erleichtert dabei die Ausrichtung der gesamten Organisation auf den Kundennutzen. Abbildung 26 zeigt die Notation der Wertstrommethode 4.0 nach MEUDT et al. [257]. Hierbei sind im unteren Bereich die sogenannten Swimlanes zu sehen, mit denen einzelne Informations- oder Materialartefakte symbolisiert werden. Zusätzlich wird durch Pfeile und die gezeigten Symbole zur Datenübertragung eine Datenkommunikation dargestellt.

Die Wertstrommethode selbst bietet wenig Möglichkeiten, den Prozess als solchen darzustellen, hierzu sind alternative Modellierungstechniken notwendig.



(a) UND-Verknüpfung



(b) ODER-Verknüpfung



(c) XODER-Verknüpfung

Bild 25: EPK-Notationselemente der Konnektor-Klasse

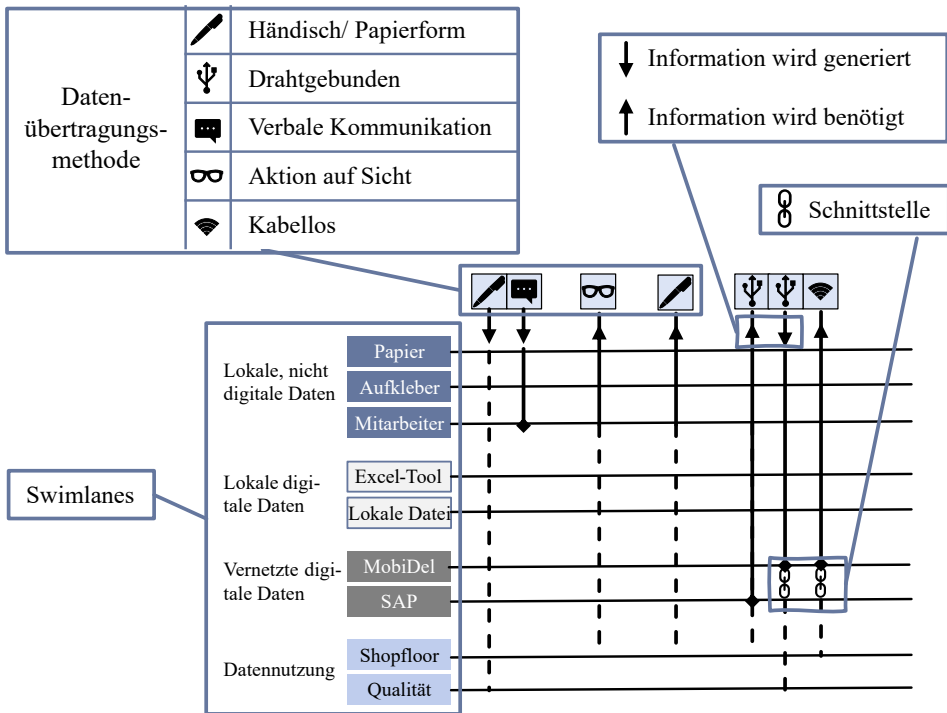


Bild 26: Darstellung der Wertstrommethode 4.0 nach [257]

UML-Diagramme

Die aus der objektorientierten Softwareentwicklung stammende Unified Modeling Language (UML) [258] stellt eine weitere Möglichkeit der Prozessdokumentation dar. Der Fokus liegt hierbei auf der grafischen Darstellung von Programmelementen. Gleichzeitig ist die Sprache aber auch für Beteiligte der klassischen Geschäftsprozessmodellierung verständlich. Dies ermöglicht demnach einen Lückenschluss zwischen den beiden Domänen. Die Methodologie der UML-Diagramme beinhaltet verschiedene Diagrammtypen [259]:

- Anwendungsfalldiagramm
- Klassendiagramm
- Zustandsdiagramm
- Sequenzdiagramm
- Aktivitätsdiagramm

Die Aktivitätsdiagramme fokussieren sich hierbei auf parallele Abläufe und eignen sich somit am besten für die Geschäftsprozessmodellierung [259], daher wird im Folgenden ausschließlich auf diesen Diagrammtyp eingegangen.

Der Aufbau der UML-Aktivitätsdiagramme ähnelt stark der BPMN-Notation aus Kapitel 2.6.4. Dies liegt daran, dass sich die BPMN aus der UML mit dem Zweck der Geschäftsprozessmodellierung entwickelt hat [259]. Daher werden die in den Bildern 18 bis 21c eingeführten Notationselemente hier nicht mehr separat eingeführt.

ARIS-Methode

Um die Komplexität von Geschäftsprozessen beherrschbar zu machen, wurde von SCHEER die Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS) [221] entwickelt. Das Modell reduziert die vorhandene Komplexität durch eine Zerlegung in unterschiedlichen Sichten. Dadurch entsteht das ARIS-Haus, wie in Bild 27 dargestellt. Die eigentliche Darstellung der Prozesse in der Prozesssicht erfolgt durch die in Kapitel 2.6.4 vorgestellten eEPK. Zusätzlich können Informationen zu Hierarchien in der Funktionssicht sowie Ressourcen in der Organisationssicht abgebildet werden. In der Datensicht sind alle Daten, sowohl digital als auch analog, erfasst, während die Leistungssicht alle Dienst-, Sach- und Finanzleistungen beinhaltet.



Bild 27: Sichten des Prozessmodells im ARIS-Haus nach [221]

Spezifische Modelle der Produktentwicklung

In Ergänzung zu den vorab vorgestellten Prozessmodellen existieren verschiedene Modelle, die speziell für die Produktentwicklung herangezogen werden. Hierzu existieren sowohl aktuelle als auch ältere Übersichtspaper zur Einordnung dieser Modelle [239, 260]. In Tabelle 2 werden die für diese Arbeit relevanten Modelle zusammengefasst.

Die dargestellten Modellierungsansätze fokussieren sich auf verschiedene Bereiche. Daher sind Kombinationen der Modelle ebenfalls möglich und

Tabelle 2: Übersicht spezifischer Prozessmodelle der Produktentwicklung

Bezeichnung	Hauptziel	Autor(en)
Design Structure Matrix (DSM)	Verbindungen zwischen In- und Outputs	[261]
Sequential iteration model	Sequenzierung und Zeitplanung	[262]
Iterative cycle time estimation	DSM mit Verzweigungen	[263]
Work transformation matrix method	Erfassung von Nacharbeiten	[264]
Activity module decomposition model	Bildung von ressourcenabhängigen Modulen	[250]
Queueing network model	Einfluss von Verzögerungen	[265]
PROSUS	Modellierung von Entwicklungswissen	[266]
Design history system (DHS)	Modellierung von technischem Wissen	[267]
PERT/ GERT/ Q-GERT	Interaktionen zwischen Aufgaben	[268]
Applied Signposting Model	Interaktion zwischen Aufgaben	[269]
Adaptive Test Process	Regeln zwischen Aufgaben	[270]
Mulitple Domain Matrix	Interaktionen zwischen verschiedenen Domänen	[271]
Virtual Design Team	Interaktion zwischen Aufgaben und Personen	[272]
Design Roadmap	Modellierung vieler Aufgaben inklusive Hierarchien	[273]
PADDME	Interaktion zwischen Prozess und Daten	[P15]

gebräuchlich [274]. Zur Einteilung dieser Vielzahl an Modellen haben WYNN & CLARKSON [239] ein Framework entwickelt, das den Zweck und den Typ der Modelle erfasst. Dieses Framework ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Es gibt verschiedene Dimensionen, die berücksichtigt werden müssen: das

Mikro-Level, das sich auf einzelne Prozessschritte konzentriert, das Meso-Level, das den gesamten Ablauf der Aufgaben betrachtet, und das Makro-Level, das den Kontext der Entwicklung oder die Projektstruktur betrachtet. Innerhalb dieser Dimensionen werden verschiedene Modelltypen identifiziert, wie Ablaufmodelle, die bewährte Lösungen empfehlen, Analysemodelle, die bestimmte Situationen modellieren, um den Prozess zu optimieren, abstrakte Modelle, die konzeptionelle Erkenntnisse zum Entwicklungsprozess liefern, und MS/OR, das Erkenntnisse durch mathematische Analyse generiert.

Tabelle 3: Framework zur Organisation von Design-Prozessmodellen nach [239]

Dimension	Kategorie	Erklärung
Bereich	Micro-Level	Fokus auf einzelne Prozessschritte
	Meso-Level	Fokus auf den durchgängigen Ablauf der Aufgaben
	Makro-Level	Fokus auf der Projektstruktur oder dem Kontext der Entwicklung
Modelltyp	Ablaufmodell	Empfehlungen für bewährte Lösungen
	Analysemodell	Modellierung bestimmter Situationen zur Prozessoptimierung
	Abstrakte Modelle	Konzeptionelle Erkenntnisse für den Entwicklungsprozess
	MS/OR	Erkenntnisse durch mathematische Analyse

Neben diesem allgemeinen Framework existiert ein weiterer Ansatz zur Kategorisierung der Modelle für die Produktentwicklung. Dieser teilt verfügbare Modelle in vier Hauptkategorien ein [275-277]:

- **Prozessvisualisierung:** Anzeige von Aktionen, Interaktionen und Verpflichtungen in aktuellen oder vergangenen Prozessen. Dieser Modelltyp wird beispielsweise als Diskussionsgrundlage verwendet.
- **Prozessplanung:** Identifizieren von zu erledigenden Tätigkeiten und zur Strukturierung von Prozessen. Weiterhin können mit diesen Prozessmodellen Unsicherheiten und Risiken identifiziert und Ressourcen zugeordnet werden.
- **Prozesscontrolling:** Monitoring des Ist-Zustandes und dynamische Umplanung der aktuellen (Live-) Prozesse.

- **Prozessentwicklung:** Verbesserung aktueller Prozesse mit gekoppeltem Wissensmanagement.

Zu diesen Kategorien von Prozessmodellen kann eine weitere Dimension des Verwendungszwecks hinzugefügt werden [278]:

- **Aufnahmepläne:** Aufnahme, eines existierenden Prozesses im Ist-Zustand.
- **Beschreibende-Pläne:** Spezifische Pläne, die vorgeben, wie Prozesse durchgeführt werden sollen.
- **Ziel- und Monitoring-Pläne:** Kommunikation des aktuellen Prozesstandes und der Terminierung von Meilensteinen.

Eine Herausforderung bei der Modellierung von Produktentwicklungsprozessen ist die Auswahl der richtigen Modellierungsmethode. Hierzu haben TRAUER et al. [274] Kriterien vorgestellt, die bei der Auswahl unterstützen. Die entwickelten Kriterien sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

2.6.5 Prozessbewertung und Analyse

Nach der Erfassung von Geschäftsprozessen folgt in den meisten Optimierungsmethoden die Bewertung dieser Prozesse. Zentrales Ziel der Prozessbewertung ist die Erfassung von Leistungen und Fähigkeiten, um Abweichungen zwischen geplantem und tatsächlichem Zustand feststellen zu können [279]. Die Prozesse können hierbei sowohl qualitativ als auch quantitativ bewertet werden, wie in Bild 28 dargestellt. Bei der qualitativen Prozessanalyse wird die Prozessfähigkeit und bestimmte Prozessmerkmale abgefragt, während mit der quantitativen Bewertung die Prozessleistung gemessen wird.

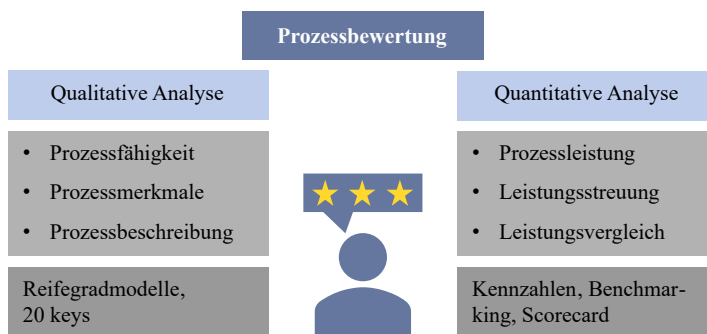


Bild 28: Qualitative und quantitative Prozessbewertung

Tabelle 4: Kriterien zur Auswahl von Prozessmodellierungsansätzen nach [274]

Kriterium	Beschreibung
Konnektivität	Wie leicht können zusätzliche Elemente eingebunden werden?
Erfassungsbereich	Welche unterschiedlichen Elemente können abgebildet werden?
Aufwand	Wie viel Zeit und Geld muss zur Nutzung investiert werden?
Ausführbarkeit	Wie einfach kann die Methode automatisiert werden?
Flexibilität	Wie effektiv werden bestehende Prozessmodelle erweitert und bestehende Teile wiederverwendet?
Integrierbarkeit	Wie einfach können zusätzliche Tools oder Methoden integriert werden?
Verknüpfbarkeit mit der Datenbasis	Wie gut lassen sich Datenbasen verlinken?
Skalierbarkeit	Wie groß und komplex kann ein Prozess werden, um noch sinnvoll modellierbar zu sein?
Zeitlichkeit	Können temporäre Verknüpfungen abgebildet werden?
Verifizierung/ Validierung	Wie eindeutig kann ein bestimmter Prozess abgebildet werden?
Vielseitigkeit	Wie gut kann sich die Methode an verschiedene Zielstellungen und Zwecke anpassen?
Viskosität	Wie viel Aufwand ist nötig um Änderungen einzubringen?

Qualitative Bewertung

Ein Management-Framework ist eine Sammlung struktureller Elemente oder Einheiten, die eine (theoretische) Grundlage für den Managementprozess schaffen [280]. Diese Frameworks unterstützen dabei das Verständnis eines Wissensgebietes durch die Bereitstellung von Prinzipien, Struktur und Ziele [281]. Das Capability-Maturity-Model wurde vor mehr als 25 Jahren vom Software-Engineering-Institut entwickelt [282]. Dieses Modell war der Auslöser für die Erforschung der Reifegradmodelle in verschiedenen Bereichen wie

Informationssysteme [283], Wissensmanagement [284] und Geschäftsprozessmanagement [285]. Reifegradmodelle ermöglichen die Bewertung der aktuellen Situation eines Unternehmens sowie die Identifizierung sinnvoller Verbesserungsmaßnahmen [283] und dienen als Leitfaden für die Transformation [286].

Die Einordnung von Geschäftsprozessen in Reifegradmodelle stellt eine der bekanntesten Methoden der qualitativen Analyse dar. Durch die Zuweisung zu vordefinierten Stufen lässt sich der Reifegrad eines Unternehmens bestimmen, was wiederum die Ableitung von Optimierungsansätzen und Handlungsempfehlungen ermöglicht. Diese Art der qualitativen Analyse erstreckt sich über verschiedene Bereiche der Betriebswirtschaftslehre, beispielsweise im Kontext des situativen Führens nach HERSEY [287] oder zur Darstellung des Fortschritts in der digitalen Transformation. Reifegradmodelle beruhen in der Regel auf einer Kombination aus qualitativen und quantitativen Analysen, die Ziele, Prozesskennzahlen, Rollen und Verantwortlichkeiten erfassen können. Somit integrieren sie häufig Aspekte sowohl der qualitativen als auch der quantitativen Prozessanalyse. Bekannte Reifegradmodelle sind das 20-keys-System von KOBAYASHI [288] zur Bewertung des Einführungsstandes von Lean Production oder das European-Foundation-for-Quality-Management (EFQM)-Modell zur Prozessbewertung auf Basis der Total-Quality-Management-Bewegung [289]. Diese Reifegradmodelle bilden jedoch nicht die Besonderheiten der digitalen Transformation von Prozessen und der Produktentwicklung ab. Hierzu gibt es ebenfalls spezialisierte Reifegradmodelle, die entweder den Entwicklungsstand des Unternehmens als solchen oder speziell den Stand der Prozesse erfassen. Diese speziell für digitale Prozesse entwickelten Reifegradmodelle sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

PÖPPELBUSS und RÖGLINGER [290] beschreiben drei anwendungsspezifische Verwendungszwecke für ein Reifegradmodellmodell: deskriptiv, präskriptiv und vergleichend. Bei deskriptiven Bewertungsmodellen stehen die aktuellen Fähigkeiten der zu untersuchenden Entität im Hinblick auf bestimmte Kriterien im Vordergrund [283]. In diesem Fall wird das Modell hauptsächlich als diagnostisches Werkzeug verwendet. Präskriptive Modelle ermitteln, wie man bestimmte Reifestufen erreichen kann und definieren Maßnahmen, wie der aktuelle Zustand verbessert werden kann [283]. Vergleichende Modelle haben zum Ziel, die Leistung verschiedener Individuen auf der Grundlage ausreichender historischer Daten zu vergleichen [291].

Tabelle 5: Reifegradmodelle für digitale Prozesse (nach [292], erweitert)

Autoren	Jahr	Titel
<i>Deskriptive Modelle</i>		
BLATZ et al. [293]	2018	Maturity Model of digitalization for SMEs
GROSSMAN [294]	2018	A Framework for evaluation the analytic maturity of an organization
MORAIS et al. [295]	2011	Electronic business maturity in Portuguese SME and large enterprises
CATLIN et al. [296]	2015	Raising your digital quotient
NORTH et al. [292]	2019	DIGROW - Framework
HÖLZLE et al. [297]	2019	IME Reifegradmodell
BRITZE et al. [298]	2020	Reifegradmodell digitale Geschäftsprozesse
<i>Präskriptive Modelle</i>		
WIESNER et al. [299]	2018	Maturity models for digitalization in manufacturing – applicability for SMEs
MITTAL et al. [300]	2018	Towards a smart manufacturing maturity model for SMEs (SM ₃ E)
THRUNG PHAM [301]	2010	Measuring the ICT maturity of SMEs
RUBEL et al. [302]	2018	A maturity model for business model management in Industry 4.0
ADAMIK und NOWICKI [303]	2018	Preparedness of companies for digital transformation [...]
VALDEZ-DE-LEON [286]	2016	A digital maturity model for telecomm service providers
Warwick Manufacturing Group [304]	2017	An Industry 4.0 readiness assessment tool
EVANS [305]	2017	Mastering digital business
APPELFELLER und FELDMANN [306]	2018	Zehn Elemente des digitalen Unternehmens
GERSCHÜTZ et al. [P15]	2023	PADDME-Framework

Autoren	Jahr	Titel
<i>Vergleichende Modelle</i>		
LICHTBLAU et al. [307]	2015	Industry 4.0 readiness report
REMANE et al. [308]	2017	Digital maturity in traditional industries: an exploratory analysis
WESTERMANN et al. [309]	2012	The advantages of digital maturity
BAIN and Company [310]	2016	The path to digital maturity

Quantitative Bewertung

Quantitative Prozessbewertungsmethoden verwenden vorhandene Daten, um die Leistung eines Prozesses zu messen. Diese Methode ist besser nachzuvollziehen, da hier „greifbare“ Kennzahlen zur Bewertung verwendet werden. Die quantitative Prozessanalyse ist außerdem ein wichtiges Hilfsmittel, um qualitative Betrachtungen zu plausibilisieren [226]. Verfügbare Prozessanalyseverfahren lassen sich nach verschiedenen Merkmalen einteilen, wie Tabelle 6 zeigt.

Tabelle 6: Einteilung quantitativer Prozessanalyseverfahren nach [226]

Merkmal	Ausprägung		
Zeitliche Perspektive	Ex-Ante	Echtzeit	Ex-post
Prozessstruktur	bekannt	unbekannt	
Analysetechnik	statisch	dynamisch	hybrid
Prozessumfeld	betrachtet	nicht betrachtet	

Die zeitliche Perspektive bei der Prozessanalyse bestimmt den Zeitpunkt der Analyse. Die „Ex-Ante“-Perspektive beinhaltet eine hypothetische Analyse vor der Durchführung, während die Echtzeit-Analyse während der Ausführung stattfindet. Eine Analyse nach der Prozessausführung wird als „Ex-Post“-Analyse bezeichnet. Der Ablauf von Prozessschritten wird in einer Prozessstruktur festgehalten. Bei bekannter Struktur kann der Prozessablauf mithilfe von Modellen dargestellt werden, während bei unbekannter Struktur keine konkrete Umschreibung vorliegt. Die Prozessauswertung erfolgt mithilfe von Analysetechniken wie statischer, dynamischer und hybrider Auswertung. Statische Auswertung nutzt vorhandene Daten im Prozess und der Umgebung,

während die dynamische Analyse die logische Prozessstruktur betrachtet, z. B. für Durchlaufzeiten. Die hybride Auswertung kombiniert statische und dynamische Analyse. Das vierte Merkmal betrifft das Prozessumfeld. Bei unternehmensübergreifenden Prozessen sind alle involvierten Akteure relevant, während bei nicht untersuchtem Prozessumfeld nur die im Modell enthaltenen Daten entscheidend sind.

Betriebswirtschaftliche Sicht Eine erfolgreiche Optimierung von Projekten und Prozessen mit dem Ziel der Kostensenkung bildet die Basis der meisten Entscheidungsprozesse aus betriebswirtschaftlicher Sicht [226]. Eine Prozessbewertung aus betriebswirtschaftlicher Sicht kann anhand verschiedener Methoden, wie der Nutzwertanalyse, dem Return of Investment (ROI) oder der Break-Even-Analyse durchgeführt werden.

Die Nutzwertanalyse, auch als Punktebewertungsmodell bekannt, wird als Entscheidungshilfe für qualitative Beiträge eingesetzt, wobei die Prozessqualität ein Beispiel für einen solchen Beitrag darstellt [311]. In diesem Ansatz werden Entscheidungsalternativen anhand verschiedener, vorwiegend qualitativer Kriterien bewertet. Das Ergebnis der Bewertung liefert eine geordnete Liste bevorzugter Lösungen, wobei die höchstbewertete Alternative als bevorzugte Lösung gilt [312].

Neben der Nutzenbewertung ist auch eine monetäre Bewertung von Prozessen entscheidend. Kosteneinsparpotenziale ermöglichen eine monetäre Prozessbewertung, indem potenzielle Kostenvorteile abgeschätzt werden. Eine gängige Methode ist die Bewertung vermuteter Zeiteinsparungen im Vergleich zu den Kosten der freigesetzten Ressourcen. Hierbei werden Prozessausführungszeiten, Frequenz und Ressourcenkosten grob geschätzt [306, 312].

Der Return on Investment (ROI) ist eine Kennzahl, die die Rentabilität einer Investition misst. Es handelt sich um eine prozentuale Angabe, die das Verhältnis zwischen dem Gewinn oder Verlust einer Investition und den damit verbundenen Kosten oder Ausgaben darstellt. In diesem Fall deutet eine hohe ROI-Zahl auf eine positive Prozessperformanz und somit auf eine gewinnbringende finanzielle Entwicklung hin [313]. Demzufolge kann der ROI mit dem Quotienten aus dem generierten (erhöhten) Gewinn G und dem gesamten investierten Kapital K berechnet werden [314]:

$$ROI = \frac{G}{K} \cdot 100 \quad (11)$$

Zur Ermittlung, ab wann sich die Prozesskosten (welche die Produktentwicklungskosten beinhalten) mit den generierten Umsätzen decken, wird eine Break-Even-Analyse verwendet. Durch eine Bewertung der Rentabilität und der Zeit, die eine Investition benötigt, um den Break-Even-Point (BEP) zu erreichen, können Rückschlüsse auf notwendige Absatzzahlen gezogen werden. Mit diesem Maß lässt sich so die Rentabilität eines neuen Produkts feststellen. Dennoch kann es auch als Hilfestellung zur Prozessverbesserung herangezogen werden. [312, 315]. Der BEP kann berechnet werden als der Quotient der Fixkosten K_f und dem erzielbaren Gewinn pro verkaufter Einheit. Dieser ermittelt sich als Differenz zwischen dem Preis pro Einheit p_v und den variablen Kosten k_v :

$$BEP = \frac{K_f}{p_v - k_v} \quad (12)$$

Dabei umfassen Fixkosten alle Kosten, welche nicht von kurzfristigen Veränderungen beeinflusst werden, etwa Gehälter oder Mieten. Variable Kosten hingegen beinhalten alle Kosten, welche sich an die kurzfristigen Veränderungen anpassen, insbesondere Kosten der Rohstoffe oder des Energieverbrauchs.

Prozesskennzahlen Die Prozesskennzahlen (KPI – engl. Key-Performance-Indicator) stellen Messgrößen dar, die zur Darstellung der Prozessleistung in Bezug auf eine Zielgröße (z. B. Inhalt, Zeit, Kosten und Umfang) herangezogen werden. Prozesskennzahlen können sowohl zur Bewertung als auch zur Steuerung von Prozessen genutzt werden. Bild 29 stellt Zielgrößen und deren Prozesskennzahlen innerhalb eines Produktentwicklungsprozesses grafisch dar.

Kennzahlensysteme Einzelne Kennzahlen können zwar dazu beitragen, die Performance für ein definiertes Ziel zu verbessern, könnten jedoch gleichzeitig andere Kennzahlen negativ beeinflussen. Die Nutzung von Kennzahlensystemen ermöglicht die Herstellung von Interdependenzen zwischen den einzelnen Kennzahlen und schafft somit eine umfassende Übersicht. Um einzelne Kennzahlen in einen logischen Zusammenhang zu bringen, müssen Kennzahlensysteme bestimmte grundlegende Anforderungen erfüllen [225, 279]:

- Konsistente Beschreibungen durch einen geeigneten Strukturaufbau der Kennzahlen.
- Unternehmensweite Anwendbarkeit durch einen klaren und einfachen Aufbau.
- Staffelung der Kennzahlen nach Managementebenen mit der Möglichkeit einer Top-Down- oder Bottom-Up-Analyse.

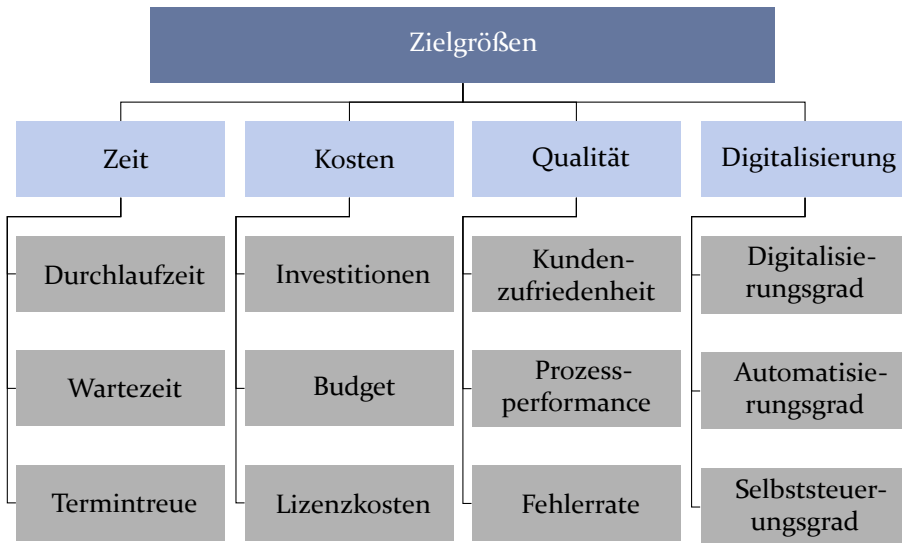


Bild 29: Zielgrößen und dere KPIs nach [222, 316]

- Strukturierung der Hauptkennzahlen auf unteren Ebenen, um unter anderem die IT-Kosten des Unternehmens durch verschiedene Kostenpositionen der unteren Ebenen zu erklären.

Die Verwendung von Kennzahlensystemen bietet zahlreiche Vorteile, darunter die Darstellung und Verarbeitung von Kennzahlen, transparentes Aufzeigen komplexer Interdependenzen, Erstellung unterschiedlicher Vergleiche sowie die Beobachtung von Trends und die Bewertung der Leistungsentwicklung innerhalb eines Unternehmens(-prozesses). Kennzahlensysteme ermöglichen auch den Vergleich zwischen Ist- und Sollzustand oder Vorher- und Nachher-Vergleiche, wodurch die Zielerreichung verfolgt und überprüft werden kann. Insgesamt dienen Kennzahlen als nützliches Instrument für die umfassende Planung, Steuerung und Kontrolle, wodurch Entscheidungen beschleunigt, vereinfacht und sicher getroffen werden können [279]. Zu den bekanntesten Kennzahlensystemen gehören das DuPont-System [317] sowie die Balanced Scorecard [318].

2.6.6 Zwischenfazit zu Prozessmanagement im Kontext des Digital-Engineering

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Hintergründe und Grundlagen zum Geschäftsprozessmanagement dargelegt. Hierzu erfolgte eine Vorstellung von übergeordneten Methoden, Möglichkeiten der Prozessaufnahme und Dokumentation sowie Bewertungsmetriken. Obgleich eine Vielzahl

spezifischer Prozessmodelle der Produktentwicklung zur Verfügung stehen, wie in Kapitel 2.6.4 dargestellt, eignen sich nur wenige für eine zielgerichtete Analyse der Prozesse im Hinblick auf datengetriebene Methoden, was insbesondere an dem hohen Abstraktionsgrad dieser Methoden liegt [319]. Dadurch fehlen Daten und Informationen, die einen kritischen Faktor datengetriebener Methoden darstellen. Ebenso bieten die bestehenden Prozessmodellierungssprachen die Möglichkeit, Prozessabläufe, z. B. in BPMN oder eEPK, sowie Ressourcen und Daten, z. B. in der Wertstrommethode, abzubilden; es fehlt aber eine einfache Möglichkeit, Daten und Prozesse in einer gesamten Darstellung zu verknüpfen. ARIS bietet diese Möglichkeit ebenfalls nicht, da durch die getrennten Sichten keine Gesamtdarstellung erfolgt, die jedoch kritisch für die Analyse im Hinblick auf datengetriebene Methoden ist. Weiterhin existieren Bewertungsframeworks für Prozesse, allerdings findet sich auch hier kein ganzheitlicher Ansatz, der eine Bewertung unter den Maßstäben einer Anwendungsfallidentifikation datengetriebener Methoden zulässt.

3 Forschungsbedarf

Wenn deine Geschäftsmodelle von gestern noch funktionieren,
dann hast du ein Problem.

Reid Hoffman, Mitgründer von LinkedIn

Das vorangegangene Kapitel dieser Arbeit widmete sich den wissenschaftlichen Grundlagen, die für die weitere Arbeit notwendig sind. Hierbei wurde der aktuelle Stand von Forschung und Technik der relevanten Themenbereiche dargelegt. Ziel dieses Kapitels ist es, nicht nur die bereits erzielten Fortschritte zu würdigen, sondern in Abschnitt 3.1 insbesondere auch kritisch zu hinterfragen, welche Fragen und Herausforderungen bisher unbeantwortet oder ungelöst geblieben sind. Die Formulierung der wissenschaftlichen Zielsetzung und Forschungsfragen dieser Arbeit in Abschnitt 3.2 soll dabei helfen, die vorhandenen Defizite gezielt anzugehen und somit einen Beitrag zur weiteren Entwicklung dieses Forschungsfeldes zu leisten. Abschließend erfolgt die Darstellung des weiteren Vorgehens (Abschnitt 3.3).

3.1 Fazit zum Stand der Forschung

In Kapitel 2 wurden die wissenschaftlichen Grundlagen dieser Arbeit dargestellt und die aktuelle Forschungslandschaft analysiert. Zu Beginn wurde in Kapitel 2.2 der aktuelle Stand der Produktentwicklung diskutiert, die virtuelle Produktentwicklung vom Digital-Engineering abgegrenzt, Rollen und Tools der Produktentwicklung evaluiert und die Grundlagen des KBE eingeführt. Hierbei zeigte sich, dass sich die Rolle der Produktentwickler zukünftig grundlegend ändern wird und vermehrt Kompetenzen aus den Datenwissenschaften benötigt werden. Nicht umsonst bezeichnen DAVENPORT und PATIL den Data Scientist als „sexiest Job of the 21st Century“ [320]. Die aktuelle Tool-Landschaft in der Produktentwicklung ist vielfältig, mit einer breiten Palette von Softwareprodukten, die von Nischen-Tools bis zu großen Software-Suiten reichen [321]. Diese Werkzeuge werden zur Unterstützung der Entscheidungsfindung, der Datenverarbeitung und der Projektumsetzung eingesetzt [322] und sind insbesondere in der Automobilindustrie von wesentlicher Bedeutung für den Designzyklus [323]. Ihre Verwendung erfolgt jedoch häufig implizit, und es besteht Bedarf an einem strukturierten Ansatz für ihre Auswahl und Anwendung [324].

Im darauffolgenden Kapitel 2.4 erfolgte eine Evaluation der aktuellen Möglichkeiten und Grundlagen datengetriebener Methoden aus dem Bereich Data-Mining und maschinellem Lernen. Es wurde festgestellt, dass viele datengetriebene Methoden, Algorithmen und Tools vorhanden sind (vgl. Abschnitt 2.4.2, 2.4.4 und 2.4.6), weiterhin sind bei identifizierten Anwendungsfällen Methoden zur Implementierung datengetriebener Methoden vorhanden. Bei der Vielzahl an Methoden, Vorgehensmodellen und bereits vorhandenen Use Cases (vgl. Abschnitt 2.4.6) stellt sich die Frage, warum sich Unternehmen, und hier insbesondere KMU, die Einführung von datengetriebenen Methoden scheuen. Die aktuell geringe Verbreitung dieser Lösungen in der Industrie wird nach Ansicht des Autors vornehmlich auf eine fehlende Unterstützung bei der Identifikation von Anwendungsfällen datengetriebener Methoden zurückgeführt. Die bestehenden Vorgehensmodelle zur Realisierung datengetriebener Projekte setzen an dem Punkt an, wenn bereits ein vielversprechender Anwendungsfall im Prozess identifiziert wurde. Es fehlen jedoch Methoden, die Unternehmen bei der systematischen Identifikation solcher Anwendungsfälle unterstützen. Weiterhin muss eine Auswahl der Methoden aus Kapitel 2.4.2 und eine Identifikation passender Algorithmen im Hinblick auf den Anwendungsfall durchgeführt werden, wozu enormes Fachwissen nötig ist. Ein weiterer hemmender Aspekt ist die Tatsache, dass KI-Lösungen immer spezialisierte Lösungen sind, die auf einen bestimmten Aufgabentyp angepasst und nicht „out-of-the-box“ verfügbar sind [325]. Bei dieser Anpassung der Methoden unterstützen die bestehenden Integrationsmethoden ebenfalls kaum, da diese zu allgemein und rudimentär ausgeführt sind. Die Herausforderung ist, dass die Methoden, Algorithmen und Tools bereits fertig implementiert zur Verfügung stehen und somit nicht direkt angepasst werden können. Daher müssen diese starren Methoden durch passende Schnittstellen in die hoch spezialisierte Tool-Landschaft der Produktentwicklung integriert werden.

Im Bereich des Prozessmanagements (Kapitel 2.6) wurden Methoden der Prozessoptimierung (Abschnitt 2.6.2) und Prozessmodellierung (Abschnitt 2.6.4) eingeführt. Darauf aufbauend erfolgte eine Analyse von Möglichkeiten der Prozessanalyse in Bezug auf datengetriebene Methoden in Abschnitt 2.6.5. Die hier zur Verfügung stehenden Methoden lassen eine Analyse der Produktentwicklung in adäquater Form nicht zu, was insbesondere an den Besonderheiten des Produktentwicklungsprozesses aus Abschnitt 2.2.5 liegt [45]. In bestehenden Prozessmodellen sind beispielsweise verteilte Informationen nicht berücksichtigt, was die Analyse verfügbarer Daten erschwert. Weiterhin fehlt die für datengetriebene Methoden so wichtige korrekte Abbildung von IT-Systemen und Daten aus dem realen Prozess [45]. Im Kontext der Prozessanalyse stehen zwar umfangreiche Frameworks

und Modelle zur Verfügung, allerdings sind diese nicht direkt dazu geeignet, einen Prozess im Hinblick auf die Anwendbarkeit datengetriebener Methoden zu bewerten und so mögliche Anwendungsfälle, Schwachstellen und Optimierungspotentiale zu identifizieren. Daher ist aktuell auch keine direkte Verknüpfung der beiden Problemfelder Prozessmanagement und datengetriebene Methoden vorhanden.

Eine Möglichkeit, diese Verknüpfung zu schaffen, stellen die in Abschnitt 2.3 vorgestellten Ontologien dar. Hier gibt es sowohl Ontologien aus dem Bereich des Prozessmanagements, wie die PROV-Ontologie [101] und auch mehrere Ontologien aus dem Bereich der Produktentwicklung und datengetriebener Methoden [P10, 96–98, 100, 326–328]. Leider sind sie nicht ausreichend miteinander verbunden, um die abgegrenzten Bereiche zu verknüpfen. Diese Verknüpfung ist jedoch erforderlich, um die Identifikation geeigneter datengetriebener Methoden für eine bestimmte Aufgabe im datengetriebenen Produktentwicklungsprozess zu unterstützen.

Insgesamt besteht also ein Bedarf an verbesserten Methoden zur Identifikation von Anwendungsfällen [211], flexibleren Einführungsstrategien und einer Ontologie, um datengetriebene Methoden mit der Prozessanalyse zu verknüpfen, um diese zielgerichtet und effizient auszuwählen [329]. Dies könnte Unternehmen, insbesondere KMU, helfen, die Potenziale datengetriebener Methoden effektiver zu nutzen und Innovationen in der Produktentwicklung voranzutreiben.

3.2 Zielsetzung der Arbeit und wissenschaftliche Fragestellungen

Die Zielsetzung der Arbeit ergibt sich aus der übergeordneten Problemstellung und dem aktuellen Stand der Technik, der im vorangegangenen Abschnitt diskutiert wurde.

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, dass Unternehmen bislang keine systematische Identifizierung von Anwendungsfällen für datengetriebene Methoden durchführen. Insbesondere kleine Unternehmen haben Schwierigkeiten, geeignete Einsatzbereiche zu finden. Daher soll eine neue Methode Unternehmen gezielt dabei unterstützen, Anwendungsfälle für datengetriebene Methoden zu identifizieren und auszuwählen. Dies soll dazu beitragen, die bisherige Zurückhaltung bei der Implementierung zu überwinden. Ein weiteres Problem liegt in der Auswahl und Anpassung der datengetriebenen Methoden, da es eine Vielzahl verschiedener Möglichkeiten und Algorithmen gibt, die eine präzise Auswahl erfordern. Außerdem müssen diese an die spezifischen Anforderungen des Produktentwicklungsprozesses angepasst werden.

Daher sollen Methoden entwickelt werden, die eine effiziente Auswahl und Integration der geeigneten Algorithmen ermöglichen und gleichzeitig den spezifischen Anforderungen gerecht werden. Die Schwierigkeiten bei der Messung der Verbesserung der Entwicklungsprozesse durch datengetriebene Methoden müssen durch geeignete Evaluationsmethoden überwunden werden. Dabei müssen sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien berücksichtigt werden, um ein umfassendes Bild der Effektivität und Effizienz der Methoden zu erhalten. Es sollen Evaluationskriterien entwickelt werden, die eine umfassende Bewertung der Effektivität und Effizienz von datengetriebenen Methoden ermöglichen. Des Weiteren stellt die fehlende Verknüpfung von Prozessmanagement und datengetriebenen Methoden eine grundlegende Herausforderung dar. Durch die Weiterentwicklung und Verknüpfung existierender Ontologien soll die Integration von datengetriebenen Methoden in die Prozessanalyse ermöglicht werden. Zudem sollen flexible Einführungsstrategien entwickelt werden, um bestehende Lücken zu schließen.

Die zentrale Zielsetzung besteht in der Entwicklung einer Methode, die es ermöglicht, die bisher ungenutzten Potenziale datengetriebener Methoden, speziell aus dem Bereich des Data Minings und Machine Learning, in der Produktentwicklung zu erschließen. Eine Herausforderung besteht darin, die sich wandelnde Rolle der Produktentwickler zu adressieren, der zunehmend auf Kompetenzen aus den Datenwissenschaften angewiesen ist [320]. Die Methode soll daher nicht nur die Anwendung datengetriebener Methoden erleichtern, sondern auch den Prozess der Identifikation passender Anwendungsfälle in bestehenden Produktentwicklungsprozessen unterstützen.

Aus den genannten Punkten lässt sich die zentrale wissenschaftliche Zielsetzung dieser Arbeit ableiten:

Zentrale wissenschaftliche Zielsetzung

Entwicklung einer Methode zur Integration datengetriebener Methoden in den Produktentwicklungsprozess mit Fokus auf die Unterstützung von Unternehmen, insbesondere KMU, um die Potenziale datengetriebener Methoden nutzbar zu machen.

Dieses Forschungsziel wird in Übereinstimmung mit den oben genannten Unterzielen in die folgenden drei Forschungsfragen überführt.

1. Welche Schritte sind nötig, um Data-Mining und Machine-Learning Methoden in bestehende Prozesse des technisch-mechanischen Entwickelns zu integrieren?

2. Wie lassen sich Anwendungsfälle für datengetriebene Methoden, insbesondere aus dem Bereich Data-Mining und Machine Learning, in bestehenden Produktentwicklungsprozessen identifizieren?
3. Wie lassen sich auf Basis der vorliegenden Randbedingungen im identifizierten Anwendungsfall der Produktentwicklung passende datengetriebene Methoden aus dem Bereich Data-Mining und Machine Learning auswählen, um die Arbeitsschritte zu unterstützen?

3.3 Weiteres Vorgehen im Rahmen der Arbeit

Um Anwendungsfälle datengetriebener Methoden zu identifizieren und die Integration in die Produktentwicklung zu fördern, widmen sich die Kapitel 4 bis 7 den beschriebenen Forschungsfragen und Zielen. Im nachfolgenden Kapitel 4 erfolgt die Einführung des Anwendungskontextes zur Integration datengetriebener Methoden sowie die Analyse von Hemmnissen der Methodenintegration im Rahmen einer Industriestudie. Aufbauend auf den Rahmenbedingungen erfolgt die Entwicklung einer Methode zur Integration datengetriebener Methoden in die Produktentwicklung in Kapitel 5. Innerhalb dieses Kapitels wird die Gesamtmethode vorgestellt (siehe Abschnitt 5.1), ein „Reifegradmodell Digital Engineering“ eingeführt (siehe Abschnitt 5.3) sowie eine Ontologie zur Verknüpfung der Domänen der Künstlichen Intelligenz mit der Produktentwicklung entwickelt (siehe Abschnitt 5.2). Die Darstellung der Praxisrelevanz und Funktionsfähigkeit der entwickelten Methode wird in Kapitel 6 im Rahmen von zwei industriellen Anwendungsfällen überprüft. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 7 und die Beantwortung der Forschungsfragen in Kapitel 8.

4 Analyse der Ausgangssituation

Ich glaube, künstliche Intelligenz wird unser Partner sein.
Wenn wir sie missbrauchen, wird sie ein Risiko sein. Wenn wir
sie richtig einsetzen, kann sie unser Partner sein.

Masayoshi Son, CEO SoftBank Capital

Ziel des folgenden Kapitels ist es, die Ausgangssituation dieser Arbeit darzustellen und den Anwendungskontext zu spezifizieren. Durch den im Abschnitt 4.1 dargestellten Anwendungskontext soll sichergestellt werden, dass die entwickelte Methode eine praktische Relevanz aufweist, um auch in industrienahen Problemstellungen funktionieren zu können. Als Anwendungskontext wurde der Konstruktions- und FE-Absicherungsprozess als zentrale Elemente der technisch-mechanischen Produktentwicklung gewählt, da diese Schnittstelle als bedeutsamer Engpass im Gesamtprozess angesehen wird. Ebenso wird eine Analyse der Ausgangssituation durchgeführt, um Probleme zu identifizieren, die die Einführung datengetriebener Methoden in der Produktentwicklung behindern. Hierzu wurde eine Industriebefragung durchgeführt, die im Abschnitt 4.2 vorgestellt wird.

4.1 Anwendungskontext: Integration von datengetriebenen Methoden in die technisch-mechanische Produktentwicklung

Die technisch-mechanische Entwicklung im Bereich der Konstruktion und Simulation ist ein zentraler Teilprozess der gesamten Produktentwicklung. Dabei werden moderne Technologien, Methoden und Werkzeuge genutzt, um mechanische Produkte zu entwerfen, zu analysieren und zu optimieren. Dieser Prozess ist ein integraler Bestandteil der Produktentwicklung und zielt darauf ab, innovative Lösungen zu schaffen, die den Anforderungen an Leistung, Zuverlässigkeit und Effizienz entsprechen. Im Folgenden wird der Prozess der technisch-mechanischen Entwicklung näher erläutert, zusätzlich ist dieser in Bild 30 dargestellt.

Zu Beginn erfolgt die Konstruktionsphase, in der detaillierte Entwürfe auf Basis der Produktanforderungen und -spezifikationen erstellt werden. CAD-Software spielt dabei eine zentrale Rolle, da sie Ingenieuren ermöglicht, präzise 3D-Modelle zu erstellen, die als Grundlage für den gesamten Entwicklungsprozess dienen. Im Anschluss werden Simulationen durchgeführt, um

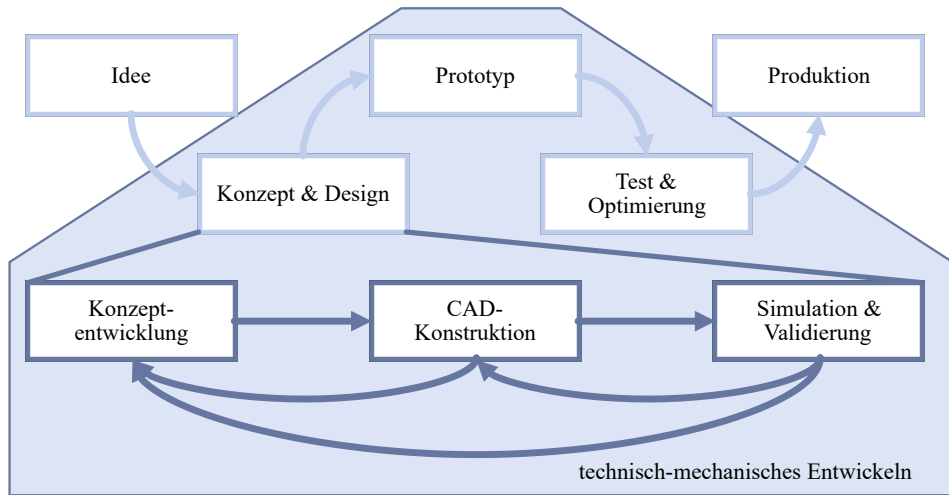


Bild 30: Produktentwicklungsprozess im Bereich der Konstruktion und Simulation im technisch-mechanischen Entwickeln

das Verhalten des Produkts unter verschiedenen Bedingungen zu analysieren. Mechanische Simulationen nutzen moderne Software, um Faktoren wie Spannungen, Verformungen, Strömungsverhalten und Temperaturverteilungen zu untersuchen. Dadurch können potenzielle Schwachstellen identifiziert und der Konstruktionsprozess optimiert werden, bevor physische Prototypen erstellt werden. Eine spezifische Form der Simulation ist die Finite-Elemente-Analyse (FEA), die sich auf die Berechnung von Spannungen und Verformungen in einem Material unter verschiedenen Belastungen konzentriert. Ingenieure können mithilfe von FEA das Verhalten von Bauteilen oder Strukturen genau vorhersagen und sicherstellen, dass sie den erforderlichen Standards entsprechen. Basierend auf den Ergebnissen der Simulationen erfolgt die Optimierung von Konstruktionen, um die Leistung zu maximieren, Materialien effizienter zu nutzen oder das Gesamtgewicht zu minimieren. Dies trägt zur Verbesserung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Endprodukts bei. Abschließend werden physische Prototypen erstellt und getestet, um sicherzustellen, dass sie den Anforderungen entsprechen. Die Ergebnisse dieser Tests fließen zurück in den Entwicklungsprozess, um notwendige Anpassungen vorzunehmen. Insgesamt nutzt die technisch-mechanische Entwicklung digitale Werkzeuge und fortgeschrittene Analysemethoden, um eine präzise, effiziente und kostengünstige Produktentwicklung zu ermöglichen und hochwertige technische Produkte auf den Markt zu bringen.

Generell sollte den Daten in der Produktentwicklung mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden, um z. B. Erkenntnisse über Zusammenhänge zu gewin-

nen, die nicht unmittelbar ersichtlich sind. Generell hat sich die intensive Datenanalyse als ein neues, stark wachsendes Arbeits- und Forschungsgebiet etabliert. Für diese Analyse stehen wie oben beschrieben leistungsfähige Methoden zur Verfügung. Es ist wichtig, die Möglichkeiten dieser neuen Techniken zu kennen und einen geeigneten Anwendungsfall für eine erste Implementierung zu identifizieren. Anschließend können Unternehmen diese in ihren Produktentwicklungsprozess integrieren. Für die Implementierung von datengetriebenen Methoden muss auch die Verfügbarkeit einer ausreichenden Datenmenge sichergestellt werden. Außerdem sollte gewährleistet sein, dass das industrielle Problem mithilfe von Datenanalysemethoden effizient gelöst werden kann. In der täglichen industriellen Praxis werden neue, datengetriebene Techniken nur selten eingesetzt. Diese zögerliche Haltung begründet sich aus der mangelnden Vertrautheit und Akzeptanz innerhalb der Belegschaft mit diesen Techniken. Zudem müssen die Mitarbeitende geschult oder die Datenlage verbessert werden. Ferner müssen Unternehmen zunächst Projekte identifizieren, die das Potenzial für den Einsatz von Digital-Engineering-Methoden bieten. Bild 31 fasst relevante Aspekte zur Identifikation geeigneter Methoden zusammen.

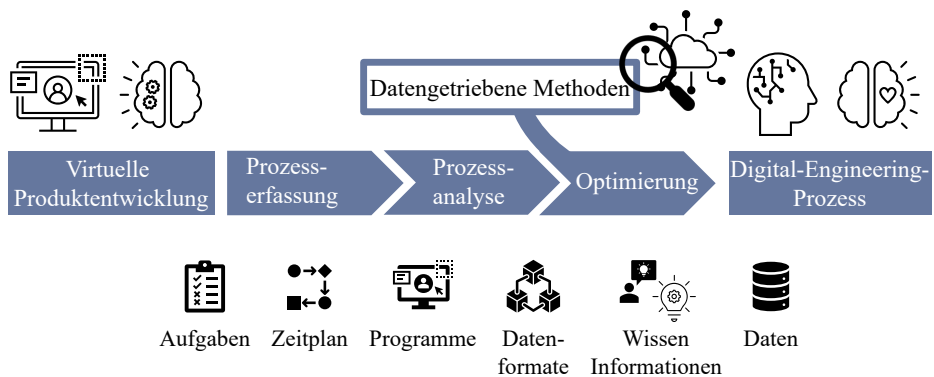


Bild 31: Vorgehen zur Integration von Digital-Engineering-Methoden in die Produktentwicklung nach [P10]

4.2 Analyse von Hemmnissen der Methodenintegration

Im Rahmen dieses Abschnitts sollen die Hintergründe der fehlenden Verbreitung von datengetriebenen Methoden in der Industrie näher analysiert werden. Hierzu wurde im Zeitraum von Mai 2022 bis Juli 2022 eine Online-Umfrage über das Portal Unipark¹³ durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die für die Beantwortung der Thesen notwendigen Fragen näher

¹³ <https://www.unipark.com/>

erörtert. Der Fragebogen ist Tabelle A3, die Antworten sind den Tabellen A4 bis A7 im Anhang zu entnehmen. Zentrales Ziel war die Identifikation von Potenzialen und Hindernissen bei der Anwendung von KI-Methoden in Unternehmen. Hierbei wurden insbesondere die folgenden zwei Thesen betrachtet:

1. Potenziale datengetriebener Methoden sind in der Produktentwicklung meistens ungenutzt.
2. Die (derzeit) größten Hemmnisse für den Einsatz von KI sind fehlendes Methodenwissen, fehlendes Wissen über Potenziale in der PE, fehlendes Personal und fehlendes Datenmanagement.

Bei der Rekrutierung der Probanden wurde die Schneeballtechnik angewendet¹⁴. Die endgültige Stichprobengröße betrug $n = 48$. Von den Teilnehmenden arbeiten 37 Personen ($\approx 77\%$) in einem Großunternehmen¹⁵, 6 Personen ($\approx 12,5\%$) in einem mittelgroßen Unternehmen¹⁶, 3 Personen ($\approx 6,3\%$) in einem Kleinunternehmen¹⁷ und die restlichen 2 Personen ($\approx 4,2\%$) in einem Kleinstunternehmen¹⁸. Die Branche der Befragten wurde ebenfalls erfasst. 11 Personen ($\approx 22,2\%$) haben die Automobilbranche als Branche ihres Unternehmens gewählt. 8 Personen ($\approx 16,7\%$) arbeiten in der Zulieferindustrie, 5 Personen ($\approx 10,4\%$) in der Dienstleistungsbranche, 3 Personen ($\approx 6,3\%$) in der Energieversorgung, 2 Personen ($\approx 4,2\%$) in der Medizintechnik und 2 Personen ($\approx 4,2\%$) in Forschung und Wissenschaft. Dagegen ist keiner der Befragten im Werkzeugbau oder in der Luft- und Raumfahrt tätig. Die Mehrheit, 17 Personen ($\approx 35,4\%$), wählte die Antwortmöglichkeit „Sonstiges“. Die folgenden 17 einzelnen Antworten wurden gegeben: Industrieelektronik, Maschinenbau (2x), Anlagenbau (2x), Sondermaschinenbau, Logistik, Medien, Antriebstechnik (2x), Großmaschinenbau, Produktentwicklung, Sensorik, Metallverarbeitung, Halbleiter, Software, IT und TelCo (je 1x).

Eine Stichprobengröße von 48 bei dieser Umfrage wirft einige kritische Fragen auf, insbesondere in Bezug auf die Repräsentativität und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Bei einer kleinen Stichprobe ist es schwierig, die Ergebnisse auf eine größere Population zu verallgemeinern. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass eine Stichprobe von 48 Teilnehmenden trotz ihrer Grenzen wertvolle Informationen liefern kann. Der Schlüssel liegt darin, die Ergebnisse richtig zu interpretieren und ihre Einschränkungen zu berücksichtigen.

¹⁴ Bei dieser Technik werden die bereits rekrutierten Teilnehmer dazu angehalten, ihre Kontakte in ihrem sozialen Netzwerk einzubeziehen und diese ebenfalls zur Teilnahme zu motivieren. [330]

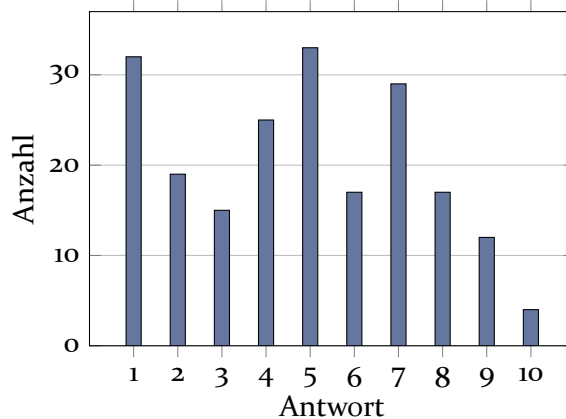
¹⁵ ab 250 Mitarbeitenden oder mehr als 50 Mio. € Umsatz [331].

¹⁶ bis 249 Mitarbeitende oder bis 50 Mio. € Umsatz [331].

¹⁷ bis 49 Mitarbeitende oder bis 10 Mio. € Umsatz [331].

¹⁸ bis 9 Mitarbeitende oder bis 2 Mio. € Umsatz [331].

Bevor die definierten Thesen näher analysiert werden, soll evaluiert werden, ob durch die Teilnehmenden im Einsatz von KI überhaupt Potenziale gesehen werden.



Antwortmöglichkeiten:

- | | |
|---|---|
| 1. Entscheidungsfindung mithilfe von Daten unterstützen / optimieren. | 6. Bewältigung des zunehmenden Datenvolumens. |
| 2. Besseres Verständnis für Kunden, Produkte und Märkte. | 7. Vereinfachung der Auswertung, Analyse und Interpretation großer Datenmengen. |
| 3. Verwendung von Daten zur Optimierung und Weiterentwicklung der Produkte. | 8. Nachverfolgbarkeit der Daten. |
| 4. Verbesserung der Produktqualität und Prozessbeherrschung. | 9. Schnellere und flexiblere Reaktion auf disruptive Veränderungen des Marktes. |
| 5. Unterstützung der Entwickler bei Ihren Tätigkeiten und Entscheidungen. | 10. Sonstiges. |

Bild 32: Umfrageergebnis zur Frage „Wo sehen Sie mögliche Potenziale der KI in der Produktentwicklung“ (Stand 2022, Mehrfachantworten möglich)

Im Rahmen der Antwortoption „Sonstiges“ wurden folgende Freitextantworten gegeben:

- „Ich sehe kaum Potenzial in meinem UN (Unternehmen), das kann an mangelndem Wissen meinerseits liegen.“
- „Hier sehen wir eher das Potenzial, dass ein KI-Einsatz uns eher lähmen und verlangsamen würde, ohne einen Mehrwert zu generieren.“
- „KI-gestützte Analyse von Engineering-Daten auf deren Datenqualität und die teilweise automatisierte Verbesserung mit KI.“
- „Nutzung vorhandener Funktionsbaugruppen zur Generierung von Varianten und Beherrschung des Variantenmanagements.“

Die in Abbildung 32 dargestellten Ergebnisse zeigen ganz deutlich, dass sehr viele Anwendungspotentiale für datengetriebene Methoden in der Produktentwicklung gesehen werden. Lediglich zwei Teilnehmende nutzten die Option „Sonstiges“, um im Freitext darauf hinzuweisen, dass sie kein Potenzial in der Anwendung dieser Methoden sehen. Angesichts dessen ist die Annahme gerechtfertigt, dass datengetriebene Methoden Potenziale in der PE haben und die Analyse der gestellten Thesen durchgeführt wird.

These 1: Potenziale datengetriebener Methoden sind in der Produktentwicklung meistens ungenutzt

Die erste These, und gleichzeitig eine der Grundannahmen dieser Arbeit, ist, dass die Potenziale datengetriebener Methoden in der Produktentwicklung meistens ungenutzt sind.

Hierzu erfolgte im Rahmen der Studie die Abfrage, ob die Probanden davon ausgehen, dass die KI in der Produktentwicklung in Deutschland kaum verbreitet ist. Die Antworten dieser Frage sind Bild 33 zu entnehmen.

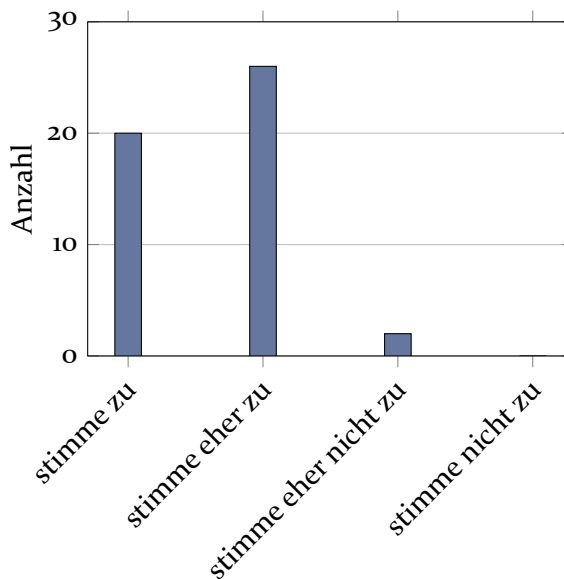


Bild 33: Umfrageergebnis zur Frage „KI ist in der Produktentwicklung in Deutschland bisher kaum verbreitet“ (Stand 2022)

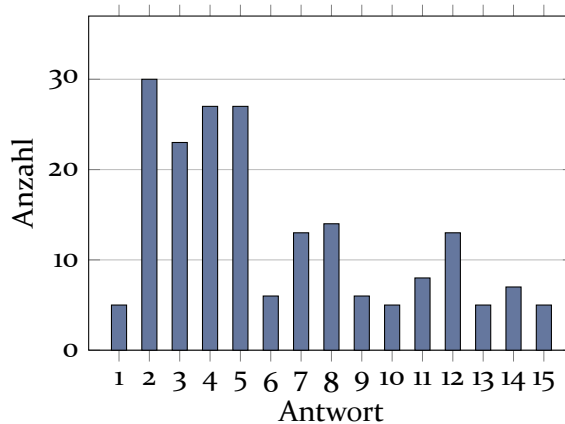
95.8% der Umfrageteilnehmer stimmten der Aussage (größtenteils) zu, gleichzeitig stimmen allerdings $\approx 66,7\%$ der Befragten in einer weiteren Frage der Aussage zu, dass durch KI-Einsatz in den nächsten zwei Jahren ein signifikan-

ter Wettbewerbsvorteil zustande kommt, wobei dieser Trend noch zunimmt, wenn der Zeithorizont bei 5–10 Jahren liegt. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Befragten zwar die derzeit geringe Verbreitung von KI in der Produktentwicklung in Deutschland bestätigen, gleichzeitig aber optimistisch sind, was die zukünftige Bedeutung und den Wettbewerbsvorteil durch den Einsatz dieser Technologien angeht. Die Ergebnisse der Studie bestätigen somit die These, dass die Potenziale datengetriebener Methoden in der Produktentwicklung bisher nicht ausreichend genutzt werden, aber eine positive Entwicklung erwartet wird. In diesem Antwortkontrast stellt sich nun die Frage, woher diese Zurückhaltung und die Probleme bei der Integration datengetriebener Methoden in die Produktentwicklung kommen.

These 2: Die (derzeit) größten Hemmnisse für den Einsatz von KI sind fehlendes Methodenwissen, fehlendes Wissen über Potenziale in der PE, fehlendes Personal und fehlendes Datenmanagement

Diese Frage soll im Rahmen der zweiten These näher analysiert werden. Hierbei ist die Annahme, dass die größten Hemmnisse für den Einsatz von KI fehlendes Methodenwissen, fehlendes Wissen über Potenziale in der PE, fehlendes Personal und fehlendes Datenmanagement sind. Die Ergebnisse der Frage sind in Abbildung 34 dargestellt. Hierbei nennen 5 der Befragten ($\approx 10,4\%$) eine unzureichende Kommunikation der Vorgesetzten als Grund für die mangelnde Akzeptanz von KI-Lösungen. Fehlendes Wissen über die Methoden und Werkzeuge sowie deren Anwendung sehen 30 Teilnehmer ($\approx 62,5\%$) als Grund an. Fehlendes Wissen über die (Digitalisierungs-)Potenziale in der Produktentwicklung gaben 23 Befragte ($\approx 47,9\%$) an. 27 Personen ($\approx 56,3\%$) sehen den Mangel an qualifiziertem Personal als einen Grund für die mangelnde Akzeptanz von Künstlicher Intelligenz im Unternehmen. Einen weiteren Grund geben 27 Befragte ($\approx 56,3\%$) im fehlenden Datenmanagement im Unternehmen an. Zudem haben Unternehmen laut 6 Befragten ($\approx 12,5\%$) ein zu geringes Datenvolumen. Weiterhin scheint laut 13 Befragten ($\approx 27,1\%$) auch eine mangelnde oder fehlende Datentransparenz ein möglicher Grund zu sein. Für 14 Personen ($\approx 29,2\%$) ist die vorherrschende Unsicherheit beim Einsatz von KI-Lösungen im eigenen Unternehmen ein signifikanter Hindernisgrund. 6 Befragte ($\approx 12,5\%$) gaben an, dass es keine passenden oder individuell anpassbaren KI-Lösungen für das eigene Unternehmen gibt. Zudem fehlt es laut 5 Befragten ($\approx 10,4\%$) an der technischen Ausstattung im Unternehmen. Dazu zählt etwa ausreichend Speicherkapazität oder Rechenleistung. Für 8 Teilnehmer ($\approx 16,7\%$) scheint der Datenschutz ein weiterer Grund für die fehlende Akzeptanz von KI-Lösungen im Unternehmen zu sein. Hier besteht Unsicherheit bzw. Unklarheit über die

Nutzungsrechte der erhobenen Daten. 13 Personen ($\approx 27,1\%$) begründen die vorherige Aussage mit fehlenden Standards. Mangelnde Cybersicherheit spielt für 5 Teilnehmer ($\approx 10,4\%$) eine große Rolle und fehlende oder begrenzte finanzielle Mittel scheinen für 7 Befragte ($\approx 14,6\%$) der Grund für die mangelnde Akzeptanz von KI-Lösungen zu sein. 5 Befragte ($\approx 10,4\%$) gaben die Antwortmöglichkeit „Sonstiges“ an.



Antwortmöglichkeiten:

- | | |
|---|---|
| 1. Mangelnde Kommunikation mit den Vorgesetzten. | 8. Unsicherheit bei der Anwendung von KI-Lösungen |
| 2. Fehlendes Fachwissen über die Methoden und Tools sowie deren Einsatz | 9. Keine passenden/ individuell anpassbaren KI-Lösungen für das Unternehmen |
| 3. Fehlendes Wissen über (Digitalisierungs-) Potenziale in der Produktentwicklung | 10. Fehlende technische Ausstattung |
| 4. Fehlendes qualifiziertes Personal | 11. Datenschutz |
| 5. Fehlendes Datenmanagement innerhalb des Unternehmens | 12. Fehlende Standards |
| 6. Zu geringes Datenmanagement | 13. Mangelnde Cyber-Sicherheit |
| 7. Mangelnde / fehlende Datentransparenz | 14. Fehlende/ begrenzte finanzielle Mittel |
| | 15. Sonstiges |

Bild 34: Umfrageergebnis zur Frage „Wo sehen Sie Hemmnisse für die KI in der Produktentwicklung“ (Stand 2022, Mehrfachantworten möglich)

Im Rahmen der Antwortoption „Sonstiges“ wurden folgende Freitextantworten gegeben:

- „Schwer einschätzbares Investitionsrisiko.“
- „KI kann nicht für alles verwendet werden, dieser Glaube besteht aber häufig. Folglich gibt es Problemstellungen, die mit anderen Werkzeugen (z. B. statistischen Auswertungen) einfacher und teilweise besser gelöst werden können + schwierige Validierung (Kern: Irrglaube über Anwendungs-

möglichkeiten von KI, allerdings sind diese beschränkt. Problemlösung mit alternativen Werkzeugen (z. B. statistische Auswertungen) oftmals einfacher und teilweise besser lösbar. Zudem schwierige Validierung von KI.“

- „KI-Einsatz wird gar nicht erst in Erwägung gezogen, da es zu allen aktuellen Problemen Lösungen gibt.“
- „Einsatzmöglichkeiten von KI-Methoden sind in der Fertigung und Montage oft unbekannt.“

Die dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die in der zweiten These genannten Hemmnisse relevante Faktoren für den begrenzten Einsatz von KI-Lösungen in Unternehmen sind. Insbesondere die identifizierten Wissensdefizite sowohl hinsichtlich der Methoden und Werkzeuge als auch der Potenziale in der Produktentwicklung sowie des Mangels an qualifiziertem Personal scheinen signifikante Hemmnisse zu sein. Die Tatsache, dass eine beträchtliche Anzahl der Befragten die unzureichende Kommunikation der Vorgesetzten, Unsicherheiten beim Datenschutz und das Fehlen branchenweiter Standards als Hindernisse benennt, deutet auf komplexe organisatorische Herausforderungen hin. Die Freitextantworten verdeutlichen zusätzliche Aspekte wie den Glauben an die begrenzte Anwendbarkeit von KI, Schwierigkeiten bei der Validierung von KI-Lösungen und das Ignorieren von KI in bestehenden Problemlösungen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Herausforderungen im Zusammenhang mit KI vielschichtig sind und sowohl technische als auch organisatorische Aspekte umfassen. Die These trifft somit zu und Unternehmen stehen vor erheblichen Hürden, die es zu überwinden gilt, um eine effektive Nutzung von KI zu ermöglichen. Maßnahmen in den Bereichen Wissensvermittlung, Ressourcenbereitstellung, Datenschutz und Risikobewertung sind erforderlich, um die Akzeptanz und Integration von KI in Unternehmen zu fördern.

Zwischenfazit Kapitel 4

Die Potenziale datengetriebener Methoden in der Produktentwicklung, insbesondere im Bereich der technisch-mechanischen Entwicklung werden bisher nicht ausreichend genutzt, wie die durchgeführte Industriebefragung gezeigt hat. Die Analyse der Hemmnisse bestätigt, dass es mehrere Herausforderungen gibt, die den Einsatz von KI und datengetriebenen Methoden behindern. Dies sind unter anderem Wissensdefizite über Methoden, Werkzeuge und Potenziale in der Produktentwicklung sowie der Mangel an qualifiziertem Personal. Auch organisatorische Faktoren wie unzureichende Kommunikation,

Unsicherheiten beim Datenschutz und das Fehlen branchenweiter Standards tragen zu den Herausforderungen bei. Die positiven Erwartungen hinsichtlich zukünftiger Wettbewerbsvorteile durch KI zeigen jedoch, dass ein großes Interesse an diesen Technologien besteht.

5 Konzept zur Integration datengetriebener Methoden in die Produktentwicklung

Wir leben in einer Welt, die in Daten ertrinkt. Wir haben die Wahl, ob wir sie weiterhin ignorieren und als großes Rauschen abtun oder ob wir sie nutzen wollen.

Jorn Lyseggen, CEO von Meltwater

Ziel des folgenden Kapitels ist die Entwicklung einer Methodik zur Unterstützung, insbesondere von KMU, bei der Integration datengetriebener Methoden in den Produktentwicklungsprozess. Diese Gesamtmethodik stellt hierbei den Kern dieser Arbeit dar.

Bei der Integration datengetriebener Methoden in laufende Unternehmensprozesse müssen Aspekte und Anforderungen aus verschiedenen Disziplinen berücksichtigt werden. Hierzu zählt der bestehende Entwicklungsprozess, existierende Engstellen, potenzielle Verbesserungsmöglichkeiten, ebenso wie das Wissen über die Leistungsfähigkeit der vorhandenen datengetriebenen Methoden, Werkzeuge und Tools. Basierend hierauf müssen passende Methoden ausgewählt und in den Produktentwicklungsprozess integriert werden. Zur erfolgreichen Etablierung eines Pilotprozesses ist zudem die Akzeptanz der neuen Methode bei den Stakeholdern (Nutzer, Management, IT-Abteilung) notwendig. Die Steigerung der Akzeptanz sollte parallel zur Entwicklung und Einführung durchgeführt werden. Die Aspekte der Akzeptanzsteigerung werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht detailliert betrachtet; dies ist ein primäres Forschungsfeld der Sozial- und Verhaltenswissenschaften.

5.1 Gesamtmethodik zur Identifikation von Anwendungsfällen und Integration von Methoden

Nachfolgend wird kurz auf den in Bild 35 gezeigten Gesamtaufbau der entwickelten Methodik eingegangen. Um eine systematische Analyse des Entwicklungsprozesses, insbesondere in Bezug auf die digitale Transformation, zu ermöglichen, wird ein reproduzierbares Prozess-Meta-Modell benötigt. Die Gesamtmethode besteht aus insgesamt fünf aufeinander aufbauenden Phasen, die in den nachfolgenden Kapiteln detailliert betrachtet werden. Die methodische Entwicklung der Methodik basiert auf der in Kapitel 4 analysierten Herausforderungen. Nach einer zeitlich-logischen Betrachtung der

identifizierten Ansatzpunkte erfolgte eine Deduktion der Methodik, um die Lösung der identifizierten Herausforderungen zu ermöglichen. Jede Phase endet mit definierten Ergebnissen. Diese sollten vollständig vorliegen, bevor zum ersten Mal zur nächsthöheren Phase gewechselt wird. Dennoch sind die Phasen nicht als starrer Ablauf zu sehen, sondern sollen Iterationen ermöglichen. Diese umfassen:

- o. Vorbereitung
 - 1. Prozesserfassung
 - 2. Prozessbewertung
 - 3. Potenzialanalyse
 - 4. Integration datengetriebener Methoden

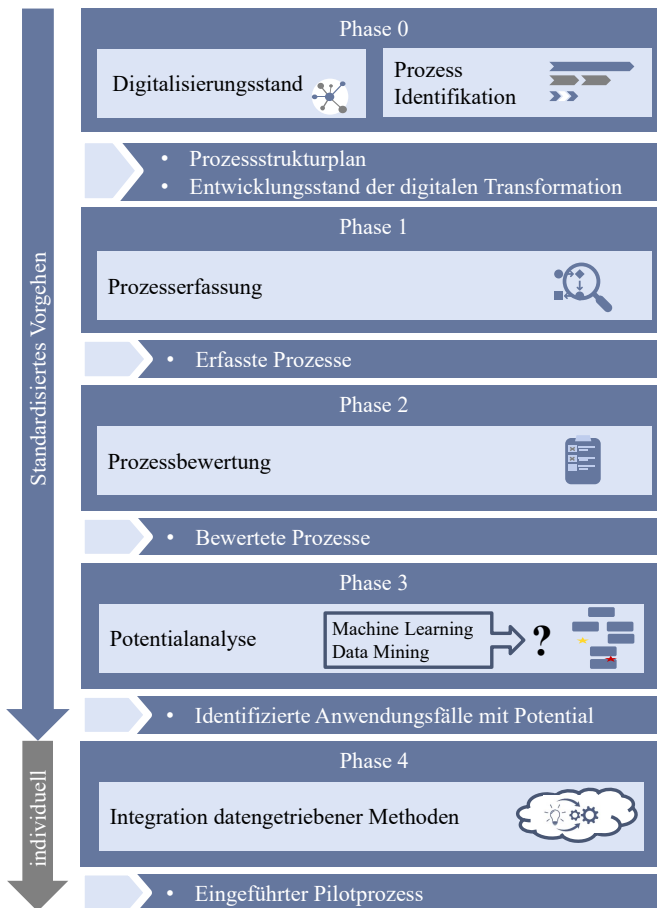


Bild 35: Gesamtaufbau der Methode zur Nutzbarmachung von Datenpotenzialen durch Integration datengetriebener Methoden in die Produktentwicklung.

5.1.1 Phase 0: Vorbereitende Tätigkeiten

Zu Beginn des Transformationsprozesses sind einige allgemeine Vorbereitungen zu treffen. Bei der Prozessoptimierung ist es gängige Praxis, die Ziele des Unternehmens mit den Zielen der Prozessoptimierung auf Kompatibilität zu prüfen. Um den Erfolg der Neugestaltung des Designprozesses zu messen, sollten die Optimierungsziele entsprechend den Unternehmenszielen festgelegt werden.

Ziel und Ergebnis Zentrales Ziel dieser Phase ist die Bewertung des initialen Digitalisierungsgrades des Unternehmens sowie eine Identifikation von Prozessen, die für eine Digital Engineering Integration Erfolg versprechend sind. Am Ende der Phase steht sowohl eine Prozesslandkarte als auch eine erste Einschätzung des Digitalisierungsstandes zur Verfügung.

Methoden In dieser Vorbereitungsphase werden die Methoden der Prozesslandkarte und der Reifegradmodelle verwendet, die nachfolgend vorgestellt werden.

Prozessidentifikation

Zunächst sollte ein Gesamtprozessstrukturplan oder eine Prozesslandkarte erstellt werden, falls noch keine/-r im Unternehmen vorhanden ist. In diesem Plan werden alle zentralen Prozesse, sowohl innerhalb des Unternehmens als auch nach außen hin, dokumentiert [44], wie Abbildung 36 exemplarisch darstellt. Je nach Unternehmensgröße kann es sinnvoll sein, den Prozessstrukturplan auf eine kleinere Einheit (z. B. Entwicklung) zu beschränken. Dies ist nötig, um eine sinnvolle Auswahl passender Prozesse zu ermöglichen, da ansonsten zu viele Prozesse berücksichtigt werden. Auf der Grundlage dieses Prozessstrukturplans kann der gewählte Gestaltungsprozess leicht in einen größeren Zusammenhang gestellt werden. Obwohl sich die Gesamtmethodik hauptsächlich auf die Produktgestaltung konzentriert, sollten auch Prozesse, die die Produktentwicklung beeinflussen oder von ihr abhängen, in den Strukturplan aufgenommen werden. Zusätzlich zu den Start- und Endereignissen müssen in der Vorbereitungsphase alle relevanten Organisationseinheiten identifiziert werden. BEST und WETH [44] betonen die Bedeutung dieses Schrittes, um strukturelle Fehler zu vermeiden.

Digitalisierungsstand

Die letzte Aufgabe der Vorbereitungsphase ist die Bewertung des aktuellen Digitalisierungsstandes des Unternehmens. Um datengetriebene Methoden in die Entwicklungsprozesse zu integrieren, sollte das Unternehmen einige

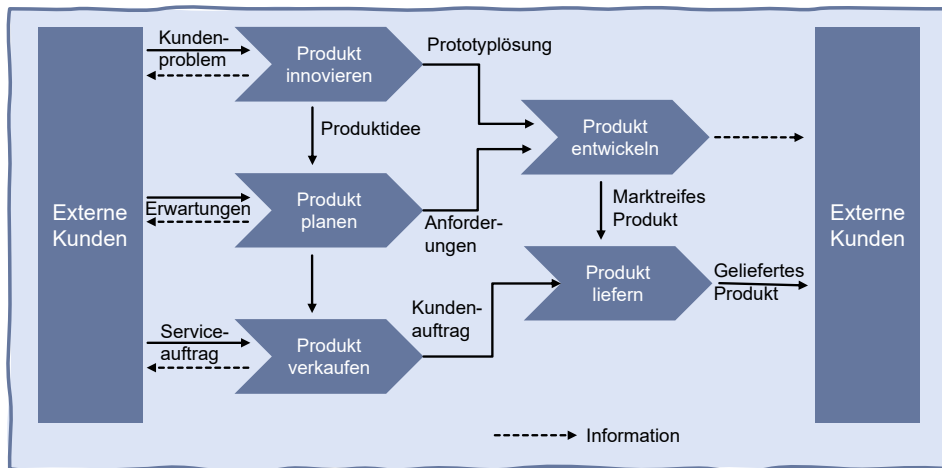


Bild 36: Exemplarische Prozesslandkarte eines Entwicklungsprozesses nach [222].

Voraussetzungen im Sinne der Digitalisierung geschaffen haben. Transformationsmodelle ermöglichen eine effiziente und vergleichbare Beschreibung des aktuellen Digitalisierungsstandes. Bei kritischer Betrachtung des Begriffs Transformationsmodell, insbesondere im Kontext der digitalen Transformation, kann es für Unternehmen wirtschaftlicher sein, nicht den höchsten Reifegrad des Modells zu erreichen. Die hohen Investitionskosten für die (weitere) Digitalisierung können bei einigen Prozessen wirtschaftlich keinen weiteren Benefit mehr erbringen. Das Reifegradmodell ermöglicht es dem Unternehmen, eine erste Evaluierung des aktuellen Standes und notwendiger Maßnahmen durchzuführen. Unternehmen der Stufe 1 „Träumer“ sollten grundlegende Digitalisierungsprojekte vorantreiben, bevor sie den Einsatz datengetriebener Methoden planen. Unternehmen ab Stufe 2 „Einsteiger“ erhalten mit der Methode eine effektive Unterstützung für den Einsatz digitaler Werkzeuge. Die Mindestvoraussetzung für diese Stufe ist insbesondere eine robuste und zuverlässige IT-Infrastruktur, die für den Einsatz datengetriebener Methoden von entscheidender Bedeutung ist.

Zwischenfazit Kapitel 5.1.1

Die Vorbereitungsphase zielt darauf ab, den Digitalisierungsstand eines Unternehmens zu bewerten und geeignete Prozesse für eine erfolgreiche Methodenintegration auf Basis einer Prozesslandkarte zu identifizieren.

5.1.2 Phase 1: Prozesserfassung

In der ersten Phase der Gesamtmethode wird die Erfassung des Ist-Zustandes der Produktentwicklung durchgeführt.

Ziel und Ergebnis Ziel dieser Phase ist die Ist-Erfassung des aktuellen Prozessstandes. Hierbei soll keine allgemeingültige und vollumfängliche Prozesserfassung in allen Details durchgeführt werden¹⁹. Vielmehr liegt der Fokus darauf, die Ergebnisse im Nachgang zur Prozessoptimierung mit datengetriebenen Methoden zu nutzen. Am Ende dieser Phase liegt eine Dokumentation aller relevanten Prozesse vor. Im Mittelpunkt stehen die Prozessschritte, Mitarbeitende, sowie die verwendeten und erzeugten Daten.

Methoden Die in dieser Phase eingesetzten Methoden lassen sich in zwei wesentliche Teilziele unterteilen: Prozessaufnahme und Prozessdokumentation. Bevor diese Methoden eingeführt werden, soll kurz darauf eingegangen werden, welche Prozessaspekte besonders relevant für die gegebene Aufgabenstellung ist.

Relevante Aspekte

Etablierte Methoden zur Prozesserfassung konzentrieren sich auf Aspekte wie Rollen, Aufgabenketten, Zeitpläne und Ergebnisse [44]. Ferner sind Daten- und Informationsflüsse sowie Speicherorte und produktbezogene Dokumente für die digitale Produktentwicklung relevant [319]. Da Wissen in der Produktentwicklung von zentraler Bedeutung ist [332], ist auch die Berücksichtigung von Wissen in der Prozesserfassung naheliegend. Basierend auf der Literaturanalyse wird die folgende Liste von Aspekten verwendet, um einen digitalen Prozess auf einer Ebene zu beschreiben, die es ermöglicht, Potenziale für den Einsatz digitaler Methoden zu identifizieren. Die Aspekte werden im Folgenden erläutert.

Rollen: Nur sehr wenige Prozesse laufen vollständig digital und automatisiert ab. Im Rahmen der Erfassung werden die beteiligten Personen aus den relevanten Abteilungen befragt. Weiterhin werden die Verantwortlichkeiten hinter den Schnittstellen definiert.

¹⁹ Eine vollumfängliche Prozesserfassung ist nach DUMAS et al. [220] generell nicht möglich, für eine nähere Auseinandersetzung mit dieser Thematik sei auf die genannte Literatur verwiesen.

Aufgaben: Kernaspekt eines jeden Prozesses sind die Aufgaben, die erfüllt werden müssen, um das übergeordnete Prozessziel zu erreichen. Diese Aufgaben sollten nahezu auf Workflow-Ebene erfasst werden.

Zeitplan: Da nicht alle Aufgaben zur gleichen Zeit ausgeführt werden können, gibt es eine Art Zeitplan. Die Auswertung dieses Zeitplans kann zusätzliche Optimierungspotenziale eröffnen.

Werkzeuge: Digitale Prozesse sind auf verschiedene Werkzeuge angewiesen. Neben kommerziellen Standardlösungen wie CAD- oder Simulationslösungen gehören dazu auch selbst entwickelte Werkzeuge.

Dateiformat: Fast jedes Werkzeug verwendet ein eigenes Dateiformat. Eine Dateikonvertierung ist meist mit Informationsverlusten verbunden und sollte auf ein Minimum beschränkt werden.

Kommunikation: Die Kommunikationskanäle zwischen den Prozessbeteiligten sollten aufgezeichnet werden. Diese können von mündlichen Vereinbarungen und gedruckten Dokumenten bis zu E-Mail oder SAP-basierter Kommunikation reichen.

Entscheidungen und Genehmigungen: Um Engpässe und Iterationen zu erkennen, ist eine detaillierte Erfassung der Entscheidungen und der erforderlichen Genehmigungen zwingend erforderlich.

Wissen, Informationen und Daten: Um zwischen den verschiedenen Arten von Daten zu unterscheiden, verwenden wir die folgenden Definitionen. Für alle drei Aspekte sind insbesondere die Herkunft (z. B. Abteilung xy) oder das Ziel (z. B. Archiv auf Server xy) relevant:

Wissen ist die Art von Daten, die dem expliziten Wissen zugeordnet werden können, z. B. Simulationsregeln oder Bücher. Zusätzlich wird das implizite Wissen des Prozessbearbeiters zu diesem Aspekt gezählt.

Informationen sind implizites Wissen anderer Kollegen als der des Prozessbearbeiters, das bisher nicht standardisiert und kontextualisiert wurde und ad-hoc abgefragt wird. Aber auch Kurzmeldungen im Sinne von „das Bauteil hält der Belastung stand“ werden zu den Informationen gezählt.

Daten sind alle Arten von Prozessoutputs und alle Dateien, die während des Prozesses verändert werden. Beispiele sind in Dateien gespeicherte CAD-Daten oder Berechnungsberichte.

Prozessaufnahme

Die eigentliche Methode zur Erfassung der Produktentwicklungsprozesse wurde durch einen literaturbasierten Ansatz entwickelt. Bestehende Erfassungsmethoden wurden im Hinblick auf Stärken und Schwächen analysiert und in einen dreigliedrigen Ansatz überführt, wie in Abbildung 37 dargestellt. Das vorgestellte Verfahren ist eine Erweiterung bestehender Prozessanalysemethoden, um den Besonderheiten des Produktentwicklungsprozesses gerecht zu werden. Zusätzlich zu den drei Säulen gibt es ein einheitliches Verfahren für die Vor- und Nachbereitung, um den gesamten Prozess zu erfassen. Der gesamte Prozess wird im folgenden Abschnitt beschrieben. An dieser Stelle ist herauszuheben, dass auch mit dieser Methode keine abschließende und vollständige Erfassung des Entwicklungsprozesses möglich ist, sondern der Fokus ausschließlich auf der Erfassung nötiger Informationen zur Identifikation von Anwendungsfällen datengetriebener Methoden liegt.

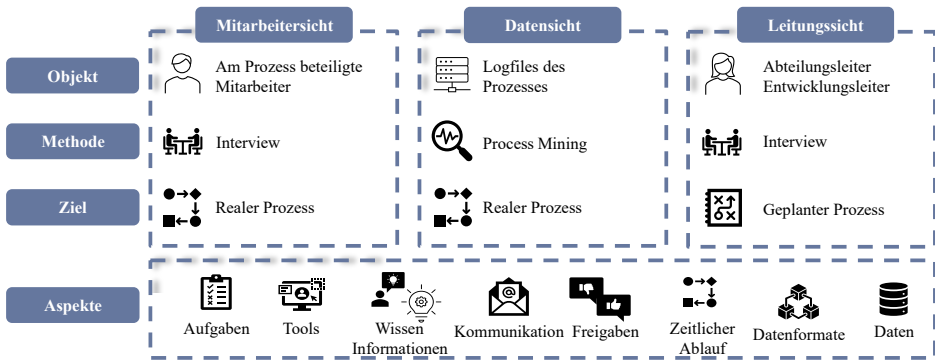


Bild 37: Vorgehen zur Erfassung von Entwicklungsprozessen mit Fokus auf die Anwendbarkeit datengetriebener Methoden

Mit dem Ansatz sollen zusätzlich die von DUMAS et al. [220] genannten Probleme entschärft werden. Das Problem des verteilten Prozesswissens wird durch die verschiedenen Sichten adressiert. In der Managementsicht wird ein Gesamtbild des Prozesses erstellt und relevante Rollen identifiziert. Die Datensicht bietet zusätzliche Unterstützung, wenn ein zentrales Datenmanagementsystem vorhanden ist, in dem das digitale Prozesswissen gesammelt wird. Das zweite Problem des Einzelfalldenken wird durch die bewusste Einbeziehung verschiedener Fälle und Varianten des Prozesses umgangen, da dies zu weiteren Optimierungspotenzialen führen kann.

Vorbereitung Im Rahmen der Vorbereitung zur Prozessaufnahme wird eine erste grobe Ist-Aufnahme durchgeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass der Interviewer bereits einen Überblick über den Prozess hat, bevor die

detaillierte Prozessaufnahme beginnt. Außerdem kann er so die Erfassung optimal vorbereiten und alle relevanten Aspekte berücksichtigen. Eine Erfassung des Produktentwicklungsprozesses, die sich auf den Einsatz digitaler Methoden konzentriert, sollte auf der Ebene des Detailprozesses bzw. Workflows erfolgen, da nur auf dieser Ebene relevante Aspekte wie Daten erfasst werden können. Die Identifikation relevanter Organisationseinheiten und geeigneter Experten wird durchgeführt und die vorhandenen Daten werden im Hinblick auf den Einsatz von Data-Mining analysiert.

Mitarbeitersicht Zentraler Aspekt der Prozesserfassung ist die Sicht des Mitarbeiters, der in den Prozess involviert ist. Auf dieser Säule liegt der Fokus zu Beginn der Erfassung, da diese Spezialisten den Prozess am besten kennen. Die Prozesserfassung wird im Rahmen eines systematischen, aber semistrukturierten Interviews durch einen Prozessingenieur durchgeführt. Steht kein Prozessingenieur zur Verfügung kann es auch durch einen geschulten Mitarbeiter durchgeführt werden, der jedoch nicht selbst am analysierten Prozess beteiligt sein soll, um ein neutrales Bild zu ermöglichen. Durch die gewählte Interviewmethode wird der Interviewleiter bestmöglich während des Interviews unterstützt, der Interviewpartner aber gleichzeitig möglichst wenig im Redefluss eingeschränkt. Zusätzlich wird der Leitfaden abstrakt genug ausgelegt, um die verschiedenen Fachbereiche abdecken zu können. Das Workshop-Format wurde als nicht geeignet angesehen, da der Gestaltungsprozess stark fachlich geprägt ist und die stark unterschiedlichen fachlichen Expertisen der beteiligten Rollen einen gemeinsamen Workshop als effiziente Methode ausschließen. Die Aufgaben und Schnittstellen zwischen den Abteilungen müssen vorab klar definiert sein. Zudem können die Mitarbeiter unbeeinflusst von der Meinung anderer Teilnehmer mögliche Optimierungspotenziale und Probleme klar benennen. Zu Dokumentationszwecken sollte das gesamte Interview aufgezeichnet werden. Parallel hierzu erfolgt eine grafische Dokumentation des Prozesses. Eine hierzu entwickelte Darstellungsmethode wird im nächsten Kapitel vorgestellt. Die Interviewpartner sollten mit dem Gesamtprozess vertraut sein und einen groben Überblick über vorangegangene und nachfolgende Aktivitäten haben, um ihren Aufgabenbereich in den Gesamtzusammenhang einordnen zu können. Sie sollten über Erfahrung in der Position verfügen, um auch Prozessvarianten zu kennen, die nicht regelmäßig auftreten. In einer kurzen Einleitung erläutert der Interviewer den Hintergrund und das Ziel des Interviews. Anschließend erläutert der Interviewpartner den Pre-Prozess, um notwendige Voraussetzungen zum Start des eigentlichen Prozesses zu identifizieren. Der Interviewleiter muss sicherstellen, alle im vorangegangenen Abschnitt definierten Aspekte zu erfassen. Dies geschieht durch regelmäßiges Nachfragen und einer Aufführung dieser Aspekte im Interviewleitfaden. Nach der Erfassung der Vorausset-

zungen erklärt der Interviewpartner die Einzelschritte des Hauptprozesses, inklusive eventuell auftretender Prozessverzweigungen oder Alternativen. Dies beinhaltet Kommunikationswege, Verantwortlichkeiten, aber auch verwendete Programme und Tools. In diesem Teilschritt stellt der Interviewleiter ebenfalls sicher, dass alle relevanten Ergebnisse erfasst werden, indem er immer wieder nachfragt und den Prozess parallel für alle Beteiligten sichtbar skizziert. Nach dem Hauptprozess liegt das Augenmerk auf den durchgeführten Tätigkeiten, nachdem die Hauptaufgaben abgearbeitet sind. Dies umfasst insbesondere das Archivieren oder Weitergeben von Ergebnissen. Eine persönliche Einschätzung des Prozesses schließt das Interview ab.

Datensicht Um Fehler, die durch persönliche Beschreibungen entstehen können, zu reduzieren, ist der Einsatz von Process-Mining vorgesehen. Dabei wird der Prozess in der Datensicht erfasst. Bestehende Data-Mining-Algorithmen können verwendet werden, um Prozessinformationen aus Datenprotokollen zu extrahieren. Das Ergebnis des Mining-Prozesses ist ein Graph mit Zeit- und Benutzerinformationen. Die Datensicht wird mit etablierten Process-Mining-Algorithmen erfasst. Gerade in kleinen und mittelständischen Unternehmen sind die Voraussetzungen für Process Mining nicht immer gegeben. Zentrale Voraussetzung ist ein Datenmanagement-Tool wie eine PDM- oder ERP-Software, das alle Prozesse in Logfiles dokumentiert.

Leitungssicht Die letzte Säule der Methode ist die Sicht des Managements beziehungsweise Abteilungsleiters auf den Prozess. Ziel ist hier, den geplanten und aktuell optimalen Prozessablauf aufzunehmen. Die Erfassung läuft analog zur Mitarbeitersicht im Rahmen eines Interviews. Um eine Vergleichbarkeit der beiden Säulen zu erhalten, wird der gleiche Interviewleitfaden verwendet. Zentraler Vorteil der Leitungssicht ist, dass durch den Vergleich der Mitarbeiter- und Managementsicht Optimierungspotenziale identifiziert werden können. Wenn etwa die tatsächliche Vorgehensweise von der vom Abteilungsleiter gedachten abweicht, können so Ursachen identifiziert und anschließend behoben werden. Zusätzlich erhält der Manager durch eine enge Einbindung in den Prozess ein verbessertes Prozessverständnis des Gesamtprozesses.

Prozessvisualisierung

Während der Prozessinterviews wird der Prozess durch den Prozessingenieur visualisiert. Hierbei sind die in Abschnitt 2.6.6 dargestellten Herausforderungen der Prozessmodellierungssprachen zu berücksichtigen. Dazu wird eine Kombination aus BPMN und der Wertstrommethode verwendet. Diese Kombination ist notwendig, da in der klassischen BPMN Daten- und

Informationsflüsse unterrepräsentiert sind oder gänzlich fehlen, was bei der Wertstrommethode nicht der Fall ist. Allerdings mangelt es dieser Methode an einer ausreichenden Prozessdokumentation. Durch die Kombination beider Methoden können alle relevanten Aspekte des Produktentstehungsprozesses im Hinblick auf die Integration datengetriebener Methoden dokumentiert werden. Die kombinierte Methode soll alle erfassten Prozessaspekte auf klare und verständliche Weise darstellen. Die entwickelte Darstellung ist in Abbildung 38 visualisiert. Im oberen Bereich ist das etablierte BPMN-Flussdiagramm dargestellt. Zusätzlich zeigt der untere Teil mit den orangefarbenen Swimlanes den Wertstromteil der Dokumentation. Diese Swimlanes ermöglichen die Modellierung verschiedener Speicherpools, unabhängig davon, ob sie analog, digital, lokal, oder netzwerkbasierend sind.

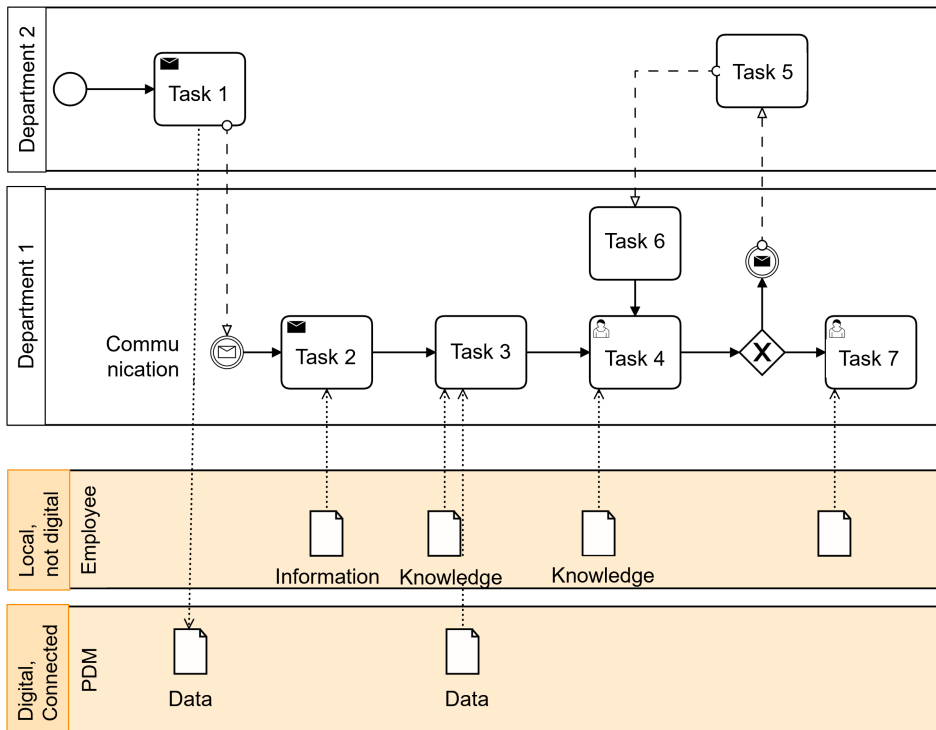


Bild 38: Entwickelter Ansatz zur Prozessdokumentation

Die grundsätzlichen Möglichkeiten der BPMN wurden bereits in Abschnitt 2.6.4 vorgestellt. Zusätzlich gibt es unterstützendes Referenzmaterial²⁰, die bei der Dokumentation unterstützen können. Die Pfeile, die von den einzelnen Prozessschritten zu einem Datenpool zeigen, symbolisieren

²⁰ http://www.bpmb.de/images/BPMN2_o_Poster_DE.pdf.

die Generierung von Daten. Zeigt der Pfeil vom Datenspeicher zu einem Prozessschritt, so werden die Daten von diesem Prozessschritt verwendet oder benötigt. Datenspeicher können sowohl Wissen als auch Informationen repräsentieren. Wenn z. B. ein Mitarbeiter Informationen von einem anderen Mitarbeiter benötigt, würde dies einen Pfeil von einem Datenfragment in der Mitarbeiter Swimlane zu dem entsprechenden Prozessschritt bedeuten.

Die Dokumentation und Visualisierung erfolgt mit dem Programm Camunda Modeler²¹. Camunda ist ein BPMN-Modellierungstool, das über eine Implementierung individueller Plug-Ins anpassbar ist. Für die Bereitstellung der notwendigen Funktionalität für die entwickelte Darstellung wurden die folgenden Erweiterungen implementiert:

- Für Kommunikationsaufgaben kann das Medium der Nachrichten festgelegt werden (z. B. E-Mail, Papier oder Sprache).
- Bei den einzelnen Aufgaben werden die verwendeten Programme und Werkzeuge dem Kontextmenü hinzugefügt.
- Genehmigungen wurden ebenfalls implementiert, indem die bestehende Aufgabenvorlage durch Anpassung der benutzerdefinierten Felder für Absender, Empfänger und Genehmigungsinformationen angepasst wurde.
- Die Daten- und Informationsfragmente werden um das Datenformat und die Version erweitert. Wenn eine Aufgabe dieselbe Eingabe- und Ausgabedatei hat, wird die Version erhöht.

Zwischenfazit Kapitel 5.1.2

In Phase 1 erfolgt die Erfassung und Dokumentation des Entwicklungsprozesses mithilfe einer neu entwickelten Methode, die Mitarbeiter-, Daten- und Leitungssicht berücksichtigt. Die Prozessdokumentation erfolgt durch eine kombinierte Darstellung aus BPMN und Wertstrommethode, wodurch sichergestellt wird, dass die nötigen Informationen und Fragmente erfasst werden können. Nach dieser ersten Phase werden Erkenntnisse in zwei zentralen Aspekten gewonnen. Einerseits erhält das Unternehmen einen vertieften Einblick in seinen Digitalisierungsstand, zum anderen werden mögliche Produktentwicklungsprozesse erfasst, die im weiteren Prozess analysiert und optimiert werden können.

²¹ <https://camunda.com/de/products/camunda-platform/modeler/>

5.1.3 Phase 2: Prozessbewertung

Nach der Erfassung des Ist-Prozesses wird in der zweiten Phase eine detaillierte Analyse der erhobenen Daten durchgeführt.

Ziel und Ergebnisse Ziel dieser Phase ist es, den Prozess hinsichtlich der aktuellen Leistungsfähigkeit und Problemstellen zu untersuchen. Nach dieser Phase liegt eine vertiefte Auswertung des Prozesses vor. Ziel dieser Auswertung ist es, Engpässe im Designprozess zu identifizieren, die mit datengetriebenen Methoden optimiert werden können.

Methoden Zunächst erfolgt die Zerlegung des Entwicklungsprozesses in Teilprozesse und Iterationen, wie in Abbildung 39 dargestellt. Diese Aufteilung ermöglicht die Identifikation von Schwachstellen auf allen Prozessebenen. Mit dieser Unterteilung wird eine strukturierte Zerlegung erzeugt, die den Grenzen der übergeordneten Prozesse auf allen Ebenen entspricht.

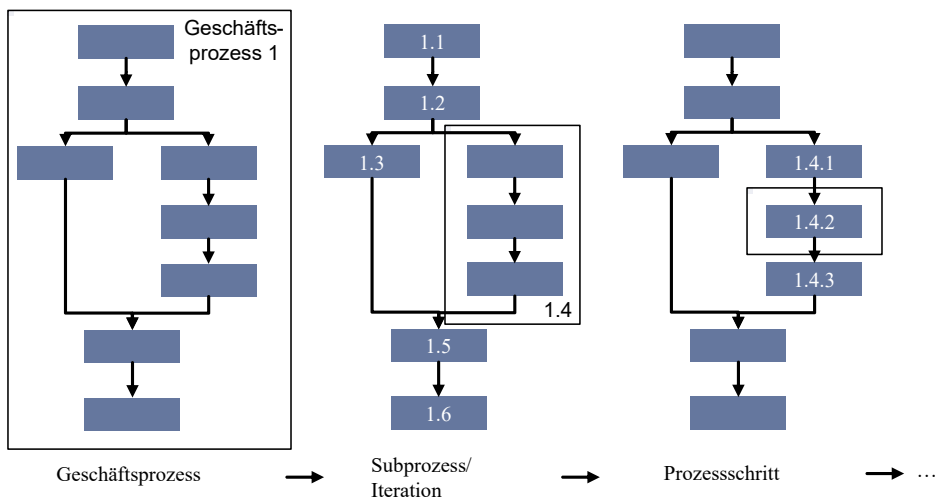


Bild 39: Schematische Prozesszerlegung eines Geschäftsprozesses in Teilprozesse und Prozessschritte und Verfahren zur Bewertung der verschiedenen Prozessebenen. Die jeweilige Zerlegungsebene wird hervorgehoben.

Zur Identifikation von Teilprozessen werden folgende Kriterien herangezogen [220]:

- Leistungsabgrenzung (z. B. Wechsel der Zuständigkeit).
- Festgelegter Output eines Teilprozesses.
- Klares Anforderungsprofil im Sinne eines Auftragnehmer – Auftraggeber Verhältnisses.

- Definierte Ressourcenausstattung.
- Autonomie des Teilprozesses.
- Performanceziele für einen spezifischen Teilprozess.

Nach der Prozesszerlegung wird jede Detailschicht unabhängig bewertet, um eine Digital-Engineering-Readiness-Stufe des Prozessschritts zu erzeugen. Die Bewertungskriterien zur Einordnung in eine entsprechende Stufe werden in Abschnitt 5.3 vorgestellt. Mit dem erstellten Kriterienkatalog können kleine und mittlere Unternehmen ihre Gestaltungsprozesse eigenständig bewerten. Das Reifegradmodell der Geschäftsprozesse für den Einsatz datengetriebener Methoden wird durch quantitative Kennzahlen zur Prozessbewertung unterstützt. Das Ergebnis der Bewertung wird in einem für Reifegradmodelle üblichen Spinnendiagramm dargestellt (siehe Abbildung 40). Dies ermöglicht eine visuelle Darstellung des aktuellen Standes der digitalen Transformation der Geschäftsprozesse.

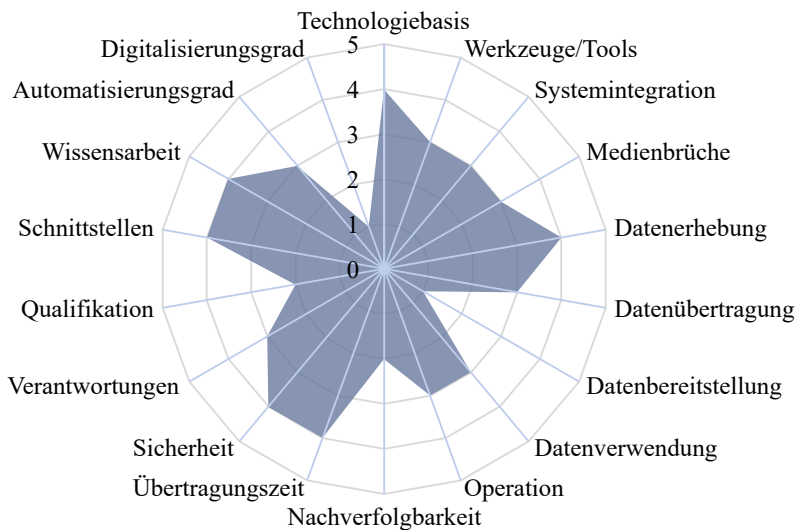


Bild 40: Beispiel für das Ergebnis einer Prozessbewertung. Fünf gilt als die beste Bewertung, Eins als die schlechteste. Die Bewertung Null signalisiert einen nicht bewertbaren Aspekt.

Die Identifizierung von Engpässen erfolgt mit einem Top-Down-Ansatz von der Geschäftsprozessebene bis zur Ebene der Teilprozesse, Prozessschritte und Arbeitsschritte, wie in Abbildung 39 dargestellt. Die Dekomposition ermöglicht auch einen Vergleich der identifizierten Prozesskomponenten (siehe Abbildung 41). Jeder Teilprozess oder jede Iterationsschleife kann im

Hinblick auf seine Leistung im Vergleich zu den anderen Teilprozessen bewertet werden. Die Bewertung und Identifizierung von Schwachstellen wird von einem Prozessingenieur durchgeführt. Auf diese Weise wird eine durchgängige Vergleichbarkeit innerhalb des gesamten Prozessablaufs gewährleistet. Dies ermöglicht Unternehmen, die Ursachen zu untersuchen und Lücken im Prozessablauf für eine erfolgreiche digitale Transformation zu schließen.

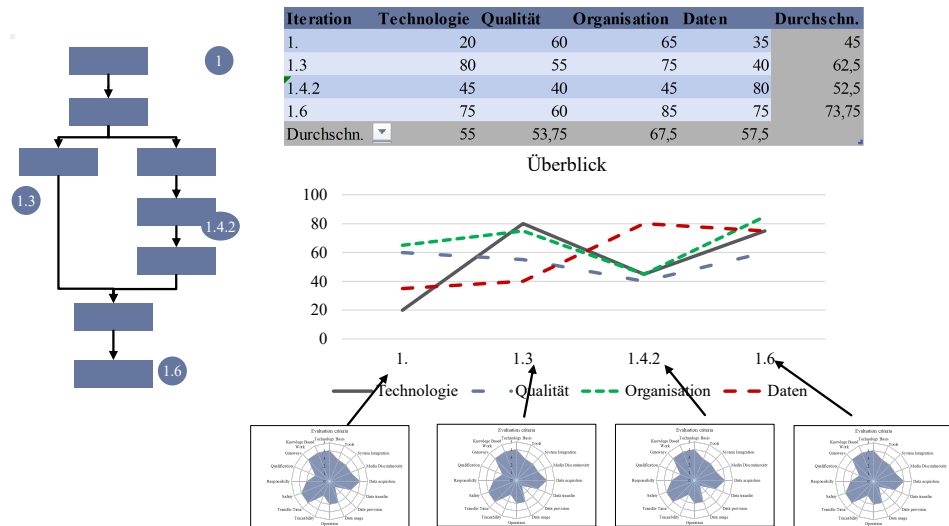


Bild 41: Vergleich der Prozessstufen und -schritte zur Ermittlung von Schwachstellen. Links: die analysierten Zersetzungsstufen. Rechts: Die Tabelle zeigt die durchschnittliche Bewertung der vier Dimensionen, das Diagramm stellt die Tabelle grafisch dar. Unten rechts: die vier (Teil-)Prozessergebnisse werden im Detail dargestellt.

Zwischenfazit Kapitel 5.1.3

Zusätzlich zu den bisherigen Erkenntnissen ermöglicht diese Phase eine detaillierte Identifikation von Schwachstellen über den gesamten Prozessablauf hinweg. Dies geschieht durch den Vergleich mit einem speziell entwickelten Reifegradmodell. Unternehmen erhalten somit nicht nur einen Überblick über die Leistung auf einzelnen Ebenen, sondern auch die Möglichkeit, gezielt Ursachenforschung zu betreiben. Dies ist entscheidend, um Lücken im Prozessablauf zu schließen und eine erfolgreiche digitale Transformation zu gewährleisten. Diese Bewertung ermöglicht es Unternehmen, nicht nur Schwachstellen zu identifizieren, sondern auch die Dynamik des Prozesses und die Anpassungsfähigkeit an veränderte Anforderungen zu optimieren. Somit trägt diese Phase maßgeblich dazu bei, vielversprechende mögliche

Anwendungsfälle für datengetriebene Methoden im bestehenden Prozess zu bestimmen.

5.1.4 Phase 3: Potenzialanalyse

Nach der Analyse der Prozesse in Phase zwei werden in Phase drei die Optimierungspotenziale und Anwendungsfälle für datengetriebene Methoden herausgearbeitet, um Unternehmen zu unterstützen.

Ziel und Ergebnis Das zentrale Ziel dieser Phase ist die Identifizierung geeigneter Anwendungsfälle sowie datengetriebener Methoden, die in diese integriert werden können.

Methoden Zur Identifizierung von Anwendungsfällen und Auswahl von Methoden sind Kenntnisse über diese Themenbereiche notwendig, die den Anwendern in KMU oftmals fehlen. Um diese Lücke zu schließen und explizite Methoden zur Integration zu identifizieren, wird die AI4PD-Ontologie (siehe Abschnitt 5.2) verwendet. In dieser Ontologie wird der aktuelle Stand und die eigenen Voraussetzungen (z. B. verfügbare IT-Systeme) beschrieben. Über eine Abfrage erfolgt ein Vorschlag passender datengetriebener Methoden und Tools, die sich in diesen Anwendungsfall integrieren lassen. Für Manager und Entscheidungsträger bietet dieser Ansatz einen klaren Weg, um die Voraussetzungen ihrer Organisation für datengetriebene Methoden zu bewerten. Indem sie die spezifischen Voraussetzungen und den aktuellen Stand ermitteln, können sie fundierte Entscheidungen darüber treffen, wo Ressourcen und Kapazität investiert werden sollten. Es ist jedoch wichtig, darauf hinzuweisen, dass diese Bewertung zwar ein qualitatives Verständnis der aktuellen Möglichkeiten vermittelt, eine numerische Bewertung des Zeit- und Kostenaufwands für die Umsetzung jedoch weitere Untersuchungen erfordert. Dennoch bietet diese strukturierte Bewertung eine solide Grundlage für die strategische Planung und hilft den Unternehmen, das Potenzial datengestützter Methoden gezielt und effizient zu nutzen. Als Unterstützung steht während dieser Phase die bereits erwähnte Ontologie zur Verfügung. Da Ontologien im Allgemeinen theoretische Konstrukte darstellen, die schwer nutzbar sind, wurde eine Nutzeroberfläche entwickelt. Diese zielt auf einen einfachen Zugriff auf die in der Ontologie gespeicherten Wissensfragmente ab. Der Nutzer bekommt die Möglichkeit entweder über Dropdown-Menüs oder über die Eingabe natürlicher Sprache eine SPARQL Abfrage²² zu generieren,

²² Details zur SPARQL-Abfrage werden in Abschnitt 5.2 eingeführt.

ohne detaillierte Kenntnisse über Syntax oder Aufbau dieser Abfragesprache zu haben.

In einem ersten Schritt wird das Ergebnis der Prozessbewertung aus dem vorangegangenen Abschnitt auf die Anwendbarkeit datengetriebener Methoden hin untersucht. Es ist möglich, dass Unternehmen bei der allgemeinen Bewertung der digitalen Transformation gut abschneiden, ihre Prozesse aber bislang nicht weit genug entwickelt sind, um alle Arten von datengetriebenen Methoden direkt anzuwenden. Daher werden in einem zweiten Schritt Mindestanforderungen an die Bewertungskriterien festgelegt. Diese müssen von den Unternehmen erfüllt werden, um datengetriebene Methoden wirtschaftlich und technologisch sinnvoll einsetzen zu können. Anhand von Methodenschablonen können Unternehmen evaluieren, welche Voraussetzungen für den jeweiligen Typ von datengetriebenen Methoden erforderlich sind.

Es lassen sich vier zentrale Ansätze für den Einsatz von datengetriebenen Methoden identifizieren. Zur einfachen Vermittlung der Potenziale datengetriebener Methoden können diese Ansätze verständlich und praxisnah formuliert werden:

1. Vorhersage von Werten und Eigenschaften.
2. Erkennen von Zusammenhängen und Mustern.
3. Nutzung existierender Daten als Basis für neue Produktgenerationen.
4. Unterstützung von Entscheidungen.

Anhand dieser Anwendungsaufgaben können datengetriebene Methoden klassifiziert werden. Unternehmen erfahren so, welche Methoden bereits im konkreten Prozess eingesetzt werden können und haben zudem einen direkten Vergleich, an welchen Stellen die digitale Transformation vorangetrieben werden sollte. Zur Auswahl der Methoden sind zusätzlich noch Informationen über Daten und Aufgaben notwendig, weshalb zusätzlich Aufgabencluster identifiziert werden, um diese Aspekte zu erfassen.

Entwicklung von Aufgabenclustern und Zuordnung datengetriebener Methoden

Produktentwicklungsprozesse laufen zwar individuell ab, dennoch gibt es übergeordnete Teilaufgaben, die in allen Prozessen vorhanden sind und ähnlich ablaufen. Diese Aufgabencluster der Produktentwicklung wurden analysiert, um darauf aufbauend datengetriebene Methoden den Clustern zuzuordnen, die die Aufgaben unterstützen können. Ziel der Clusteranalyse ist es, Tätigkeiten im Produktentwicklungsprozess zu identifizieren, die sowohl in verschiedenen Entwicklungsschritten als auch in verschiede-

nen Abteilungen auftreten. Da als Datenbasis lediglich wenige Realprozesse zur Verfügung stehen, wurde zusätzlich der methodische Entwicklungsprozess berücksichtigt. Zu Beginn der Clusteranalyse steht die Identifikation geeigneter Zielgrößen zur Unterscheidung der individuellen Cluster. Diese Zielgrößen sollen darauf abzielen, eine spätere Zuordnung datengetriebener Methoden und Werkzeuge zu ermöglichen. Hierbei handelt es sich um verwendete Programme und korrespondierende Datenformate, Wissensarbeit, wiederkehrende Tätigkeiten, Datenqualität und Datentypumwandlungen. Die Cluster wurden nach der initialen Definition im Rahmen eines Workshops validiert und angepasst. Zusätzlich wurden diese zusammen mit den Industriepartnern auf Praxisrelevanz überprüft. Der Fokus liegt in diesen Clustern auf der durchzuführenden Aufgabe, wobei das Ergebnis der Arbeitsschritte abstrakt in die Clusterbildung einfließt. Da Iterationen und Fehlerkorrekturen Schleifen zurück auf bereits durchgeführte Prozessschritte darstellen, werden diese nicht separat als Cluster erfasst. Die Cluster werden nachfolgend eingeführt. Eine Zusammenfassung ist zusätzlich der Tabelle A8 in Anhang zu entnehmen.

1. Erstellung von Berichten, Reports und (Entwicklungs-)Dokumentation Zentrales Ziel ist die Dokumentation des Entwicklungsprozesses. Hierbei wird ein Ingenieursdatentyp (CAD-Part, FEM-Ergebnis etc.) zu einem Berichtsdatentyp (Powerpoint oder PDF) umgewandelt. Die Aufgaben werden als monotone, repetitive Arbeit ohne nennenswerten Wissensanteil gesehen.

2. Freigaben Auf Basis von Berichten (Input) werden hier Ergebnisse bewertet und entweder regelbasiert oder aufgrund von individuellen Erfahrungen Entscheidungen (Output) getroffen. Der Anteil der Wissensarbeit ist hierbei nicht klar zuzuordnen.

3. Nachbildung von Zusammenhängen Basierend auf dem Wissen der Mitarbeitenden werden aus ingenieurstechnischen Inputs dazu passende Outputs erzeugt. Die Aufgaben sind hochgradig wissensbasiert und bedürfen sehr viel Erfahrungswissen. Beispiele sind hier die Transformation von Anforderungen in Geometrie oder die Einschätzung von Verformungen.

4. Nutzung bestehender Daten als Basis Im Unterschied zum vorangegangenen Cluster liegt der Fokus hier auf der Nutzung bestehender Daten der gleichen Aufgabe (z. B. Geometrie) als Basis für neue Entwicklungsgenerationen oder der Analyse bestehender Daten zur Informationsgewinnung. Zusätzlich ist hier die Analyse weiterer Daten (beispielsweise Marktdaten) zur Informationsgewinnung verortet. Es handelt sich nicht um klassische Wissensarbeit, beinhaltet aber Erfahrungswissen der Mitarbeitenden.

5. Analyse und Bewertung von Ergebnissen Hier steht die Auswertung von Messberichten und Simulationen im Vordergrund. Als Input dient ein Ergebnisformat, oftmals in grafischer oder numerischer Form, als Output wird eine abstrakte und wissensbasierte Plausibilitäts- oder Güteabschätzung getroffen und eine Schlussfolgerung z. B. im Hinblick auf die Bauteilqualität getroffen. Die Überführung der Erkenntnisse in formale Entwicklungsberichte erfolgt in Cluster 1.1.

6. Rückfluss von Erfahrungen in Wissensmanagementsysteme In diesem Cluster steht die Pflege von Wissensmanagementsystemen zur Bereitstellung gesammelten Wissens in späteren Entwicklungsprozessen im Vordergrund. Hierbei handelt es sich um eine repetitive Arbeit, die als Input Wissen und Erfahrung benötigt und diese in formalisiertes Wissen umwandelt.

7. Beauftragung nach- /untergeordneter Stellen Hier steht die Weitergabe von Informationen an Subunternehmer oder nachgeordnete Abteilungen im Vordergrund, mit dem Ziel der Reduktion der eigenen Arbeitsbelastung durch Outsourcing.

8. Daten- und Informationsbeschaffung /Rückfragen Bei diesem Aufgabentyp handelt es sich nicht um eine wertschöpfende Tätigkeit, sondern um Tätigkeiten als Grundlage unter anderem für die Cluster 3 und 4, da hierbei lediglich bereits bestehende Daten- oder Informationen beschafft, nicht aber neu generiert werden. Außerdem resultieren diese Aufgaben aus fehlenden Informationen aus vorhergehenden Entwicklungsschritten und sind oft mit Wartezeiten verbunden.

Zwischenfazit Kapitel 5.1.4

Im Rahmen dieser Phase erfolgt die Analyse von Potenzialen zur Integration von Digital-Engineering-Methoden anhand von Methoden- und Aufgabenclustern. Phase 3 präsentiert eine strukturierte Vorgehensweise zur Potenzialanalyse von datengetriebenen Methoden in virtuellen Produktentwicklungsprozessen. Das Ziel ist die Identifizierung von Anwendungsfällen und geeigneten Methoden für die Integration in diese Fälle. Die entwickelten Aufgabencluster ermöglichen es, die Anwendbarkeit datengetriebener Methoden in verschiedenen Teilaufgaben der Produktentwicklung zu prüfen. Hierbei werden Mindestanforderungen an die Bewertungskriterien festgelegt, um sicherzustellen, dass Unternehmen die erforderlichen Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen und technologisch sinnvollen Einsatz datenge-

triebener Methoden erfüllen. Die vier identifizierten Ansätze für den Einsatz datengetriebener Methoden bieten eine klare Struktur für die Klassifizierung dieser Methoden. Diese Klassifizierung ermöglicht es Unternehmen, gezielt zu evaluieren, welche Methoden in ihren konkreten Prozessen bereits Anwendung finden können und wo eine weitere digitale Prozessverbesserung erfolgen sollte. Insgesamt liefert Phase 3 eine solide Grundlage für die strategische Planung von Unternehmen im Umgang mit datengetriebenen Methoden. Die strukturierte Bewertung ermöglicht es, das Potenzial dieser Methoden effizient zu nutzen und gezielt in die digitale Transformation einzubinden.

5.1.5 Phase 4: Integration datengetriebener Methoden

Der letzte Schritt ist die eigentliche Umgestaltung der Prozesse. Pilotprojekte in Zusammenarbeit mit vergleichbaren Unternehmen oder Forschungseinrichtungen können hier besonders hilfreich sein. Zusätzlich ist während dieser Phase besonders wichtig, die Anforderungen und Wünsche der beteiligten Stakeholder (z. B. Management, Nutzer, IT) von Beginn an zu berücksichtigen, um eine erfolgreiche Integration und spätere Nutzung zu gewährleisten.

Ziel und Ergebnis Ziel ist die praktische Integration datengetriebener Methoden in den Prozess. So wird nach dieser Phase ein implementierter Pilotprozess mit integrierter Digital-Engineering-Methode realisiert.

Methoden Im Gegensatz zu den vorangegangenen Phasen kann die vierte Phase keine standardisierte Umsetzungsunterstützung bieten, obwohl Methoden wie der CRISP-DM [168] für einige Problemstellungen einen Leitfaden bieten können. Jedes Unternehmen hat seine eigenen individuellen Kompetenzen und Schwächen, die bei der Implementierung und Umsetzung berücksichtigt werden müssen. Je nach Anwendungsfall kann das Outsourcing für Unternehmen mit geringer Qualifikation Zeit und Geld sparen. Unternehmen können auch nur den Algorithmus als Dienstleistung beziehen und die Anpassung und Schulung durch eigene Mitarbeiter durchführen lassen. Der Begriff der Anpassung soll in diesem Kontext weiter geklärt werden. Um datengetriebene Methoden in bestehende Gestaltungsprozesse zu integrieren, müssen sie an die gegebenen Unternehmensinfrastrukturen und -spezialitäten angepasst werden. Die Methoden selbst werden hierbei nicht verändert und es werden auch keine neuen Digital-Engineering-Algorithmen implementiert. Diese Anpassung wird als „Customizing“ von Methoden bezeichnet. Um genau zu sein, ist eine datengetriebene Methode als Blackbox zu betrachten und kann von den KMU von vornherein nicht ange-

passt werden, da sie bereits implementiert ist. Daher muss eine Anpassung der Schnittstellen vorgenommen werden. Zu diesem Zweck wird die Digital-Engineering-Methode in einen Programmrahmen eingebettet, wie in Bild 42 dargestellt. In diesem Framework können die Schnittstellen implementiert werden. Eine erste Schnittstelle wird zur „IT-Systemschulung“ benötigt, die die Modellschulung übernimmt. Hierfür wird in der Regel ein System mit hoher Rechenleistung benötigt, das entweder im Unternehmen vorhanden ist oder z. B. über Cloud-Hosting-Dienste im „as-a-service“-Modell bezogen werden kann. Ferner muss das Programmframework die Integration in den bestehenden Prozessablauf ermöglichen und eine möglichst nahtlose Einbindung in die bestehende Prozess- und Softwarelandschaft realisieren. Dies erfordert eine Mensch-Maschine-Schnittstelle bzw. eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) zur Bedienung des Systems durch die Anwender, die in der Schnittstelle „IT-Systemnutzung“ realisiert wird. Digital-Engineering-Methoden arbeiten immer auf der Basis von Daten sowohl auf der Input- als auch auf der Output-Seite, weshalb weitere Schnittstellen notwendig sind. Im Block „Digital-Engineering-Methode“ erfolgt die eigentliche Datenauswertung bzw. „Datenanalytik“. Eingangsdaten müssen identifiziert, konvertiert und zur Verfügung gestellt werden. Es muss also ein Datenhandling implementiert werden. Auch die Ausgangsdaten müssen im ersten Schritt identifiziert werden, um festzulegen, welche Ergebnisse ermittelt werden sollen. Anschließend müssen die Ergebnisse generiert und dargestellt werden. Weiterhin verfügen die Unternehmen in der Regel über Datenverwaltungssysteme, die ebenfalls an das Programmframework angebunden werden müssen. So wird sichergestellt, dass auf die benötigten Daten zugegriffen werden können.

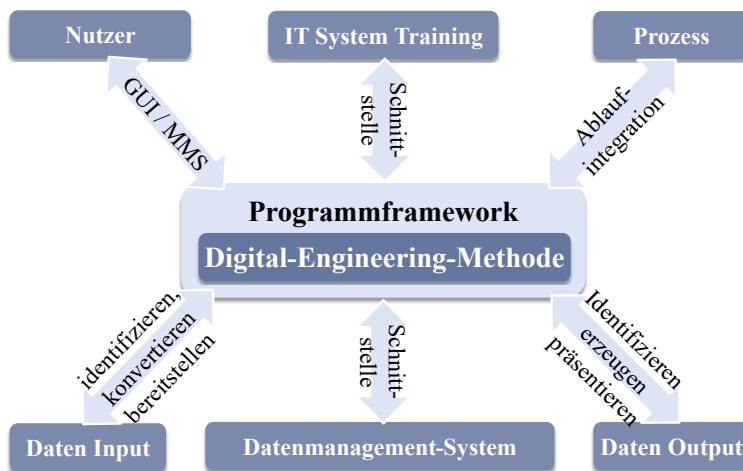


Bild 42: Customizing Schnittstellen zur Integration von Digital-Engineering-Methoden

Zwischenfazit Kapitel 5.1.5

Die vierte Phase des Integrationsprozesses datengetriebener Methoden ist entscheidend für die erfolgreiche Implementierung im Unternehmenskontext. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Digital-Engineering-Methoden praktisch in bestehende Prozesse zu integrieren und somit einen implementierten Pilotprozess zu realisieren. Diese Phase erfordert eine individuelle Herangehensweise, da Unternehmen unterschiedliche Kompetenzen und Schwächen aufweisen, die bei der Umsetzung berücksichtigt werden müssen. Nach dieser Phase wird eine maßgeschneiderte Digital-Engineering-Methode in den Entwicklungsprozess integriert und unterstützt bei Engpässen. Besonders wichtig ist es, die Mitarbeiter in der frühen Planungsphase direkt einzubinden. Dies erhöht nicht nur die Motivation der Mitarbeiter, sondern sorgt auch für einen Informations- und Wissensaustausch. Gerade wenn externe Anbieter die Integration der Methoden unterstützen, sind die Erfahrungen aus dem Prozessalltag dringend erforderlich.

5.2 **Ontologie zur Verknüpfung von DE und Produktentwicklung**

Unternehmen müssen, insbesondere während Phase 3 der vorgestellten Gesamtmethodik, über Informationen zu anwendbaren Methoden und Anwendungsfällen verfügen, um datengetriebene Methoden erfolgreich in etablierte Produktentwicklungsprozesse zu integrieren. Derzeit ist dieses Wissen mühsam aus verschiedenen Quellen zu beschaffen. Zudem liefern diese Quellen nur isoliertes Wissen, das nicht mit Anwendungsfällen oder „Best Practices“ verknüpft ist, was die Hürden für eine erfolgreiche Transformation erhöht. Die neue Ontologie soll dazu beitragen Unternehmen, speziell KMU, die wenig oder keine Erfahrung mit datengesteuerten Techniken haben, einen Überblick über diese Methoden und Werkzeuge gibt. Sie soll Unternehmen bei der Auswahl einer geeigneten Technik für den Einsatz in einem ihrer Produktentwicklungsprozesse unterstützen und so diese wichtige Transformation erleichtern. Die Ontologie ist somit eine Wissenssammlung für datengetriebene Techniken, Toolboxen, Werkzeuge und Methoden im Kontext der Produktentwicklung. Der zentrale Zweck dieser Ontologie besteht darin, die beiden Domänen der datengetriebenen Methoden und der Produktentwicklungsprozesse semantisch und formal zu verbinden. Zur Entwicklung der Ontologie wurden initiale Szenarien definiert, wie von USCHOLD und GRUNNINGER [333] vorgeschlagen. Diese Szenarien werden zusätzlich mit

Kompetenzfragen (KF) erweitert, um eine spätere Evaluation zu ermöglichen. Die nachfolgenden Szenarien und KFs wurden definiert:

1. *Szenario 1: Use Case Erfassung:* Vermeiden von Neuimplementierung, da die Ontologie Abfragen über bereits implementierte Lösungen für verschiedene Probleme und Anwendungsfälle beantwortet.
KF: Gibt es eine Lösung für die Vorhersage von Fertigungsmöglichkeiten auf der Grundlage von Testdaten und CAD-Dateien?
2. *Szenario 2: Identifikation von passenden Methoden:* Die Ontologie soll in der Lage sein, die Frage zu beantworten, welche Methode für die gegebenen Voraussetzungen geeignet ist. Dies ist wichtig, da verfügbare datengetriebene Methoden jeweils unterschiedliche Daten und IT-Infrastruktur benötigen. Außerdem sind sie nur für spezifische Aufgaben geeignet.
KF: Welche Methode und welches Tool kann Simulationsingenieure bei der Abschätzung von FEM-Ergebnissen auf Basis einer CAD-Parameterkonfiguration unterstützen?

5.2.1 Terminologie

Die Ontologie selbst besteht aus vier zentralen Konzepten – *Menschen, Prozess, Methode* und *Anwendung* – die gemäß dem „middle-out-approach“ [333] weiter spezifiziert und generalisiert werden. Diese Herangehensweise ermöglicht eine effiziente Modellierung, da sie sowohl die Spezialisierung der Klassen als auch deren Generalisierung gleichermaßen berücksichtigt, was zu einer flexiblen und dennoch präzisen Strukturierung der Ontologie führt. Die Ontologie mit den zentralen Konzepten ist in Bild 43 dargestellt und bietet eine visuelle Übersicht über die Beziehungen und Interaktionen zwischen den Kernkonzepten.

Für die Kennzeichnung von AI4PD-Konzepten wird die „PascalCase“-Schreibweise verwendet, wobei AI4PD als Präfix für den Internationalized-Resource-Identifier (IRI) verwendet wird. Diese Schreibweise erleichtert die Identifikation und Wiederverwendung von Konzepten innerhalb der Ontologie und sorgt für eine klare und konsistente Namensgebung. Hierbei erfolgt durch die Klasse *TaskCluster* die Verbindung zwischen *Prozess* und *Methode*, während *Data* die Konzepte *Anwendung* und *Prozess* verknüpft. Im Folgenden werden die einzelnen Klassen eingeführt und erklärt. Die detaillierten Klassendefinitionen sind im Anhang 168 – 171 dargestellt. Die formale Repräsentation der Ontologie erfolgt in der Web-Ontologie-Sprache OWL 2 DL [334] und wurde im Ontologie-Editor Protégé [335] modelliert.

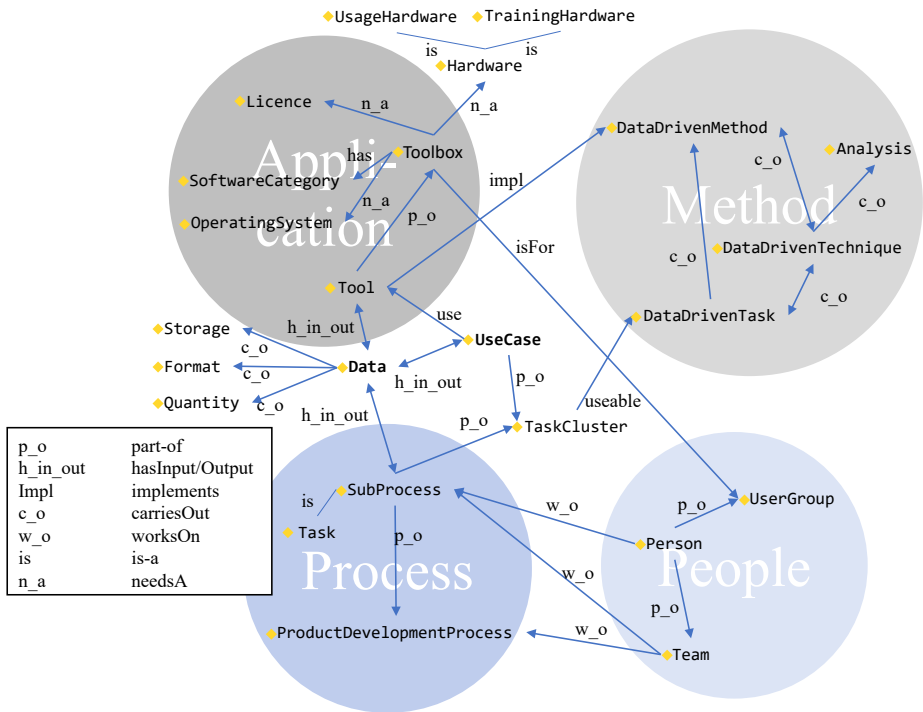


Bild 43: Digital Engineering Ontologie AI4PD [P10] (gelbe Rauten symbolisieren Kernkonzepte).

Hauptkonzept Anwendung

Das Hauptkonzept *Anwendung* umfasst Tools und Toolboxes zur Nutzung datengetriebener Methoden, wie in Bild 44 dargestellt.

Da eine datengetriebene Methode als ein (theoretischer) Algorithmus oder ein Konzept betrachtet werden kann, muss diese in einem *Tool* implementiert werden, um sie nutzbar zu machen. Außerdem setzt ein *Tool* implizit eine datengetriebene Aufgabe ein. Hierzu benötigt es initial Eingabedaten und produziert anschließend Ausgabedaten.

Im Allgemeinen wird ein *Tool* nicht allein stehend veröffentlicht, sondern in einer *Toolbox* gesammelt. Diese kann aus mehreren *Tools* bestehen, die jeweils einen bestimmten Algorithmus implementieren. Die Softwareplattform SAS²³ kann beispielsweise als eine *Toolbox* angesehen werden, da sie mehrere verschiedene *Tools* umfasst, die datengetriebene Methoden wie Entscheidungsbäume oder Support-Vector-Maschinen realisieren.

²³ <https://www.sas.com>

Ein weiteres Beispiel ist das bekannte maschinelle Lernpaket Scikit-learn^{24,25}. Eine *Toolbox* läuft auf verschiedenen Betriebssystemen und verwendet eine spezifische Programmiersprache. Einige Toolboxes nutzen kommerzielle Lizenzen, während andere Freeware oder Open Source sind. Jede Instanz nutzt jedoch eine bestimmte Hardware für Training und Nutzung und richten sich an eine bestimmte Nutzergruppe.

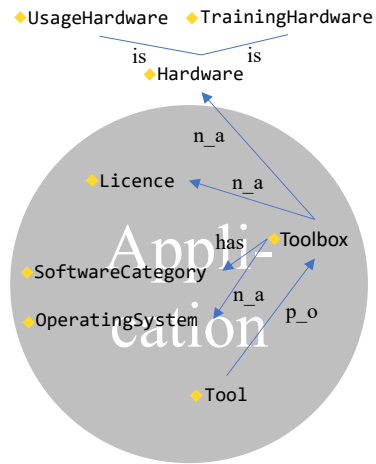


Bild 44: Spezifizierung des Hauptkonzeptes Anwendung.

Hauptkonzept Methode

Im Hauptkonzept Methode werden datengetriebene Methoden, datengetriebene Aufgaben und Techniken erfasst und in Bild 45 dargestellt. Die Unterscheidung und Abgrenzung dieser Begrifflichkeiten wird im Folgenden dargestellt.

Die datengetriebenen Techniken (*DataDrivenTechnique*) stellen eine erste Abstraktionsebene dar, in der ein allgemeiner Hauptzweck definiert wird. Dieser Zweck kann die Handhabung von Daten oder Modellen sowie die Modellierung sein. Außerdem können datengetriebene Techniken Analysen durchführen und werden durch eine datengetriebene Aufgabe verwendet. Die datengetriebenen Techniken geben lediglich eine erste Unterscheidung aller verfügbaren Möglichkeiten und werden in der nächsten Schicht, den datengetriebenen Aufgaben (*DataDrivenTask*) weiter detailliert. Hier wird die Gesamtaufgabe spezifiziert, mit der die zugrundeliegende datengetriebene Methode arbeitet. Auf dieser Ebene werden Begriffe wie Assoziation, Klassifikation, Clustering oder überwachtes Lernen angesiedelt²⁶. Die eigentlichen datengetriebenen Metho-

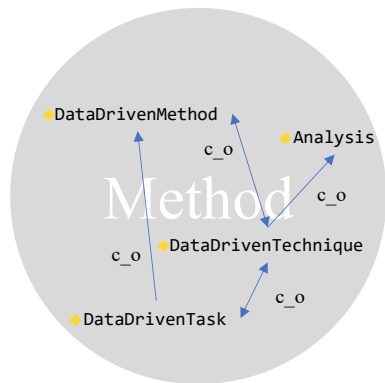


Bild 45: Spezifizierung des Hauptkonzeptes Methode.

²⁴ <https://scikit-learn.org>

²⁵ Einen Überblick über verschiedene Toolboxes bieten Bild 10 und die Tabellen A1 und A2.

²⁶ Datengetriebene Aufgaben werden in Bild 5 als hellblaue Kästen dargestellt.

den (*DataDrivenMethod*) analysieren Daten oder führen auf Basis von Daten Vorhersagen durch. Da die möglichen Eingangsdaten durch das verwendete Tool definiert werden, erfolgt die Verbindung zu den Daten über die Tool-Klasse und nicht direkt von der Methode zu den Daten. Datengetriebene Methoden unterscheiden sich in Aspekten wie Trainingszeit und Genauigkeit. Weiterhin kann eine Unterscheidung getroffen werden im Hinblick darauf, ob eine Methode neue Daten vorhersagen kann oder lediglich bestehende Daten auswertet. Beispiele für diese datengetriebene Methoden²⁷ sind Algorithmen wie k-Nearest-Neighbour oder künstliche Neuronale Netze.

Hauptkonzept *Prozess*

Im Konzept der Prozesse (siehe Bild 46) sind der Produktentwicklungsprozess, Unterprozesse und Aufgaben abgebildet, die im Folgenden eingeführt werden.

Der Produktentwicklungsprozess (*ProductDevelopmentProcess*) besteht aus Phasen und Meilensteinen. Diese Prozesse werden weiter untergliedert, wodurch Teilprozesse (*SubProcess*) entstehen, die durch Teams (*Team*) bearbeitet werden. Der Teilprozess selbst ist in zwei oder mehrerer weitere Teilprozesse oder in einzelnen Aufgaben (*Task*) unterteilbar. Diese Aufgaben stellen die kleinste unteilbare Einheit dar, in der Prozesse dargestellt werden können. Eine Aufgabe ist Teil von genau einem Teilprozess und wird gleichgesetzt mit der *prov:Activity* Klasse der PROV-Ontologie [101]. Aufgaben und Prozesse benötigen Eingangs- und Ausgangsdaten (*Data*) und werden durch ein *Team* oder durch einzelne Personen (*Person*) bearbeitet. Zusätzlich ist jeder Teilprozess Teil eines Aufgabenclusters (*TaskCluster*).

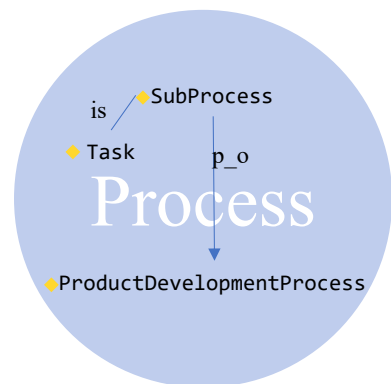


Bild 46: Spezifizierung des Hauptkonzeptes Prozess.

Hauptkonzept *Menschen*

Das Hauptkonzept Menschen umfasst Teams und Personen, die in der Produktentwicklung arbeiten. Außerdem wird innerhalb des Konzeptes die Nutzergruppe eingeführt. Das gesamte Konzept ist in Bild 47 dargestellt.

²⁷ Bild 5 stellt datengetriebene Methoden als weiße Kästen dar.

Ein Produktentwicklungsteam (*Team*) besteht aus mehreren Teammitgliedern, die jeweils über Fachwissen und Qualifikationen verfügen. Zudem arbeitet ein Team an einem oder mehreren Produktentwicklungsprozessen oder Teilprozessen gleichzeitig. Für Personen (*Person*) und Verbindungen zwischen ihnen bietet die „friends-of-a-friend“ (FOAF) Ontologie [102] einen guten Einblick.

Daher wird die Klasse *foaf:Person* als Äquivalent zur Klasse *Person* gesetzt. Die FOAF-Eigenschaften werden nicht aufgeführt, um Bild 43 auf Seite 105 leichter lesbar zu halten. Bei der Identifikation und Implementierung geeigneter datengetriebener Methoden ist die FOAF-Ontologie unzureichend; hier sind weitere Details erforderlich. Das Person-Konzept wird durch die Definition einer Nutzergruppe (*UserGroup*) erweitert, um Hintergrundwissen (z. B. Programmierung, Simulation, Management) zuzuordnen. Zusätzlich arbeitet eine Person an einer Aufgabe und ist Teil eines Teams.

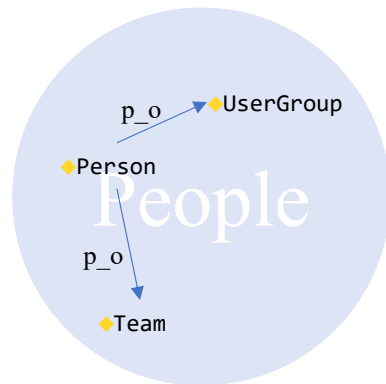


Bild 47: Spezifizierung des Hauptkonzeptes Menschen.

Verknüpfung der Hauptkonzepte

Wie eingangs bereits erklärt, erfolgt die Verknüpfung der vier Hauptkonzepte über Daten, Aufgabencluster und Use Cases. Diese Elemente werden in diesem Kapitel eingeführt.

Daten (*Data*) werden in einem bestimmten Format und im Rahmen eines Teilprozesses oder einer Aufgabe erzeugt. Sie weisen eine bestimmte Qualität oder Vollständigkeit auf, die bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen. Das Datenkonzept wird in den Bereichen *ASCIIData*, Dokumente (*Document*) und spezifische Ingenieursdatentypen (*EngineeringData*) weiter spezifiziert, wie in Bild 48 dargestellt. Diese spezifizierten Datentypen lassen sich teilweise ineinander konvertieren. Dies ist notwendig, da diese allgemeinen Datentypen einen wesentlichen Einfluss auf die einsetzbaren datengetriebenen Methoden haben.

Die Aufgabencluster sind nötig, da Prozesse im Detail oftmals sehr unterschiedlich aufgebaut sind, was Aussagen über die Anwendbarkeit datengetriebener Methoden bei gewissen Aufgaben erschwert. Aufgabencluster ermöglichen eine Abstraktion und Generalisierung individueller Prozesse, insbesondere in Bezug auf Eingangs- und Ausgangsdaten sowie benutzter

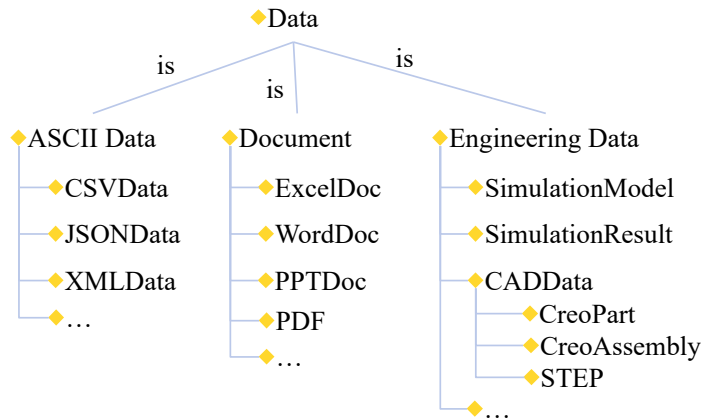


Bild 48: Spezifizierung des Datenkonzepts.

IT-Systeme oder Anwendungen. Die Cluster fokussieren sich hierbei auf dem übergeordneten Ziel und nutzen die nötigen und verwendeten Daten in abstrakter Form (z. B. Ingenieursdatentyp oder ASCII-Daten).

5.2.2 Bewertung und Ergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel werden anhand von zwei Use Cases der Nutzen der entwickelten Ontologie dargestellt und die eingangs definierten KFs beantwortet.

Szenario 1: Use Case Erfassung

Wie bereits zu Beginn erwähnt, stellt die Erfassung und Identifikation erfolgreicher Implementierungen datengetriebener Methoden in der Produktentwicklung eine zentrale Herausforderung dar. Dies liegt insbesondere daran, dass derzeit in Industrie und Forschung keine standardisierte Dokumentation von Anwendungsfällen existiert. Die Ontologie AI4PD ermöglicht die Verknüpfung relevanter Domänen und erleichtert die Beschreibung von Anwendungsfällen. Dafür sind Angaben zum Produktentwicklungsprozess, den verwendeten Tools und Toolboxen sowie den angewandten Methoden erforderlich. Zusätzlich müssen die benötigten Eingangs- und die daraus resultierenden Ausgangsdaten erfasst werden.

Die Effizienz der Use Case Erfassung wird am Beispiel des selbstlernenden Assistenzsystems (SLASSY) [191] verdeutlicht. SLASSY unterstützt Konstrukteure bei der Entwicklung von Blechteilen mit zusätzlichen Funktionselementen, die durch Blechmassivumformung hergestellt werden. Ein zentraler

Aspekt dieses Systems ist die selbstlernende Komponente, die es ermöglicht, Wissen aus vorhandenen Daten in Form von Metamodellen automatisch zu extrahieren. Diese Extraktion erfolgt durch einen Prozess der Wissensentdeckung in Datenbanken (KDD) auf Basis von Simulations- und Versuchsergebnissen. Der Prozess mündet in einem regressionsbasierten Vorhersagemodell. Das System selbst ist in ein Synthese- und ein Analysemodul unterteilt. Da diese Module unterschiedliche Ziele verfolgen, wird in diesem Beitrag nur das Analysemodul näher betrachtet. Bild 49 zeigt die formale Darstellung von SLASSY.

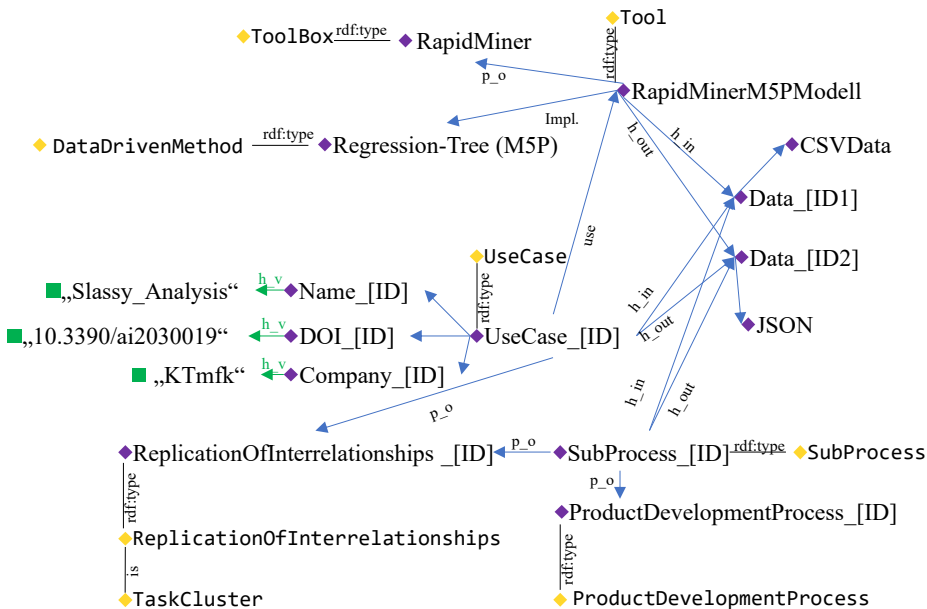


Bild 49: Formaler Aufbau des SLASSY-Anwendungsfalles. (Kernkonzepte: gelbe Rauten, Beziehungen: blaue Pfeile, einzelne Instanzen eines Konzeptes: lila Rauten, Eigenschaften: grüne Quadrate).

Die Beschreibung des Anwendungsfalles umfasst die Eigenschaften Name, Digital Object Identifier (DOI) und Unternehmen mit ihren definierten Werten. SLASSY ist dem Aufgabencluster "Nachbildung von Zusammenhängen" zugeordnet. Der explizite Teilprozess wird durch eine SubProcess_[ID]-Instanz modelliert und nicht benannt, da für die Anwendung von SLASSY mehrere Aufgaben oder Teilprozesse möglich sind. Bild 49 zeigt, dass die Dateninstanzen die Instanzen Tool, Prozess und Use Case verbinden. Hierbei werden Eingangs- und Ausgangsdaten getrennt modelliert. Data_[ID1] repräsentiert den Eingabesatz, formatiert als „kommagetrennte Datei (CSV)“. In dieser Datei werden die Ergebnisse der Testdaten gespeichert. Data_[ID2]

stellt die Ausgangsdaten im JavaScript Object Notation (JSON)-Format dar. Das Ergebnis sagt die Fertigungsmöglichkeiten für die gegebene CAD-Datei voraus. SLASSY nutzt das Tool „RapidMinerRegressionModel“, das Teil der „RapidMiner“-Toolbox ist und die datengetriebene Methode „Polynomial Regression“ implementiert. Mit diesem formalen Aufbau sind alle notwendigen Informationen verfügbar, um die im Szenario 1 gestellte Kompetenzfrage durch die Ontologie zu beantworten.

Szenario 2: Identifikation von passenden Methoden

Der zentrale Aspekt und eine Erweiterung des Anwendungsfalls 1 besteht darin, geeignete Methoden zur Lösung von Problemen in individuellen Produktentwicklungsprozessen zu identifizieren. Daher wird die Ontologie verwendet, um die gespeicherten Daten und Anwendungsfälle abzufragen. Während eines Prozessoptimierungsprozesses analysiert der Projektleiter den gegebenen Prozess, um Schwachstellen zu identifizieren. Auf Basis des relevanten Teilprozesses ist es möglich, die verfügbaren Daten zu identifizieren, vorausgesetzt sie wurden erfasst. In Verbindung mit dem Aufgabencluster können geeignete datengetriebene Aufgaben, datengetriebene Methoden und Tools identifiziert werden. Die folgende Ausgangssituation wird angenommen: Eine Simulationsabteilung wird als Engpass im Produktentwicklungsprozess identifiziert. Insbesondere haben Iterationen mit der Konstruktionsabteilung zu einer hohen Arbeitsbelastung und Verzögerungen geführt. Dies ist besonders in der Anfangsphase des Produktentwicklungsprozesses kritisch, da viele verschiedene Konzepte schnell bewertet werden sollen. Der relevante Teilprozess besteht darin, die Konfiguration eines Designs, das in einer parametrischen CAD-Datei dargestellt ist, in eine FEM-Simulation zu übertragen. Die erhaltenen Simulationsergebnisse werden in einem Simulationsdatenmanagement (SDM)-System als Simulationsergebnisse gespeichert. Die Ergebnisse können in numerische Verschiebungsinformationen auf Basis von ASCII-Daten transformiert werden. Für das Training steht eine leistungsstarke Maschine zur Verfügung, die auf starke Grafikprozessoren zurückgreifen kann. Die spätere Nutzung sollte mit geringer Rechenleistung und über eine Befehlszeilenlösung möglich sein. Tabelle 7 gibt eine Zusammenfassung der formalen Beschreibung.

Die Implementierung dieser Beschreibung in eine Anfrage mit SPARQL 1.1-Abfragesprache²⁸ erlaubt die Suche nach geeigneten Methoden und Werkzeugen, um diesen Vorgang zu unterstützen. Die verwendete Abfrage wird in Listing 5.1 gezeigt.

²⁸ <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>

Tabelle 7: Formale Problembeschreibung

Konzept	Wert
Team	Simulation Department
SubProcess	Simulation
DataIn.Format	CAD-Data \cap Numerical parameters
DataIn.Storage	PDM System
DataOut.Format	FEM Result \cap Numerical value
DataOut.Storage	SDM System
TrainingHardware	GPU-based
UsageHardware	low computing \cup command line

Der SELECT-Ausdruck fragt drei Variablen ab, die mit dem WHERE-Ausdruck gemäß den Bedingungen in Tabelle 7 gefiltert werden. Aufgrund der Verwendung von Methoden und Werkzeugen aus SLASSY werden die eingesetzten Techniken und Werkzeuge dargestellt, welche zur Lösung des beschriebenen Problems beitragen sollen. Dies ist auch die Antwort auf die Kompetenzfrage aus Szenario 2. Die Ausgabe in Tabelle 8 zeigt die identifizierte Methode. Es ist möglich, mehr als eine Methode zu identifizieren, da eine datengetriebene Methode in unterschiedlichen Tools implementiert werden kann. In diesem Fall ist es ratsam, eine zusätzliche Filterung vorzunehmen, um etwa ausschließlich Freeware zu berücksichtigen. Die Filterung sollte nach den Zielen oder internen Anforderungen des Unternehmens erfolgen.

Listing 5.1: SPARQL Select Abfrage.

```

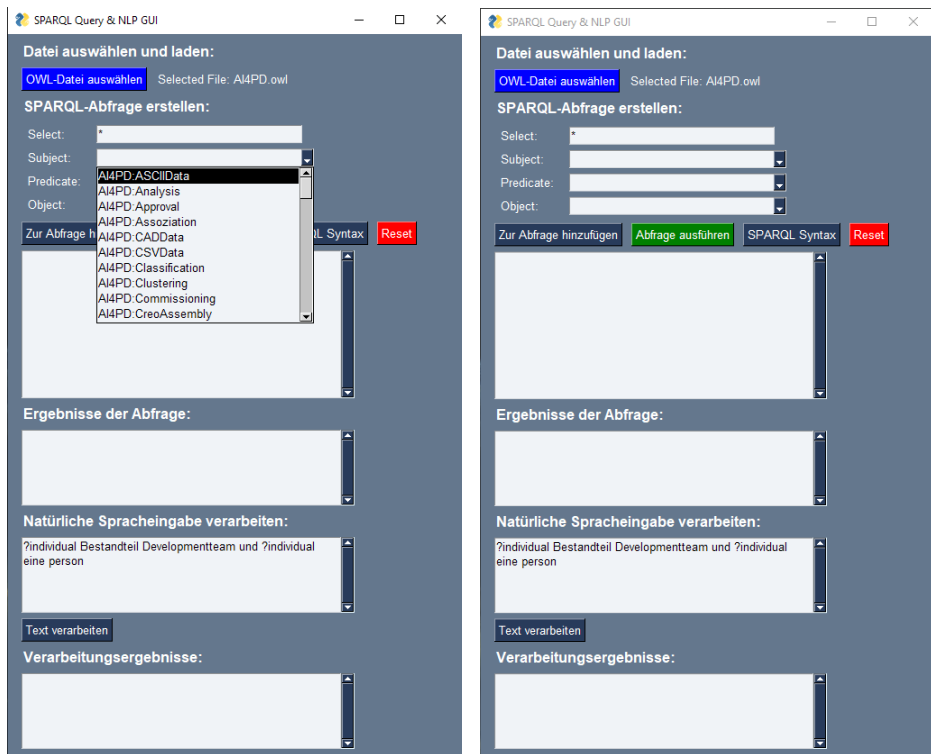
SELECT ?DataDrivenTask, ?DataDrivenMethod, ?DataDrivenTool
WHERE {
  ?AI4PD:Team AI4PD:hasValue SimulationDepartment
  ?AI4PD:SubProcess AI4PD:hasValue Simulation
  ?AI4PD:DataIn;
  AI4PD:hasFormat AI4PD:CADDData || AI4PD:CSVData
  AI4PD:hasStorage AI4PD:PDM-System
  ?AI4PD:DataOut;
  AI4PD:hasFormat AI4PD:FEMResult || AI4PD:CSVData
  AI4PD:hasStorage AI4PD:SDM-System
  ?AI4PD:TrainingHardware AI4PD:hasValue GPUBased
  ?AI4PD:UsageHardware;
  AI4PD:hasComputingPower AI4PD:lowComputing &&
  AI4PD:hasInterface AI4PD:commandLine
}

```

Tabelle 8: Beispielhafte Ausgabe für die Abfrage in Listing 5.1.

DataDrivenTask	DataDrivenMethod	DataDrivenTool
Regression	Regression-Tree (M5P)	RapidMinerM5PModell

Die Implementierung von SPARQL-Abfragen stellt unerfahrene Anwender vor große Herausforderungen. Angesichts dessen wurde eine nutzerfreundliche Alternative geschaffen, die auf einer integrierten Schnittstelle zwischen Semantic-Web-Technologien, Natural Language Processing (NLP) und gesteuerten Vokabularien basiert und auf der in Bild 50 dargestellten grafischen Benutzeroberfläche basiert.



(a) Dropdown Eingabe

(b) NLP Eingabe

Bild 50: Darstellung der entwickelten GUI zur Interaktion mit der Ontologie AI4PD.

Im Zentrum des Systems steht die Benutzerinteraktion, die durch zwei parallele Ansätze ermöglicht wird: Eingaben basierend auf Natural Language Processing (NLP) und die Auswahl über Dropdown-Menüs. NLP-basierte Eingaben (vgl. Bild 50b) ermöglichen es Benutzern, ihre Anfragen in natürlicher Sprache zu formulieren. Das System analysiert und identifiziert relevante

Teile für die SPARQL-Abfrage. Die Integration von OpenThesaurus erweitert das Vokabular, indem sie Synonyme und verwandte Begriffe verarbeitet. Dies verbessert die Zugänglichkeit für Nutzer, die nicht mit der spezifischen Terminologie der Ontologie vertraut sind. Alternativ dazu können Benutzer über Dropdown-Menüs mit Subjekten, Prädikaten und Objekten interagieren (vgl. Bild 50a). Diese strukturierte Methode minimiert Fehler und ermöglicht eine schrittweise Konstruktion der Abfrage. Die Phasen des Benutzerinteraktionsprozesses führen zur Abfrageausführung – unabhängig davon, ob die Eingabe über NLP oder die Dropdown-Menüs erfolgt. Die Eingaben werden in eine SPARQL-Abfrage überführt und die Ergebnisse werden dem Benutzer präsentiert. Zusammenfassend bietet dieses System eine flexible und benutzerfreundliche Plattform für die Interaktion mit Semantic-Web-Daten. Durch die Kombination von NLP und gesteuerten Vokabularen wird sowohl eine natürliche, intuitive Interaktion als auch eine strukturierte Abfragekonstruktion ermöglicht. Dieser duale Ansatz adressiert unterschiedliche Benutzerbedürfnisse und Kompetenzniveaus, was das System für ein breites Spektrum von Anwendern zugänglich macht.

Zwischenfazit 5.2

Durch die AI₄PD-Ontologie ist eine formale Spezifikation verfügbar, um ein einheitliches Verständnis von Digital Engineering zu unterstützen. Die Ontologie implementiert vier Hauptkonzepte: Anwendung, Methode, Prozess und Personen. Dies ermöglicht die Wissensverwaltung von datengetriebenen Methoden, Tools und Toolboxen in Verbindung mit relevanten Aspekten des Produktentwicklungsprozesses. Die späteren Benutzer dieser Methoden werden im Kontext von Personen betrachtet. Zusätzlich können wie am Beispiel von SLASSY illustriert, bestehende Anwendungsfälle in die Ontologie integriert werden, die es ermöglichen, eine Datenbank mit bereits umgesetzten Lösungen aufzubereiten. Durch Abfragen der Ontologie kann die Wissenswiederverwendung vereinfacht und passende datengetriebene Methoden für einen spezifischen Anwendungsfall identifiziert werden, was zusätzlich durch die Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche vereinfacht wurde. Diese Aspekte unterstützen kleine und mittlere Unternehmen bei der Integration von datengetriebenen Methoden in ihre Produktentwicklung und der Transformation in einen neuen Digital-Engineering-Prozess.

5.3 Reifegradmodell Digital Engineering

Während Phase 3 des oben vorgestellten Prozesses erfolgt eine Bewertung hinsichtlich der Integration datengetriebener Methoden in Produktentwicklungsprozesse. Hierzu sind Kriterien nötig, die die Analyse und Bewertung digitaler Prozesse in der Produktentwicklung ermöglichen. Das entwickelte System basiert auf dem Evaluationsmodell von Bitkom [298]. Dessen vier Hauptdimensionen Technologie, Daten, Qualität und Organisation decken die wichtigsten Themen ab, die für die weitere Digitalisierung von Geschäftsprozessen relevant sind. Teile des Kapitels wurden bereits in [P15] dargestellt.

Da die zu entwickelnde Methode auf einem visualisierten Prozessmodell und einem ergänzenden Interview-Fragebogen basiert, können die von Bitkom vorgestellten Bewertungskriterien nicht direkt übernommen werden. Zudem werden die Kriterien an die Anforderungen an datengetriebene Methoden angepasst, wie sie von Mehlstäubl et al. [P6] dargestellt wurden, und an die von Gerschütz et al. [P5] definierten relevanten Aspekte des Gestaltungsprozesses. Es gibt verschiedene Arten von Skalen, wie in der Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Verwendete Skalentypen für die Prozessbewertung.

Skala	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Lickert	nicht digital	überwiegend nicht digital	teilweise digital	überwiegend digital	digital
Prozentsatz	Weniger als 20%	20-40%	40-60%	60-80%	Mehr als 80%
Einverständnis	Nicht anwendbar	Überwiegend nicht anwendbar	Teilweise anwendbar	Überwiegend anwendbar	Anwendbar

Die Evaluierungsstruktur besteht aus einer Fünf-Punkte-Skala, wobei Stufe 1 dem Grundniveau entspricht, und der maximale Entwicklungsgrad auf Stufe 5 erreicht wird. Der Skalenwert 0 symbolisiert, dass dieser Aspekt nicht bewertet werden konnte. Im Folgenden werden die Leistungskennzahlen definiert, um den Technologiereifegrad für datengetriebene Prozesse zu realisieren. Die qualitative Selbstbewertung der Unternehmen wird durch quantitative Elemente unterstützt. Hierfür wurden Kennzahlen festgelegt, die auch eine mathematische Grundlage für einzelne Kategorien bieten. Die verschiedenen Technologiereifegrad-Aspekte erfordern unterschiedliche Skalentypen, wie in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Zuweisung der Aspektskalentypen. Der Buchstabe „x“ symbolisiert die Verwendung des jeweiligen Skalentyps für den Aspekt.

Aspekt	Likert	Prozentsatz	Einverständnis
Technologie			
Technologiebasis	x		
Werkzeuge		x	
Systemintegration			x
Mediendiskontinuität		x	
Daten			
Datenerfassung	x		
Datenübertragung		x	
Datenbereitstellung	x		
Datenverwendung			x
Qualität			
Betrieb			x
Rückverfolgbarkeit			x
Transferzeit			x
Sicherheit			x
Organisation			
Verantwortung			x
Qualifikation			x
Gateways			x
Wissensbasierte Arbeit		x	

Die Kriterien werden wie nachfolgend erklärt in einem Kriterienkatalog zusammengefasst. Unternehmen können dieses neu entwickelte Reifegradmodell verwenden, um ihr eigenes Leistungsniveau zu bewerten.

5.3.1 Technologie

Ein erfolgreicher digitaler Prozess sollte über ein gutes technologisches Umfeld und eine gut entwickelte IT-Infrastruktur verfügen. Die verwendete IT-Struktur und die Art und Weise, wie Informationen zwischen Abteilungen oder Mitarbeitern übertragen werden, sind essenziell. Alle Prozesse sollten systemisch miteinander verbunden sein und möglichst wenige Systembrüche aufweisen.

Technologische Basis Für eine einheitliche digitale technologische Basis sollten ein- und ausgehende Informationen des Prozesses oder Prozessschrittes digital verfügbar sein. Dies ermöglicht zum einen eine schnelle Prozessbearbeitung, da Daten nicht eingegeben oder schlimmstenfalls übertragen werden müssen, zum anderen können die vorhandenen Daten für datengetriebene Methoden genutzt werden. Die Bearbeitung des (Teil-)Prozesses sollte digital in einem Netzwerk erfolgen, um eine unkomplizierte Zusammenarbeit zu ermöglichen, wie z. B. im firmeneigenen Netzwerk oder im Internet.

Werkzeuge Es erfolgt eine Bewertung der aktuellen Unterstützung durch digitale Werkzeuge, die für den Konstruktionsprozess relevant sind. Mögliche Werkzeuge sind CAx- sowie digitale Managementwerkzeuge wie PDM-Systeme. Hierbei kann zur Verknüpfung auch auf Automatisierungslösungen zurückgegriffen werden. Der Automatisierungsgrad setzt die bereits automatisierten Prozessschritte (A_A) ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Prozessschritte (A_G). Die Gleichung (13) berechnet den Automatisierungsgrad p_A gemäß IEC 60050-351 [336]. Obwohl sich die IEC 60050-351 auf die Elektronikindustrie bezieht, ist eine Anpassung an den Designbereich möglich, da ähnliche Probleme gelöst werden.

$$p_A = \frac{A_A}{A_G} \leq 100 \quad (13)$$

Der Digitalisierungsgrad vergleicht die bereits digitalisierten Prozessschritte (A_D) mit der Gesamtzahl der Prozessschritte (A_G), um den Digitalisierungsgrad (p_D) zu erhalten. Ziel ist es, so viele Prozessschritte wie möglich zu digitalisieren.

$$p_D = \frac{A_D}{A_G} \leq 100 \quad (14)$$

Systemintegration Alle verwendeten Programme und Werkzeuge werden in ein zentrales Produkt- oder Simulationsdatenmanagement integriert und die generierten Daten werden dort gesammelt. Dies ermöglicht einen einfachen Zugriff auf die Datenbasis für den Einsatz datengetriebener Methoden. Komplexe Schnittstellen, unterschiedliche Datenquellen und Dateninkonsistenzen werden vermieden.

Medienbrüche Medienbrüche erschweren die Integration von Daten in datengetriebene Prozesse. Sobald bei der Informationsübermittlung inner-

halb eines Prozesses das Medium gewechselt wird, entstehen Medienbrüche, z. B. von E-Mail zu Papier. Medienbrüche können zusätzlich durch unterschiedliche Datenformate entstehen, zum Beispiel bei der CAD-zur-Simulation-Datenumwandlung. Zur qualitativen Bewertung wird die Anzahl der Medienbrüche (A_M) ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Prozessschritte (A_G) gesetzt. In Gleichung (15) wird das Verhältnis der Medienbrüche (p_M) berechnet. Hier sollte das ideale Verhältnis möglichst klein sein.

$$p_M = \frac{A_M}{A_G} \quad (15)$$

5.3.2 Daten

Eine einheitliche Datenbasis ist die ideale Voraussetzung für die Anwendung datengetriebener Methoden. Dies setzt jedoch eine umfangreiche Datenerhebung voraus, um möglichst viele Daten zu sammeln und die Nutzung der gewonnenen Daten zu erleichtern.

Datenerfassung Alle relevanten Daten sollten automatisch gesammelt und archiviert werden. Dabei werden explizit auch alle Daten von fehlerhaften Prozessabläufen erfasst. Insbesondere in Simulationsabteilungen werden Ergebnisse nach einer definierten Zeit gelöscht, was im Interesse der Datenkonsistenz vermieden werden sollte.

Datenübertragung Daten im Prozess werden mit identischen Methoden und in die gleiche Datenbank übertragen. Die Datenübertragung zwischen den Abteilungen erfolgt automatisch, um Übertragungs- und Wartezeiten zu reduzieren. Die Gesamtzahl der verwendeten Übertragungsmethoden (A_T) im Verhältnis zur Anzahl der Prozessschritte (A_G) bestimmt den Anteil am Gesamtprozess (p_T). Das Ergebnis spiegelt den Anteil der Methodenwechsel am Prozess wider. Ziel ist es, den kleinstmöglichen Wert zu erreichen, damit der Informationsfluss ohne Unterbrechung dokumentiert werden kann.

$$p_T = \frac{A_T}{A_G} \quad (16)$$

Datenbereitstellung Vorhandene Daten sollten allen Abteilungen digital zur Verfügung gestellt werden, um den größtmöglichen Nutzen zu generieren. Speziell in Konstruktionsabteilungen kann dies aufgrund unterschiedlicher Programme schwierig sein. Das Unternehmen sollte die Daten auch in visu-

eller, leicht verständlicher Form aufbereiten. Für die Archivierung der Ein- und Ausgaben ist jede Abteilung selbst verantwortlich.

Datenverwendung Vorhandene Daten werden in den laufenden Prozessen genutzt und zwar unabhängig davon, ob die Nutzung automatisiert oder manuell erfolgt. Um den Nutzen der Daten für das Unternehmen zu maximieren, sollte es eine zentrale Schnittstelle für den Zugriff auf die interne Datenbank geben, welche den externen Datenzugriff durch andere KI-Anwendungen gewährleisten. Beim Zugriff auf Daten aus externen Netzwerken sollte die Datensicherheit oberste Priorität haben (siehe Punkt Sicherheit in der Dimension Qualität). Alle Entscheidungen in einem digitalen Unternehmen basieren auf Daten anstelle von Erfahrungswerten.

5.3.3 Qualität

Für erfolgreiche digitale Prozesse ist der Qualität eine besondere Bedeutung beizumessen. Die folgenden Kriterien des Bewertungskonzepts fokussieren darauf:

Betrieb Der Prozessbetrieb wird hinsichtlich Qualität und Stabilität bewertet. Der Fokus liegt auf dem digitalen Prozessschritt, um den gesamten Prozess digital verfolgen zu können. Lastspitzen sind daher für den digitalen Prozess unproblematisch.

Rückverfolgbarkeit Digitale Prozesse sollten hinsichtlich ihres aktuellen Status und Fortschritts digital nachvollziehbar sein. Dies ermöglicht ein flexibles Reagieren bei Problemen. Weiterhin ist es wichtig, wann und wo Dateien erzeugt oder manipuliert wurden, um die Nachverfolgbarkeit z. B. bei Freigaben sicherzustellen.

Übertragungszeit Transport-, Übertragungs- und Wartezeiten sind aufgrund des digitalen Transports geringer als beim analogen Transport (z. B. für andere Abteilungen wie Simulation oder Dienstleister). Große Datenmengen benötigen zum schnellen Transport eine ausreichend starke digitale Infrastruktur.

Sicherheit Gesetzliche und regulatorische Anforderungen werden eingehalten und regelmäßig durch Audits überprüft. Die Sicherheit der unternehmensinternen Daten wird durch eine geeignete Firewall und gut ausgebildete IT-Experten regelmäßig aktualisiert.

5.3.4 Organisation

Die gesamte Organisation spielt eine oft unterschätzte Rolle bei der Umsetzung von Entwicklungsprojekten. Es ist wichtig, alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von der untersten bis zur obersten Führungsebene einzubeziehen und zu motivieren, damit sie ihre Erfahrungen und ihr Wissen in Produkte und Prozesse einbringen können.

Verantwortung Entscheidungen im Prozess werden von Personen mit fachlicher Verantwortung getroffen. Eine klare Zuordnung, wer für welchen Teilschritt des Prozesses verantwortlich ist, führt zu einem besseren Prozessfluss. Entscheidungen werden digital getroffen und dokumentiert.

Qualifikation Die digitale Kompetenz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wird gemessen. Ein erfolgreiches digitales Unternehmen benötigt eine hohe digitale Kompetenz, die kontinuierlich weiterentwickelt werden muss. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter werden im effektiven und effizienten Umgang mit neuen Technologien geschult.

Gateways Schnittstellen zwischen Abteilungen sind klar definiert und werden durch die Einhaltung von Regeln korrekt bedient. Zusätzlich sorgen Übergabedokumente für eine konsistente Dokumentation.

Wissensbasierte Arbeit Um Prozesse mit datengetriebenen Methoden zu unterstützen, wird das Verhältnis von wissensbasierter Arbeit (A_K) zu Routineaufgaben (A_R) bewertet:

$$p_{kbw} = \frac{A_K}{A_R} \quad (17)$$

Zwischenfazit 5.3

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das vorgestellte Reifegradmodell die Dimensionen Technologie, Daten, Qualität und Organisation berücksichtigt, um Prozesse hinsichtlich der Integration datengetriebener Methoden in Produktentwicklungsprozesse zu bewerten. Hierzu stehen für alle Dimensionen KPIs zur Verfügung. Im Bereich Technologie liegt der Fokus auf einer gut ausgebauten IT-Infrastruktur und der systemischen Verknüpfung der Prozesse. Dabei werden die Aspekte Technologiebasis, Tools, Systemintegration und Medienbrüche betrachtet. Im Bereich Daten wird auf eine einheitliche Datenbasis

und umfassende Datenerhebung geachtet, mit spezifischen Kriterien für Datenerfassung, Datenübermittlung, Datenbereitstellung und Datenverwendung. Die Qualität der digitalen Prozesse wird anhand der Kriterien Betrieb, Rückverfolgbarkeit, Übertragungszeit und Sicherheit bewertet. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der digitalen Nachvollziehbarkeit. Die Dimension Organisation umfasst Verantwortlichkeiten, Qualifikationen, Schnittstellen und wissensbasierte Arbeit, um sicherzustellen, dass die gesamte Organisation in die Umsetzung digitaler Prozesse eingebunden ist.

6 Umsetzung der Methode am Modellbeispiel

Es gibt keine Alternative zur digitalen Transformation.
Visionäre Unternehmen werden sich neue strategische
Optionen erschließen – diejenigen, die sich nicht anpassen,
werden scheitern.

Jeff Bezos, Gründer von Amazon

Zur Darstellung der Umsetzbarkeit der Methode wurden mehrere Case Studies, teilweise im industriellen Kontext, bearbeitet. Um die Ergebnisse der Beispiele im Rahmen dieser Arbeit darstellen zu können, musste der Detailgrad reduziert werden. Alle betrachteten Anwendungsfälle behandeln den Kontext Konstruktion – Simulation im Rahmen der technisch-mechanischen Produktentwicklung.

Die Entscheidung auf eine hoch detaillierte Gestaltung der Fallstudien zu verzichten, basiert auf Gründen, die die besondere Natur der vorliegenden Dissertation berücksichtigen. Die Einbindung von Industriedaten ist in diesem Kontext von höchster Relevanz. Aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen und dem Schutz sensibler Informationen ist es notwendig, eine ausgewogene Balance zwischen Transparenz und Geheimhaltung zu wahren. Die begrenzte Detailtiefe dient somit dem Schutz vertraulicher Daten und ermöglicht dennoch eine praxisnahe und prägnante Darstellung der Forschungsergebnisse.

Weiterhin bezieht die Arbeit teilweise akademische Beispiele ein, um eine breitere Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Hier ist ein zu hoher Detailgrad ebenfalls nicht zielführend, da dieser die Verallgemeinerung der Erkenntnisse erschweren und den Fokus auf spezifische Kontexte lenken könnte. Ferner handelt es sich um synthetische Informationen, bei denen hoch detaillierte Ergebnisse ebenfalls in der Glaubwürdigkeit zu hinterfragen wären. Die bewusste Wahl einer weniger detaillierten Darstellung ermöglicht es, die Forschungsergebnisse in einem breiteren akademischen Rahmen zu diskutieren und fördert den Austausch von Ideen und Konzepten über verschiedene Disziplinen hinweg.

6.1 Case Study 1: Vorhersage von FE-Ergebnissen

Die erste Fallstudie wurde in Kooperation mit der PSW automotive engineering GmbH durchgeführt und bereits in Vorarbeiten präsentiert [P15]. Hier

lag der Fokus insbesondere auf den Phasen 0 – 3 der vorgestellten Methode, wobei Phase 4 ebenfalls durchgeführt wurde. Die zugrundeliegende Herausforderung liegt darin, dass die Simulationsabteilung mit einer Vielzahl an Anfragen der Konstruktion konfrontiert ist, zu denen eine Stellungnahme erforderlich ist. Dies sorgt für einen großen Workload an Routineaufgaben, der dafür sorgt, dass die Simulationsexperten weniger Zeit für komplexe Aufgaben haben und die Bearbeitung von auftretenden Problemen erschwert wird.

Phase 0: Vorbereitung

Zu Beginn des Projekts wurde der aktuelle Stand der Digitalisierung erfasst und ein Gesamtprozessplan erstellt. Zudem wurden mit dem projektverantwortlichen Prozessmanager die aktuellen digitalen Möglichkeiten und Optimierungsziele erörtert. In diesem Gespräch wurden ausreichende digitale Möglichkeiten hinsichtlich des allgemeinen Einsatzes datenbasierter Methoden identifiziert. Es standen IT- und Speicherkapazitäten sowie allgemeine Kenntnisse über diese Methoden zur Verfügung. Das zentrale Unternehmensziel ist es, Produktentwickler bei CAD-Arbeitsschritten durch die Bereitstellung nützlicher Informationen zu unterstützen. Weiterhin sollte eine umfassende Analyse zur weiteren Prozessdigitalisierung durchgeführt werden. Während dieser Phase wurde die Prozesslandkarte der Disziplinen Konstruktion, Simulation und Test entwickelt, wie in Bild 51 dargestellt.

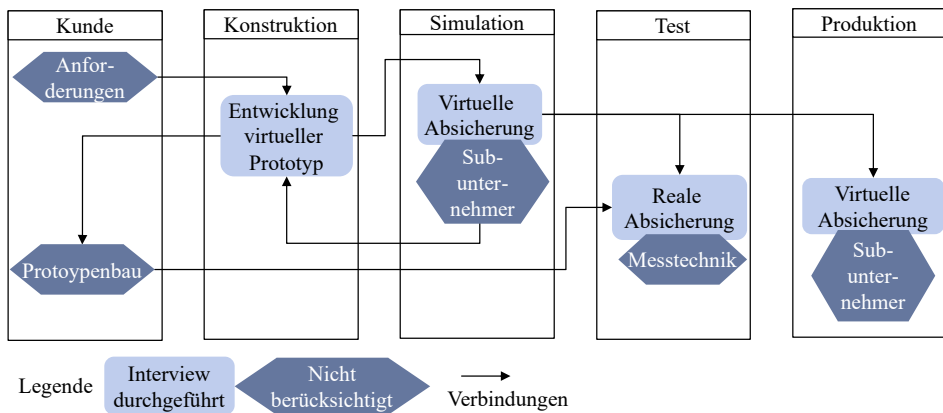


Bild 51: Entwickelte Prozesslandkarte der ersten Case-Study

Phase 1: Prozesserfassung

Im Rahmen der Prozesserfassungsphase wurden in den Monaten Juni und Juli 2021 insgesamt sieben Interviews durchgeführt. Die zweistündigen Interviews mit verschiedenen Personen aus den Abteilungen Simulation (2 Interviews), Test (1 Interview), Konstruktion (2 Interviews) und Produktion (1 Interview) wurden aus der Sicht der Mitarbeiter durchgeführt. Zusätzlich ermöglichte ein zweistündiges Interview mit dem Entwicklungsmanager einen Einblick in den geplanten Prozess aus Sicht der Unternehmensleitung. Die Einbeziehung der Datensicht war nicht möglich, sodass diese Informationen fehlen. Die Interviews wurden mit zwei Interviewern durchgeführt, von denen einer das Interview führte. Der andere war für die simultane Prozessvisualisierung verantwortlich, sodass potenzielle Fehler in der Dokumentation während des Interviews korrigiert werden konnten. Die Visualisierung in Bild 38 wurde verwendet, um die erfassten Prozesse zu dokumentieren; diese Ergebnisse können aus Gründen der Geheimhaltung leider nicht veröffentlicht werden. Während der Interviews konnten die Mitarbeiter ihre subjektiven Erkenntnisse zu Problemen und Optimierungspotenzialen darlegen. Eine Zusammenfassung der zentralen Probleme ist in der folgenden Liste aufgeführt:

- Zahlreiche Iterationen und Änderungsanfragen im Designprozess. Dies führt zu langen Entwicklungszeiten und vielen repetitiven Arbeitsschritten.
- Hohe Koordinationsanforderungen zwischen den Abteilungen, was zu vielen Abstimmungsmeetings und einer hohen Anzahl an Iterationen führt.
- Kurze Zeitfenster kombiniert mit langen Wartezeiten, z. B. auf Simulations- oder Testergebnisse, während des Designs.
- Die Datenübernahme von der Simulation in die Konstruktion unterliegt Medienbrüchen, da Simulationen andere Datenformate benötigen als die Konstruktion.
- Eine aufwendige Auswertung von Simulationsergebnissen erfordert ein hohes Maß an Mitarbeiterexpertise und Zeit, die nicht immer verfügbar ist, was zu einer hohen Arbeitsbelastung in der Abteilung führt.
- Korrekturiterationen mit Simulationsdienstleistern sind erforderlich, wenn es Fehler im Simulationsaufbau gibt. Die Datenprüfung sowie die Iterationen kosten Zeit.
- Der Test ist aufgrund langer Zeiträume der Engpass im Freigabeprozess. Daher sind Testergebnisse erst zwei Iterationsschleifen später verfügbar. Dies führt dazu, dass zusätzliche Iterationsschleifen erforderlich sind, um potenzielle Fehler zu beheben.

Phase 2: Prozessbewertung

Die erfassten Entwicklungsprozesse wurden in dieser Phase anhand des Reifegradmodells Digital Engineering (vgl. Abschnitt 5.3) bewertet. Nach dem Prinzip der Dekomposition wurde die Bewertung für den Gesamtprozess, die Abteilungsebene sowie (Teil-)Prozesse und Aufgaben-Ebene durchgeführt. Bild 52 zeigt die Ergebnisse für den Gesamtprozess sowie die Abteilungsergebnisse für Konstruktion, Simulation und Test. Weitere Details können aufgrund von Geheimhaltungsvorschriften nicht dargestellt werden.

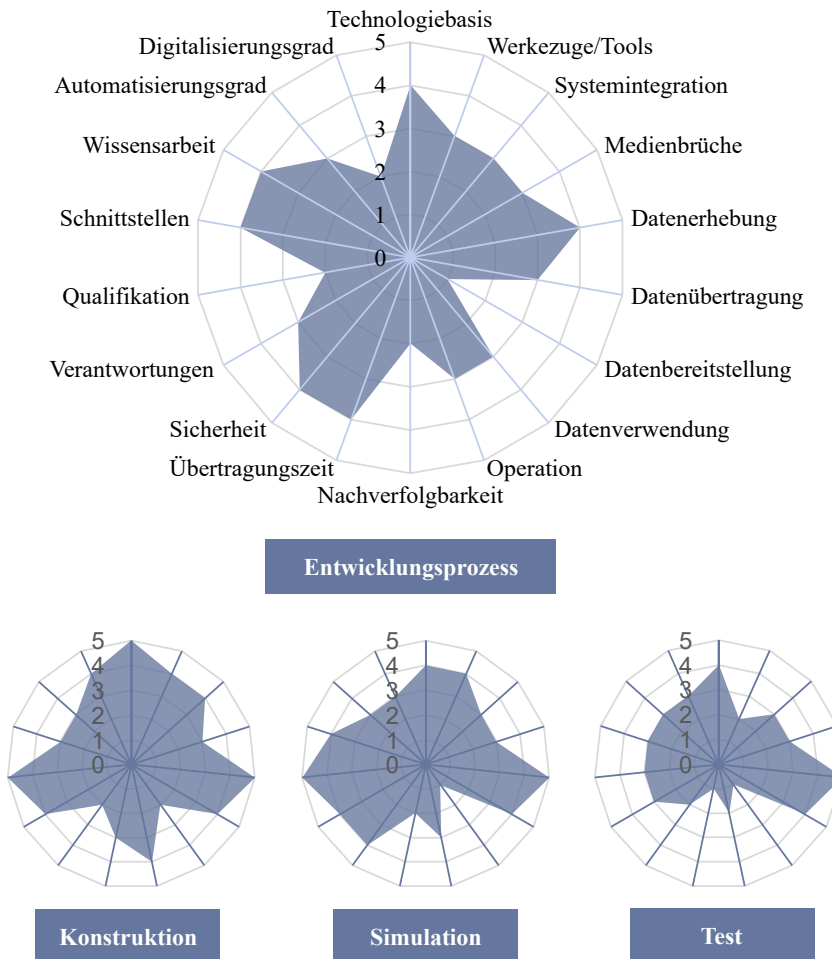


Bild 52: Bewertungsergebnisse für die erfassten Prozesse. Oben: Darstellung des Gesamtprozesses. Unten: Visualisierung des Konstruktionsprozesses (links), Simulationsprozess (Mitte) und Testprozess (rechts). Fünf ist die beste Bewertung, Eins die schlechteste.

Phase 3: Potenzialanalyse

Basierend auf den Evaluationsergebnissen und dem Feedback wurden verschiedene Optimierungspotenziale identifiziert. Für die meisten datengetriebenen Methoden sind die Voraussetzungen erfüllt, insbesondere in den Teilprozessen Entwurfskonstruktion und Simulation. Ein Ansatz besteht darin, die Iterationen zwischen Konstruktions- und Simulationsabteilungen durch Ergebnisschätzungen während der Entwurfsphase zu reduzieren. Dies könnte den Produktentwicklern Einblicke in die Frage geben, ob für neue Entwürfe Probleme in Standardbelastungsfällen erkannt werden können. In einem solchen Fall ist eine detaillierte Simulation zum aktuellen Entwicklungsstand nicht mehr erforderlich. Außerdem können Plausibilitätsprüfungen die Bewertung der Simulationsergebnisse unterstützen, was ebenfalls zu einer reduzierten Arbeitsbelastung in der Abteilung führt. Der Test-Teilprozess erfordert zusätzlichen Aufwand, um das identifizierte Digitalisierungspotenzial zu nutzen. Dies zeigt sich auch in den Testevaluationsergebnissen in Bild 52. Der wesentliche Nachteil dieses Prozesses ist der geringe Digitalisierungsgrad, da nur wenige digitale Werkzeuge eingesetzt werden. Die administrativen Aspekte wie Rückverfolgbarkeit und Datenbereitstellung sollten ebenfalls gestärkt werden. Nachdem diese Aspekte optimiert wurden, gibt es ähnliche Ansätze in der Testprozesskette wie Simulation. Eine Entscheidungsunterstützung wäre hilfreich, um zu beurteilen, ob ein Test überhaupt notwendig ist. Die potenziellen Anwendungsfälle wurden mit dem Industriepartner evaluiert, um einen Pilotanwendungsfall zu identifizieren, der in der Prozessneugestaltungsphase implementiert werden kann.

Phase 4: Integration

Die hohe Anzahl an aufwendigen Iterationen zwischen den Simulations- und Konstruktionsabteilungen wurde als das Problem mit dem größten Potenzial identifiziert. Im Zuge der Prozessoptimierung entstand ein Unterstützungssystem zur Beurteilung der Konstruktion von Standardlastfällen. Die Identifizierung möglicher datengetriebener Methoden wird durch die Möglichkeiten der AI4PD-Ontologie erreicht. Auf Basis von vorhandenen Simulationsdaten lassen sich mit künstlichen neuronalen Netzen maximale Verschiebungen an kritischen Stellen vorhersagen, wie in Bild 53 dargestellt. Die Methode musste wie oben beschrieben mit den nachfolgenden Schritten angepasst werden.

IT-System-Training Im Rahmen des IT-Systems des Trainingsprozesses wurde ein maschinelles Lernmodell erstellt. Hierzu wurden die Simulations-

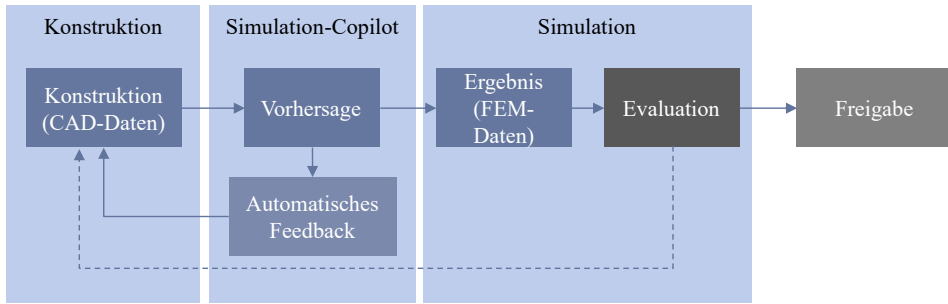


Bild 53: Schematische Darstellung des entwickelten Anwendungsfalls eines Simulations-Copilots zur Vorhersage von Simulationsergebnissen.

daten der jeweiligen Lastfälle eingelesen und das Modell²⁹ auf dieser Grundlage trainiert. Zusätzlich wurden Qualitätskriterien implementiert, um eine ausreichende Modellqualität sicherzustellen. Eine detaillierte Betrachtung dieser Qualitätskriterien würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und ist nicht Gegenstand dieser Forschung. Grundsätzlich wurden die kritischen Themen wie Overfitting durch entsprechende Maßnahmen beachtet.

IT-System-Nutzer Eine Benutzeroberfläche wurde für die einfache Anwendung der Vorhersage implementiert. Hier wurde der Status der Vorhersage über ein Ampelsystem (grün: gut, gelb: problematisch, rot: nicht erfüllt) klar visualisiert und die Ergebnisse werden zusätzlich tabellarisch dargestellt. Der Benutzer kann das erforderliche Modell laden und neue Komponenten mit nur wenigen Eingaben überprüfen.

Datenmanagementsystem Im entwickelten Prototyp wurden die Daten in einer Ordnerstruktur auf einer freigegebenen Netzwerkfestplatte gespeichert. In dieser Ordnerstruktur wurden Komponentendatenbanken erstellt, in denen alle Daten gespeichert wurden, die demselben Bauteil zugeordnet sind.

Eingangsdaten Um das Metamodell zu trainieren, mussten die in den gespeicherten Daten enthaltenen Rohdaten extrahiert werden. Die Extraktion erfolgte durch das Auslesen der Daten über ein Python-Skript. Hier wurden das Material und die Dicke der einzelnen Teile sowie die Knoten-IDs der Lastangriffspunkte ausgelesen. Zusätzlich wurden die Simulationsergebnisdaten aus den Ergebnisdateien erfasst und in Textform umgewandelt. Die Daten wurden außerdem normalisiert und passend skaliert.

²⁹ In diesem Fall ein künstliches neuronales Netz

Ausgangsdaten Die Vorhersage wird grafisch in der Benutzeroberfläche angezeigt. Hierzu stehen drei Detailalterungsstufen zur Verfügung: das oben erwähnte Ampelsystem, Werte der maximalen Verformung und Spannung sowie ein Diagramm der vorhergesagten Werte als Falschfarbbild des Bauteils. Die Vorhersage wird zusätzlich in der Dateistruktur gespeichert, um einen späteren Zugriff und Evaluation zu ermöglichen.

Prozess In der aktuellen Phase steht ein Prototyp zur Verfügung, der als standalone-Programm realisiert ist. Um es zu verwenden, muss das Modell aus dem CAD-Programm exportiert und in das Programm integriert werden. Für eine vollständige Prozessanpassung wäre ein direktes Plug-in für das CAD-Programm wünschenswert, was bisher nicht realisiert ist.

Zwischenfazit 6.1

Im Rahmen der Case Study konnte die Funktionsfähigkeit der entwickelten Methode bestätigt werden. Zusätzlich wurde im Rahmen der Studie die Wirtschaftlichkeit, Qualität, Quantifizierbarkeit und Konsistenz der Prozesserfassung evaluiert. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit wurden Kosten und Zeit als zentrale Faktoren betrachtet. Die Analyse ergab, dass die relativen Kosten im Verhältnis zur benötigten Zeit einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit haben, insbesondere in Bezug auf Arbeitskosten, die oft den größten Kostenanteil darstellen. Die Studie ergab, dass die Anforderung an die benötigte Zeit durch Interviews von etwa zwei Stunden pro Mitarbeiter erfüllt wurde und die anschließende Analyse und Bewertung zusätzlich zwei bis drei Stunden pro Teilprozess erforderte. Lizenzen oder Zertifizierungskurse verursachten keine zusätzlichen Ausgaben. Die Qualität wurde durch eine nachfolgende Überprüfung der entwickelten Prozessmodelle mit den Interviewpartnern bestätigt. Es konnten keine signifikanten Fehler festgestellt werden, was besonders auf die parallele Prozessmodellierung und die sofortige Fehlerkorrektur während der Interviews zurückzuführen ist. Die retrospektive Analyse der datengetriebenen Methoden zur Identifikation und Integration zeigte ebenfalls eine hohe Qualität beider Schritte. Obwohl eine Fallstudie keine allgemeine Aussage erlaubt, deutet sie auf eine robuste Tendenz hin. Die Quantifizierbarkeit der Ergebnisse wurde durch die Verwendung quantitativer Parameter im Rahmen des Reifegradmodells Digital Engineering ermöglicht. Dadurch werden individuelle Prozesse vergleichbar gemacht, jedoch sollte insbesondere die Quantifizierung des Nutzens von Prozessneugestaltungen noch detaillierter bewertet

werden. Die Konsistenz der Prozessvisualisierung wurde durch die gegebenen Elemente sichergestellt, bis hinunter auf die Aufgabenebene inklusive einer Berücksichtigung individueller Prozessmerkmale. Abschließend wurde die Erfassung von Daten, Informationen und Wissen als Grundlage für die Anwendung datengetriebener Methoden bestätigt. Die entwickelte Visualisierungsmethode ermöglichte die Dokumentation und Darstellung dieser Aspekte auf eine leicht verständliche und Weise.

6.2 Case-Study 2: Automatisiertes Preprocessing von FE-Simulationen

Die zweite Fallstudie behandelt ausschließlich den Prozess des Modellaufbaus einer FE-Simulation. Hierbei liegt der Fokus auf der Anpassung datengetriebener Methoden in Phase 4. Dies liegt daran, dass die Problemstellung in Zusammenarbeit mit der WAGO GmbH & Co. KG durchgeführt wurde, die Phasen 0 – 3 bereits vor der Zusammenarbeit durchgeführt hat und lediglich Phase 4 in Zusammenarbeit mit einer Forschungseinrichtung durchführen wollte.

Problembeschreibung

Im Rahmen einer initialen Problemevaluation beim Industriepartner wurde ein Thema im Kontext des FE-Preprocessing identifiziert. Hier stehen die Simulationsexperten vor der Problemstellung, dass die Vorbereitung der Simulationsdaten einen signifikanten Zeitaufwand benötigt und zu einer hohen Arbeitsbelastung in der Abteilung führt. Insbesondere die Identifikation und Definition von Kontakten und Randbedingungen stellt eine zeitaufwendige Herausforderung dar, die mithilfe von maschinellem Lernen optimiert und automatisiert werden soll. Die Simulation einer Federkennlinie, wie in Bild 54 dargestellt, wurde als zentrales Beispiel analysiert.

Der grundlegende Ablauf des Preprocessing ist in Bild 55 dargestellt. Nach dem Öffnen des Simulationsprogramms erfolgt das Einlesen der Bauteile und die Definition des Materials. Anschließend erfolgt der Aufbau der Kontakte und des Netzes, bevor Lasten und Lagerungen definiert werden. Abschließend erfolgt das Speichern der Datei.

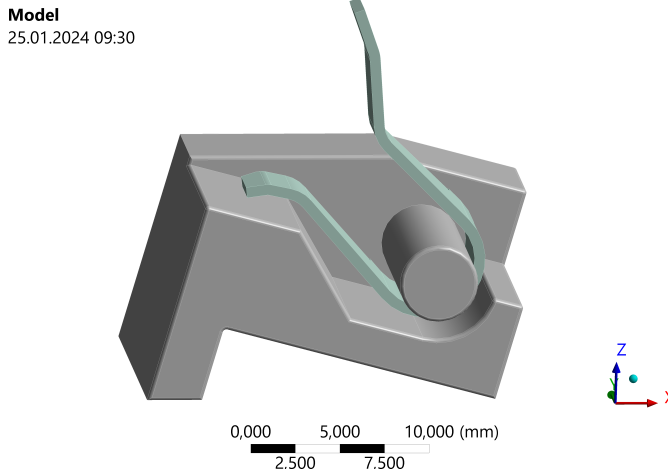


Bild 54: Modell des Anwendungsfalls zur simulativen Ermittlung einer Federkennlinie.

Phase 3: Potenzialanalyse

Die anfängliche Potenzialanalyse ergab, dass die primäre Problemstellung eine initiale Bauteilerkennung ist, da die nachfolgenden Aufgaben jeweils vom Typ des Bauteils abhängig sind. Als Ausgangsdaten stehen Geometriedaten und die Informationen über die Geometrie aus dem Simulationsprogramm zur Verfügung:

- Bauteilvolumen / Bounding Box Volumen
- Bauteiloberfläche / Bauteilvolumen
- Größte Bauteilfläche / Bauteiloberfläche
- Kleinste Bauteilfläche / Bauteiloberfläche
- Schwerpunkt [x/y/z] / Bounding Box Länge [x/y/z]

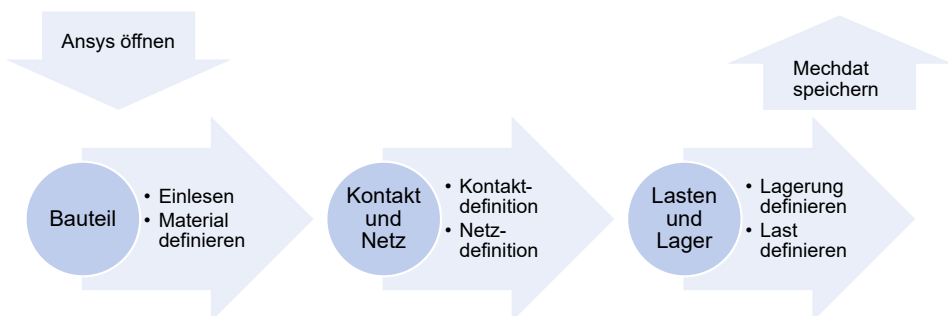


Bild 55: Ablauf des Preprocessing zur simulativen Ermittlung einer Federkennlinie.

- Anzahl Flächen
- Anzahl Kanten
- Anzahl Vertices

Alle Daten liegen innerhalb des Simulationsprogramms als Zahlen vor, die jedoch in andere Datenformate (z. B. in eine JSON-Datei) überführt werden können. Das Modelltraining soll auf einer regulären Workstation durchgeführt werden, die spätere Anwendung soll ebenfalls auf einer Workstation und in einer GUI erfolgen. Die Abfrage der Ontologie für die gegebene Problemstellung der Bauteilerkennung ergibt die Nutzung eines „Random-Forest“-Klassifikationsmodells der Toolbox „ScikitLearn“, wobei hierzu die Inputdaten als JSON-Format vorliegen müssen.

Die Problemstellung der Kontaktdefinition erfordert ebenfalls eine Klassifikation der Kontaktpaarungen nach „Kontakt“ oder „kein Kontakt“. Hierzu stehen ebenfalls die Informationen aus dem Simulationsprogramm zur Verfügung:

- Flächentyp
- Kontaktkörper Typ
- Kontaktkörper Größe
- Kleinster Abstand
- Winkel der Normalen

Die grundlegenden Rahmenbedingungen sind identisch zur Bauteilerkennung. Auch hier ergab die Methodenevaluation die Nutzung der gleichen Modellklasse wie bei der Bauteilerkennung.

Die weiteren Aufgaben der Netz-, Last- und Lagerungsdefinitionen sind standardisiert und erfordern im vorliegenden Komplexitätsgrad keinen Einsatz datengetriebener Methoden, da sie zielführender direkt automatisiert werden können.

Phase 4: Integration

Während Phase 4 erfolgte die Realisierung eines Pilotprogramms zum automatischen Preprocessing für Federkennliniensimulationen gemäß dem in Bild 55 dargestellten Prozessablauf.

IT-System-Training Das IT-System für den Trainingsprozess erstellt die nötigen ML-Modelle. Hierzu werden die Daten (Objekterkennung oder Kontakterkennung) eingelesen und das Modell auf deren Grundlage trainiert. Insgesamt werden im „Random-Forest Modell“ 200 separate Entscheidungsbäume trainiert, wodurch die Vorhersagequalität erheblich gesteigert werden

konnte. Die Evaluation erfolgt jeweils über eine Kreuzvalidierung, um Überanpassung zu vermeiden.

IT-System-Nutzer Zur einfachen Nutzung des entwickelten Systems wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) implementiert, wie in Bild 56. Der Benutzer kann das zu bearbeitende CAD-Modell laden und mit wenigen Eingaben das Preprocessing anstoßen. Lediglich die Definition der Materialien erfordert eine explizite Eingabe, dies wurde bewusst nicht automatisiert, um die Prüfung verschiedener Materialien einfach zu ermöglichen. Die Datenvorbereitung und das Modelltraining lassen sich ebenfalls über die Nutzeroberfläche anstoßen, was ein einfaches Nachtrainieren der Modelle durch den Nutzer ermöglicht.

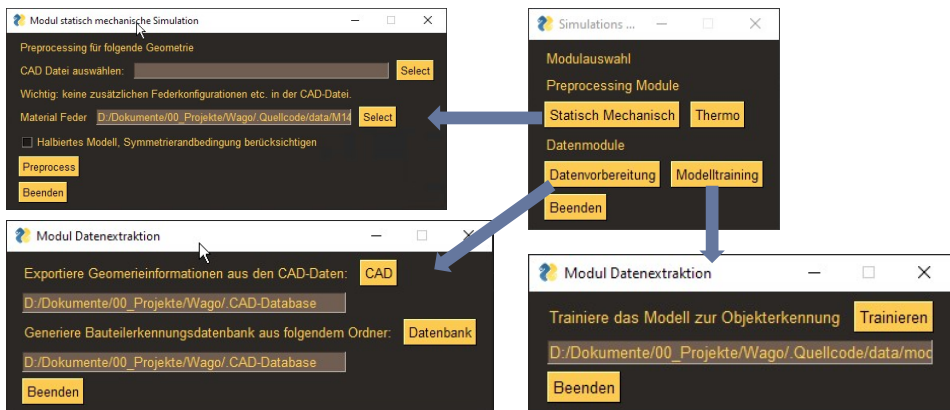


Bild 56: Nutzeroberfläche des entwickelten Gesamtsystems.

Datenmanagementsystem In der entwickelten Lösung erfolgt ein Zugriff auf die Ordnerstruktur eines dedizierten Laufwerks. Perspektivisch wäre die Kopplung an eine Materialdatenbank wünschenswert. Das Einlesen der zu bearbeitenden CAD-Datei erfolgt ebenfalls aus der Ordnerstruktur.

Eingangsdaten Die in den gespeicherten CAD- oder Simulationsdaten gespeicherten Informationen müssen zum Modelltraining extrahiert und in eine JSON-Datei überführt werden. Hierzu erfolgt der Import der Daten in ein Python-Skript, das relevanten Daten (siehe vorheriges Kapitel) ausliest oder berechnet und anschließend in einer JSON-Datei pro Eingangsdatensatz speichert. Die Materialdaten müssen als „XML-Datei“ vorliegen, aktuell ist keine Kopplung an eine Materialdatenbank realisiert.

Ausgangsdaten Das Ergebnis des Programms ist eine Simulationsdatei im „mechdat“ Format, das in einem definierten Ausgabeordner gespeichert wird. Zusätzlich kann eine Ausgabe der Vorhersagen in einem Debug-Fenster erfolgen.

Prozess In der aktuellen Phase steht ein Prototyp zur Verfügung, der als standalone-Programm realisiert ist. Durch die direkte Kopplung und das Einlesen der CAD-Daten und den Export als „mechdat“-Datei kann eine direkte Integration in den bestehenden Simulationsprozess erfolgen. Es wurde bewusst auf eine direkte Lösung des Modells verzichtet, um eine Prüfung und Anpassung des Preprocessings durch den Simulationsingenieur weiter zu ermöglichen.

Zwischenfazit 6.2

Die zweite Case Study ermöglichte eine vertiefte Bewertung, insbesondere der Phasen 3 und 4. Die Ontologie AI₄PD spielt eine entscheidende Rolle bei der gezielten Auswahl von Methoden. Allerdings ist dafür eine präzise Beschreibung der Rahmenbedingungen unerlässlich, um genaue Ergebnisse zu erzielen. Zudem erfordert die tiefgreifende Analyse von Datentransformationen eine eingehende Betrachtung, um weitere Potenziale in der Anwendung von KI-Methoden zu identifizieren. Durch die Definition von Anpassungsschritten bietet die Methode den Anwendern klare Leitlinien, welche Aspekte während der Umsetzung eines Pilotanwendungsfalls berücksichtigt und implementiert werden müssen. In einer weiteren Evaluation wäre zukünftig zu prüfen, ob der Anpassungsaspekt „Dateninput“ weiter geteilt werden muss, da sowohl der Input für das Modelltraining als auch der Input für die spätere Modellanwendung berücksichtigt werden sollte. Trotz dieser Unterstützung sind in der Regel Programmierkenntnisse erforderlich, um das spätere Programm erfolgreich umzusetzen. Es sei angemerkt, dass in bestimmten Fällen Low- oder No-Code-Anwendungen als zusätzliche Unterstützung dienen können, auch wenn dies nicht im Fokus der vorliegenden Untersuchungen stand.

6.3 Fazit

Zusammenfassend zeigt das vorliegende Kapitel, dass die entwickelte Methode zur Integration von datengetriebenen Methoden in den Prozess der technisch-mechanischen Produktentwicklung erfolgreich angewendet werden kann. Die durchgeführten Case Studies, insbesondere die Vorhersage von FE-Ergebnissen und das automatisierte Preprocessing von FE-Simulationen,

demonstrieren die Umsetzbarkeit und den Nutzen der vorgestellten Methode. Die Wirtschaftlichkeit, Qualität, Quantifizierbarkeit und Konsistenz der Gesamtmethode wurden überzeugend demonstriert. Weiterhin konnte in Case Study 1 gezeigt werden, dass die Anwendungsfallidentifikation und Bewertung des Prozesses zentral für die spätere Integration ist, da so direkt in diesem Entwicklungsstadium Aussagen beispielsweise über verfügbare Daten getroffen werden können und diese bei Bedarf frühzeitig erzeugt oder beschafft werden können. Gleichzeitig gibt die Methode umfangreiche Hilfestellungen zur einfachen Integration und Anpassung der Methoden indem Hilfestellungen für die anzupassenden Schnittstellen gegeben werden. Beide Fallstudien zeigen, dass die Integration datengetriebener Methoden in den Prozess der technisch-mechanischen Produktentwicklung zu einer Verbesserung der Prozessabläufe führen kann. Die entwickelten Prototypen und Lösungen bieten einen vielversprechenden Ansatz für zukünftige Anwendungen in der Industrie.

7 Diskussion

Die Digitalisierung aller Lebens- und Arbeitsbereiche fordert ihren Tribut und verschafft zugleich ungeahnte Möglichkeiten.

Markus Baumanns

Die vorliegende Forschungsarbeit konzentriert sich darauf, datengetriebene Methoden, insbesondere im Bereich Data-Mining und Machine Learning, erfolgreich in den Produktentwicklungsprozess zu integrieren. Durch die gewonnenen Erkenntnisse ergeben sich mehrere Schlüsselaspekte, die im Kontext der Zielsetzung und der Herausforderungen betrachtet werden können.

Verknüpfung der Domänen Künstliche Intelligenz und Produktentwicklung: Die Einführung der Ontologie AI4PD markiert einen bedeutsamen Schritt in Richtung der Verknüpfung der Domänen künstlicher Intelligenz und Produktentwicklungsprozesse. Die Schwierigkeiten, die durch uneinheitliche Terminologie und unterschiedliche Datenarten entstehen, wird durch den formalen Rahmen der Ontologie adressiert. Das Datenkonzept sollte in nachfolgenden Arbeit noch weiter evaluiert und ausgebaut werden. Außerdem ist das Konzept der Aufgabencluster und die Aufteilung dieser weiter zu untersuchen.

Vereinfachung der Einführung von Digital Engineering in KMU: Der vorgestellte Transformationsprozess bietet einen praxisorientierten Ansatz zur Integration datengetriebener Methoden in Produktentwicklungsprozesse von kleinen und mittelständischen Unternehmen. Die Ontologie spielt eine entscheidende Rolle bei der Identifizierung geeigneter datengetriebener Methoden für spezifische Anwendungsfälle. Zusätzlich erleichtert AI4PD die Anpassung von Tools und Methoden und stellt bewährte Verfahren sowie implementierte Anwendungsfälle bereit. In Ergänzung dazu wurde mit der vorgestellten Gesamtmethode ein strukturierter Ansatz für die Prozessanalyse und -optimierung vorgestellt. Diese Methode ermöglicht es Unternehmen, ihre Produktentwicklungsprozesse zu analysieren und zu verbessern. Hierbei bietet sie nicht nur Einblicke in den aktuellen Zustand der Prozesse, sondern ermöglicht auch eine gezielte Optimierung durch die Identifikation von Engpässen, Redundanzen und Ineffizienzen.

Dieser kombinierte Ansatz bieten Unternehmen eine umfassende Methode, um datengetriebene Methoden nicht nur zu identifizieren, sondern auch

nahtlos in ihre bestehenden Prozesse zu integrieren und kontinuierlich zu optimieren. Der Einsatz ermöglicht es, spezifische Herausforderungen in Produktentwicklungsprozessen gezielt anzugehen und die Effektivität der Integration weiter zu steigern. Somit erhalten Unternehmen nicht nur Werkzeuge zur Auswahl und Anpassung von Methoden, sondern auch einen Rahmen zur proaktiven Analyse und Verbesserung ihrer Prozesse.

Verbesserung der Verfügbarkeit von Methodenwissen: Die Arbeit trägt wesentlich zur Verbesserung des Methodenwissens für datengetriebene Ansätze in der Produktentwicklung bei. Die vorgestellte Ontologie bietet eine strukturierte Methode zur Integration von Wissen aus verschiedenen Quellen, was Unternehmen ermöglicht, datengetriebene Methoden effektiver zu nutzen.

Herausforderung der Messbarkeit der Prozessverbesserung: Ein wesentliches Anliegen bei der Integration datengetriebener Methoden in den Produktentwicklungsprozess besteht darin, die erzielten Prozessverbesserungen zu messen und zu bewerten. Die bisherigen Ansätze in der Literatur zeigen, dass die Bewertung der Prozessverbesserung eine komplexe Aufgabe ist. Die Vielfalt der Prozesse, die unterschiedlichen Anforderungen und die Schwierigkeiten bei der Standardisierung machen es schwierig, klare und objektive Metriken zu etablieren. Insbesondere im Bereich der Produktentwicklung, in dem viele Prozessschritte nicht linear oder standardisiert sind, gestaltet sich die Feststellung von Effizienzgewinnen als herausfordernd.

Die Schwierigkeit bei der Messbarkeit der Prozessverbesserung liegt nicht nur in der Quantifizierung von Zeit- und Kostenersparnissen, sondern auch in der Berücksichtigung von qualitativen Faktoren. Dazu gehören die Erhöhung der Datenqualität, die Zufriedenheit der Mitarbeiter und die verbesserte Entscheidungsfindung auf Grundlage der generierten Erkenntnisse. Speziell kleine und mittelständische Unternehmen könnten Schwierigkeiten haben, den tatsächlichen Nutzen der Integration zu erfassen und zu bewerten, da ihre Ressourcen begrenzt sind und die Prozessverbesserungen möglicherweise nicht unmittelbar sichtbar sind.

Es ist daher von entscheidender Bedeutung, nicht nur auf quantitative Metriken zu setzen, sondern auch auf qualitative Faktoren einzugehen und eine umfassende Bewertung der Prozessverbesserung vorzunehmen. Dies erfordert eine sorgfältige Abwägung der individuellen Anforderungen und Zielsetzungen eines Unternehmens im Kontext der digitalen Transformation.

Fazit: Die Integration datengetriebener Methoden in den Produktentwicklungsprozess ist zweifellos ein vielversprechender Ansatz, um Effizienzgewin-

ne und Innovationspotenziale zu erschließen. Die vorgestellten Ansätze bieten eine solide Grundlage für Unternehmen, um diese Methoden erfolgreich einzuführen, wobei die Herausforderung der Messbarkeit der Prozessverbesserung jedoch eine umfassende und ausgewogene Bewertung erfordert, die über rein quantitative Metriken hinausgeht und qualitative Aspekte berücksichtigt. Dies stellt sicher, dass Unternehmen die tatsächlichen Vorteile der Integration datengetriebener Methoden vollständig erfassen und ihre Potenziale optimal nutzen können.

Diese Herausforderung wurde zu Beginn der Arbeit in einer zentralen wissenschaftlichen Zielstellung formuliert, bei der eine Methode zur Integration datengetriebener Methoden in den Produktentwicklungsprozess entwickelt werden sollte, um die Potenziale datengetriebener Methoden nutzbar zu machen. Dieses Ziel wurde in drei Forschungsfragen spezifiziert (siehe Kapitel 3.2), die nachfolgend beantwortet werden.

1. Welche Schritte sind nötig, um Data-Mining und Machine-Learning Methoden in bestehende Prozesse des technisch-mechanischen Entwickelns zu integrieren?

Die Grundlage der entwickelten Methode zur Nutzbarmachung von Datenpotenzialen ist ein fünfphasiges Vorgehen. In der Vorbereitungsphase steht die Bewertung des Digitalisierungsstands eines Unternehmens im Fokus. Dabei wird eine Prozesslandkarte erstellt und evaluiert, welche Prozesse sich am besten für die erfolgreiche Integration von Methoden eignen. Zusätzlich wird ein erster Digitalisierungsstand des Unternehmens erfasst. Die darauffolgende erste Phase beinhaltet die umfassende Erfassung und Dokumentation des aktuellen Entwicklungsprozesses. Hierbei werden Mitarbeiter-, Daten- und Leitungssicht berücksichtigt, und die Prozessdokumentation erfolgt durch eine kombinierte Darstellung aus BPMN und Wertstrommethode. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen nicht nur einen tieferen Einblick in den aktuellen Stand des Unternehmens, sondern ermöglichen auch eine Analyse und Optimierung des Produktentwicklungsprozesses. Die zweite Phase konzentriert sich auf die Identifikation von Schwachstellen im gesamten Prozessablauf. Durch die Analyse mithilfe des Reifegradmodells Digital Engineering werden nicht nur Leistungen auf verschiedenen Ebenen überprüft, sondern auch Schwachstellen erkannt. In der dritten Phase erfolgt die Analyse von Potenzialen zur Integration von Digital Engineering-Methoden. In diesem Abschnitt wird eine systematische Methode zur Analyse der Potenziale von datengetriebenen Verfahren in virtuellen Produktentwicklungsprojekten vorgestellt. Das Ziel besteht darin, Anwendungsfälle und geeignete Methoden für die Integration zu identifizieren. Mithilfe von speziell entwickelten Aufgabenclustern können Unternehmen testen, ob die Methoden der datengetriebenen Produktentwicklung in unterschiedlichen

Teilaufgaben der Produktentwicklung anwendbar und welche Kriterien dabei zu beachten sind. Die vierte Phase ist entscheidend für die erfolgreiche Implementierung datengetriebener Methoden im Unternehmenskontext. Das übergeordnete Ziel ist die praktische Integration von Digital Engineering Methoden in bestehende Prozesse, um einen implementierten Pilotprozess zu realisieren. Diese Phase erfordert eine individuelle Herangehensweise, da Unternehmen unterschiedliche Kompetenzen und Schwächen aufweisen. Die Integration von Digital Engineering-Techniken in den Konstruktionsprozess wird durch eine maßgeschneiderte Digital Engineering-Methode ermöglicht, was besonders auf die Motivation und den effizienten Informationsfluss abzielt. Hierzu wurden Ansatzpunkte zur Anpassung von Digital Engineering Methoden definiert, die sowohl die Daten- als auch die IT- und Anwendersicht berücksichtigen. Insgesamt bieten die fünf Phasen einen strukturierten Ansatz für Unternehmen, um ihren Digitalisierungsstand zu bewerten, Schwachstellen zu identifizieren, Potenziale zu analysieren und datengetriebene Methoden erfolgreich zu implementieren. Dieser Prozess trägt dazu bei, nicht nur Engpässe zu beseitigen, sondern auch den gesamten Prozess an die sich wandelnden Anforderungen und Dynamiken anzupassen.

2. Wie lassen sich Anwendungsfälle für datengetriebene Methoden, insbesondere aus dem Bereich Data Mining und Machine Learning, in bestehenden Produktentwicklungsprozessen identifizieren? Zur Identifikation von Anwendungsfällen in bestehenden Prozessen wurde das Reifegradmodell Digital Engineering entwickelt. Die Analyse umfasst die Bereiche Technologie, Daten, Qualität und Organisation. Im Bereich der Technologie liegt der Fokus auf der Bewertung der bestehenden IT-Infrastruktur und der systemischen Verknüpfung von Prozessen. Potenzielle Anwendungsfälle können in Schwachstellen oder Bereichen gefunden werden, in denen digitale Werkzeuge, Systemintegration oder Automatisierung den größten Nutzen bringen könnten. Die Datenanalyse konzentriert sich auf die Bewertung der vorhandenen Datenbasis und Datenerfassungsmethoden. Hierbei werden potenzielle Datenübertragungspunkte identifiziert, um die nahtlose Integration von Daten zwischen Abteilungen zu gewährleisten. Die effektive Bereitstellung und Nutzung von Daten in verschiedenen Prozessschritten ist ebenfalls entscheidend. Die Qualitätsdimension legt den Fokus auf die Bewertung von Prozessqualität, Rückverfolgbarkeit, Übertragungszeiten und Sicherheitsaspekten. Hierbei können datengetriebene Methoden dazu beitragen, Herausforderungen in Bezug auf Datenqualität und -sicherheit zu bewältigen. Die organisatorische Dimension bezieht sich auf Verantwortlichkeiten, Qualifikationen und Schnittstellen. Die Integration datengetriebener Methoden erfordert oft eine Anpassung von Verantwortlichkeiten und klare Definitionen von Schnittstellen zwischen verschiedenen Teams.

3. Wie lassen sich auf Basis der vorliegenden Randbedingungen im identifizierten Anwendungsfall der Produktentwicklung passende datengetriebene Methoden aus dem Bereich Data-Mining und Machine-Learning auswählen, um die Arbeitsschritte zu unterstützen?

Zur Unterstützung der Methodenauswahl wurde die Ontologie AI4PD entwickelt und vorgestellt. Diese ermöglicht die strukturierte Erfassung und Verwaltung von Wissen über datengetriebene Methoden, Werkzeuge und Tools und bringt diese in Verbindung mit dem Produktentwicklungsprozess. Hierdurch ist es möglich, auf Basis vorliegender Randbedingungen in selektierten Anwendungsfällen, passende datengetriebene Methoden zu identifizieren. Ein gezieltes Abfragen der Ontologie, beispielsweise über eine Abfragesprache wie SPARQL, führt zu den relevanten Informationen. Im Rahmen der Ontologie-Entwicklung wurde hierzu eine nutzerfreundliche Oberfläche realisiert, die eine Abfrage über natürliche Spracheingabe erlaubt. Die identifizierten, datengetriebenen Methoden werden im weiteren Verlauf gefiltert und priorisiert. Kriterien wie Genauigkeit, Trainingszeit oder Hardwareanforderungen fließen in diesen Prozess ein. Eine wichtige Rolle spielt dabei auch die Möglichkeit zur Wissenswiederverwendung, insbesondere wenn bereits erfolgreiche Lösungen in der Ontologie dokumentiert sind. Zur praxistauglichen Pflege und Erweiterung dieser Ontologie ist eine einfache Zugänglichkeit für Unternehmen hilfreich, beispielsweise im Stil eines Wikis, in dem interessierte Nutzer Informationen eingeben und auslesen können. Um sicherzustellen, dass die ausgewählten Methoden den spezifischen Anforderungen des Produktentwicklungsprozesses entsprechen, ist eine Test- und Evaluationsphase unerlässlich. Hierbei kann es notwendig sein, Anpassungen vorzunehmen und die Auswahl iterativ zu überprüfen. Insgesamt ermöglicht die systematische Anwendung der AI4PD-Ontologie eine fundierte und auf die individuellen Bedürfnisse angepasste Auswahl datengetriebener Methoden im Rahmen der Produktentwicklung.

Die Praxisrelevanz und Funktionsfähigkeit der entwickelten Methode wurden im Rahmen von zwei Case Studies in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen dargestellt. Hierbei wurde im ersten Fall die Analyse der Konstruktions- und Simulations-Prozesskette durchgeführt und auf dieser Grundlage eine Vorhersage von Finite-Elemente-Ergebnissen auf Basis von Regressionsmodellen realisiert. Die zweite Fallstudie behandelt ausschließlich den Prozess der FE-Simulation. Hierbei liegt der Fokus auf der Anpassung datengetriebener Methoden in Phase 4. Die gelöste Problemstellung behandelte das automatisierte Preprocessing von Simulationen, wobei hauptsächlich Klassifikationsalgorithmen zum Einsatz kamen. Aus Sicht der Industrie ist jedoch speziell die Messbarkeit der Prozessverbesserung oder die ex-ante Beurteilung der Einsparpotenziale von enormem Interesse und sollte in weiteren

Arbeiten näher analysiert werden. Zusätzlich wird in der nutzerfreundlichen Analyse und Abfrage von Ontologien mithilfe von NLP großes zukünftiges Potenzial gesehen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Alle großen Leistungen benötigen Zeit.

Maya Angelou

Die zunehmende Digitalisierung und der verstärkte Einsatz von Künstlicher Intelligenz, Machine Learning und Deep Learning haben in der akademischen und industriellen Welt erhebliche Aufmerksamkeit erlangt. In Deutschland ist ein deutlicher Trend zu einer intensiveren Auseinandersetzung mit KI zu erkennen, wie aktuelle Studien zeigen. Die Bedeutung dieser Entwicklungen wird von Organisationen erkannt und eröffnet neue Blickwinkel auf die Entwicklung von Produkten. Im Zuge dieser Transformation steht die Produktentwicklung vor einer bedeutenden Herausforderung: Trotz der exponentiell wachsenden Menge an generierten Daten werden diese oft nicht in ihrem vollen Potenzial genutzt. Hier setzt das Konzept des Digital Engineering an, welches die gezielte Nutzung dieser Daten ermöglicht und einen Paradigmenwechsel in der Produktentwicklung einleitet. Dennoch stehen Firmen bei der Integration von Digital-Engineering-Methoden in ihre bestehenden Abläufe vor beträchtliche Herausforderungen. Speziell kleine und mittlere Unternehmen, das Rückgrat der deutschen Wirtschaft, sehen sich im Zuge der digitalen Transformation mit zusätzlichen Herausforderungen konfrontiert (siehe Abschnitt 1.1). Neben Kostensenkung und der Bedeutung von Wissen als kritischem Erfolgsfaktor stehen Markterweiterung und Innovation im Fokus. Die Integration in digitale Ökosysteme und die Zusammenarbeit mit Partnern sind wichtige Faktoren, um digitale Barrieren zu überwinden. Bisherige Forschungsarbeiten konzentrieren sich jedoch oft auf Einzelaspekte der digitalen Transformation oder liefern fallbezogene Nachweise.

Hieraus motiviert sich die vorliegende Arbeit. Die Analyse des gegenwärtigen Standes der Wissenschaft und Forschung hat gezeigt, dass die deutsche Wirtschaft den Wert von Informationen und Daten zwar als zentralen Faktor betrachtet, dem jedoch bis jetzt keine ausreichende Beachtung geschenkt wurde. Im Kontrast hierzu steht, dass es grundsätzlich ausreichend Implementierungen datengetriebener Methoden sowie bereits realisierte Anwendungsfälle sowohl im kommerziellen als auch im wissenschaftlichen Bereich gibt. Im Bereich des Geschäftsprozessmanagements fehlen spezifische Modelle für eine gezielte Analyse datengetriebener Methoden. Die Herausforderungen liegen in der Integration dieser Methoden in industrielle Abläufe

sowie in der mangelnden Verfügbarkeit von kritischen Daten und einem fehlenden ganzheitlichen Bewertungsansatz für Prozesse. Um die effektive Nutzung von Daten als zentralen Produktionsfaktor zu ermöglichen, müssen die Methoden und Lösungen verbessert werden.

Um die aus dem Stand der Wissenschaft und Technik identifizierten Herausforderungen zu bestätigen, wurde eine Industriestudie mit 48 Teilnehmenden durchgeführt. Es konnte bestätigt werden, dass die Potenziale datengetriebener Methoden in der Produktentwicklung bisher nicht ausreichend genutzt wurden. Als zentrale Herausforderungen wurden Wissensdefizite über Methoden, Werkzeuge und Potenziale sowie der Mangel an qualifiziertem Personal identifiziert. Angesichts dessen ist das zentrale wissenschaftliche Ziel die Entwicklung einer Methode zur Unterstützung der Identifikation von Anwendungsfällen und Integration datengetriebener Methoden in den Produktentwicklungsprozess, insbesondere im Bereich der technisch-mechanischen Entwicklung nach VDI 2206.

Hierzu wurde ein fünfphasiges Vorgehen entwickelt, beginnend mit der Bewertung des Digitalisierungsstands eines Unternehmens, gefolgt von der Erfassung und Dokumentation des Entwicklungsprozesses sowie der Identifikation von Schwachstellen. Die Analyse von Potenzialen und die Integration der Methoden in bestehende Prozesse schließen den Prozess ab. Zur Bewertung der Prozesse wurde das Reifegradmodell Digital Engineering entwickelt, um potenzielle Bereiche zu identifizieren, in denen digitale Werkzeuge den größten Nutzen bringen könnten. Dies umfasst die Analyse von Technologie, Datenqualität und organisatorischen Aspekten. Abschließend wurde die Ontologie AI4PD eingeführt, um Wissen über datengetriebene Methoden zu strukturieren und zu verwalten. Eine systematische Auswahl und Priorisierung der Methoden basierend auf spezifischen Anforderungen erfolgt, gefolgt von einer Test- und Evaluationsphase.

Die Anwendbarkeit der Methode konnte im industriellen Kontext bestätigt und die gestellten Forschungsfragen beantwortet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen nicht nur die gegenwärtigen Möglichkeiten und Herausforderungen, sondern werfen auch einen Blick in die vielversprechende Zukunft dieses Forschungsfeldes. Mit einem fundierten Verständnis der aktuellen Trends und einer klaren Ausrichtung auf zukünftige Entwicklungen wird die KI zweifellos eine Schlüsselrolle in der Transformation der Produktentwicklung spielen und somit die Brücke zu einer vielversprechenden Ära der intelligenten und effizienten Produktinnovation schlagen.

In diesem Kontext erinnert das Zitat aus der Einleitung daran, wie entscheidend KI für unsere künftige gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung ist. „Ich glaube, dass KI entscheiden wird, ob wir bei Wachstum, bei Arbeits-

plätzen, bei Wohlstand die nächsten Jahre Schritt halten.“ Diese Aussage betont die strategische Bedeutung der Künstlichen Intelligenz, nicht nur für die Produktentwicklung, sondern auch für die gesamte gesellschaftliche Entwicklung. Ein tiefgehendes Verständnis und eine proaktive Ausrichtung auf die Entwicklungen in diesem Bereich sind somit von zentraler Bedeutung, um den Herausforderungen der Zukunft erfolgreich zu begegnen und die Chancen, die die KI bietet, bestmöglich zu nutzen.

9 Summary and Outlook

All great achievements require time.

Maya Angelou

The increasing digitization and intensified utilization of artificial intelligence, machine learning, and deep learning have gained significant attention in the academic and industrial realms. In Germany, a clear trend towards more intensive engagement with AI is evident, as indicated by recent studies. Organizations recognize the significance of these developments, opening new perspectives on product development.

Amidst this transformation, product development faces a substantial challenge: despite the exponentially growing volume of generated data, it is often not fully leveraged. This is where the concept of Digital Engineering comes into play, enabling targeted use of this data and initiating a paradigm shift in product development. However, companies encounter considerable challenges in integrating DE methods into their existing workflows. Particularly, small and medium-sized enterprises, the backbone of the German economy, face additional challenges in the digital transformation (see Section 1.1). Market expansion and innovation are focal points, alongside cost reduction and the significance of knowledge as a critical success factor. Integration into digital ecosystems and collaboration with partners are crucial factors in overcoming digital barriers. However, existing research typically focuses on specific aspects of digital transformation or provides case-specific evidence.

This motivates the present work. Analysis of the current state of science and research has revealed that the German economy views the value of information and data as a central factor, yet it has not received sufficient attention. In contrast, there are sufficient implementations of data-driven methods and realized use cases in both commercial and scientific domains. In the field of business process management, specific models for a targeted analysis of data-driven methods are lacking. Challenges lie in the integration of these methods into industrial processes, the lack of critical data availability, and a holistic evaluation approach for processes. To enable the effective use of data as a central production factor, methods, and solutions need improvement.

To confirm the challenges identified from the state of science and technology, an industrial study with 48 participants was conducted. It was confirmed that the potentials of data-driven methods in product development are not

sufficiently utilized. Knowledge gaps regarding methods, tools, and potentials, as well as a shortage of qualified personnel, were identified as central challenges.

Given this, the central scientific goal is the development of a method to support the identification of use cases and integration of data-driven methods into the product development process, particularly in the field of technical-mechanical development according to VDI 2206.

A five-phase procedure was developed for this purpose, starting with an assessment of a company's digitalisation status, followed by the recording and documentation of the development process and the identification of weak points. The process is concluded by analysing potential and integrating the methods into existing processes. To assess the processes, the digital engineering maturity model was developed to identify potential areas in which digital tools could bring the greatest benefit. This includes the analysis of technology, data quality and organisational aspects. Finally, the AI4PD ontology was introduced to structure and manage knowledge about data-driven methods. Methods are systematically selected and prioritised based on specific requirements, followed by a test and evaluation phase.

The applicability of the method was confirmed in an industrial context, and the research questions were addressed. From an industrial perspective, however, the quantifiable benefits of process enhancement or the pre-analysis of potential savings are of considerable significance and warrant further investigation in future endeavours. Additionally, significant future potential is seen in the user-friendly analysis and querying of ontologies using NLP.

The insights gained highlight current possibilities and challenges and provide a glimpse into the promising future of this research field. With a profound understanding of current trends and a clear focus on future developments, AI will undoubtedly play a key role in the transformation of product development, bridging the gap to a promising era of intelligent and efficient product innovation.

In this context, the quote from the introduction reminds us of how crucial AI is for our future societal and economic development. "I believe that AI will decide whether we keep up with growth, jobs, and prosperity in the coming years." This statement emphasizes the strategic importance of Artificial Intelligence, not only for product development but also for overall societal development. An in-depth understanding and proactive alignment with developments in this area are thus crucial to successfully address future challenges and make the most of the opportunities that AI offers.

Anhang

Ergänzungen zu Kapitel 2.4.4

Den nachfolgenden Tabellen kann eine nicht abschließende Übersicht verfügbarer Toolboxen des Data-Minings und maschinellen Lernens entnommen werden.

Tabelle A1: Kommerzielle Software für Data-Mining und maschinelles Lernen (Auszug) nach [163, 164]

Software	Link
Algolytics Advanced Miner	https://algolytics.com/products/advancedminer/
Alteryx	https://www.alteryx.com/de#main
Alyuda Forecaster XL	https://www.alyuda.com/
Amazon Web Services	https://aws.amazon.com/de/big-data/datalakes-and-analytics/
Bayesia Lab	https://www.bayesia.com/
Bissantz DeltaMaster	https://www.bissantz.de/software/deltamaster/
C5.o	https://www.rulequest.com/see5-info.html
ChapsVision	https://www.chapsvision.fr/data/data-mining-machine-learning/
Civis	https://www.civisanalytics.com/
Data Applied	http://www.data-applied.com/
Databricks	https://databricks.com/de/
Dataiku	https://www.dataiku.com/
Exeura Professional	https://www.exeura.eu/
Frontline Solvers	https://www.solver.com/xlminer-platform
Google Cloud	https://cloud.google.com/products/ai?hl=de
IBM SPSS Modeler	https://www.ibm.com/products/spss-modeler
IBM SPSS Statistics	https://www.ibm.com/products/spss-statistics
ISoft	https://isoft.fr/en/
JMP	https://www.jmp.com/de_de/home.html

Software	Link
Keras	https://keras.io/
Lityx Machine Learning	https://lityx.com/predictive-analytics/
LPA Data Mining tools	https://www.lpa.co.uk/ind_pro.htm
MATLAB	https://www.mathworks.com/products/matlab.html
Megaputer	https://www.megaputer.com/
Microsoft SQL Server	https://www.microsoft.com/de-de/sql-server
NAG Data Mining Components	https://www.nag.com/content/nag-data-mining-components
Neural Designer	https://www.neuraldesigner.com/
NXG Logic Explorer	https://www.nxglogic.com/explorer.html
Oracle Data Miner	https://www.oracle.com/big-data/technologies/dataminer/
Partek	https://www.partek.com/
PI Exchange	https://www.pi.exchange/the-ai-and-analytics-engine
PolyVista	https://www.polyvista.com/
Predixion	https://www.predixionsoftware.com/predixion/
Salford Predictive Modeler	https://www.minitab.com/en-us/products/spm/
SAS Enterprise Miner	https://www.sas.com/de_de/software/enterprise-miner.html
Stata	https://www.stata.com/
Teradata Database	https://www.teradata.com/
TIBCO Data Science	https://www.tibco.com/products/data-science
Upsight Analytics	https://www.upsight.com/analytics/
Viscovery data mining suite	https://www.viscovery.net/
XLMiner	https://www.xlminer.com/
XLSTAT	https://www.xlstat.com/de/

Tabelle A2: Open-Source Software für Data-Mining und maschinelles Lernen (Auszug) nach [163, 164]

Software	Link
ADAMS	https://adams.cms.waikato.ac.nz/
Apache Mahout	https://mahout.apache.org//
CMSR Data Miner	http://www.roselladb.com/starprobe.htm
CRAN	https://cran.r-project.org/web/views/MachineLearning.html
Databionic ESOM Tools	http://databionic-esom.sourceforge.net/
DataMelt	https://datamelt.org/
ELKI	https://elki-project.github.io/
GIFT	http://www.gnu.org/software/gift/
Gnome Data Mining Tools	https://www.togaware.com/datamining/gdatamine/
KEEL	http://www.keel.es/
KNIME	https://www.knime.com/
LynxKite	https://lynxkite.com/
Mining Mart	http://mmart.cs.uni-dortmund.de/
ML-Flex	http://mlflex.sourceforge.net/
MLDB	https://mldb.ai/
Orange	https://orangedatamining.com/
Python	https://www.python.org/
PyTorch	https://pytorch.org/
R	https://www.r-project.org/
RapidMiner	https://rapidminer.com/
Rattle	https://rattle.togaware.com/
Scikit-learn	https://scikit-learn.org/stable/
Scilab	https://www.scilab.org/
Shogun	https://www.shogun-toolbox.org/
TANGARA	http://chirouble.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra/index.html

Software	Link
TensorFlow	https://www.tensorflow.org/
Vowpal Wabbit (Fast Learning)	https://hunch.net/~vw/
WEKA	https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/

Ergänzungen zu Kapitel 4.2

Im folgenden ist der Fragebogen zur Erfassung von Potenzialen und Status der KI in der Produktentwicklung aufgeführt. Die Umfrage wurde im Rahmen der studentischen Arbeit [S22] durchgeführt.

Tabelle A3: Umfrage zu Status und Potenzialen der KI in der Produktentwicklung

ID	Variable	Fragen/ Antworten
v_1	int	Zu welcher Unternehmenskategorie zählt Ihr Unternehmen?
	1	Kleinstunternehmen - bis 9 Mitarbeiter oder bis 2 Millionen € Umsatz
	2	Kleines Unternehmen - bis 49 Mitarbeiter oder bis 10 Millionen € Umsatz
	3	Mittleres Unternehmen - bis 249 Mitarbeiter oder bis 50 Millionen € Umsatz
	4	Großunternehmen - ab 250 Mitarbeitern oder mehr als 50 Millionen € Umsatz
v_2	int	In welcher Position sind Sie tätig?
	1	Unternehmensleitung
	2	Sonstiges:
	3	Forschung & Entwicklung
	4	Produktionsplanung
	5	IT
	6	Konstruktion
	7	Design
	8	Produktmanagement
	9	Personalwesen
	10	Vertrieb
11	Anwendungstechnik	
v_3	varchar	Sonstiges:

ID	Variable	Fragen/ Antworten
v_4	int	In welcher Branche ist Ihr Unternehmen tätig?
	1	Automobilbranche
	2	Zulieferer
	3	Dienstleistungsbranche
	4	Werkzeugbau
	5	Luft- und Raumfahrt
	6	Energieversorgung & Energiewirtschaft
	7	Medizintechnik
	8	Sonstiges
v_5	varchar	Forschung / Wissenschaft
v_49	int	Sonstiges
	int	KI hat in meiner Branche eine große Bedeutung:
	1	Stimme zu
	2	Stimme eher zu
v_50	3	Stimme eher nicht zu
	4	Stimme nicht zu
	int	Ich bin mit den Potenzialen von KI vertraut:
	1	stimme voll zu
v_51	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
	int	Wie gut ist Ihr Unternehmen im Vergleich zum Wettbewerb beim Thema KI aufgestellt?
v_52	1	Sehr gut
	2	Gut
	3	Mittelmäßig
	4	Schlecht
v_52	int	Hat sich Ihr Unternehmen mit der Thematik KI auseinandergesetzt?
	1	Nein
	2	Ja, aber zu dem Entschluss gelangt, dass es unnötig für unser Unternehmen ist
	3	Ja, aber fehlendes Wissen / Kompetenzen für die Einführung
	4	Ja, aber Respekt vor der tatsächlichen Umsetzung
5	Ja, KI-Einsatz ist in Planung	

ID	Variable	Fragen/ Antworten
	6	Ja, wir nutzen KI-Lösungen
	7	Sonstiges:
	8	Ja, aber keine potenzielle Anwendungsmöglichkeit identifiziert
v_53	varchar	Sonstiges:
	Wenn ja, wie?	
v_54	int	a) Einstellen neuer Mitarbeiter im Bezug auf KI
	2	geplant
	3	nicht geplant, aber vorstellbar
	4	nicht vorstellbar
	5	in Umsetzung / bereits umgesetzt
v_78	int	b) Weiterbildungsmaßnahmen von Mitarbeitern, um KI-Fachwissen anzueignen und mit dem Thema KI vertraut zu machen
	1	geplant
	2	nicht geplant, aber vorstellbar
	3	nicht vorstellbar
	4	in Umsetzung/ bereits umgesetzt
v_80	int	c) Einsatz externer Berater/-innen zur Bewertung und Auswahl von KI-Lösungen
	1	geplant
	2	nicht geplant, aber vorstellbar
	3	nicht vorstellbar
	4	in Umsetzung / bereits umgesetzt
v_9	int	Durch den KI-Einsatz in der Produktentwicklung werden Unternehmen einen möglichen Wettbewerbsvorteil in den nächsten zwei Jahren haben:n
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
v_10	int	Durch den KI-Einsatz in der Produktentwicklung werden Unternehmen einen möglichen Wettbewerbsvorteil in den nächsten 5 - 10 Jahren haben:
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu

ID	Variable	Fragen/ Antworten
	4	stimme absolut nicht zu
v_11	int	Der KI-Einsatz in der Produktentwicklung ist heutzutage deutschlandweit noch nicht weit verbreitet:
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
v_12	int	Unternehmen setzen sich mit dem Thema KI zu wenig auseinander
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
v_13	int	Durch KI werden neue, datengetriebene Geschäftsfelder ermöglicht:
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
v_14	int	Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen behindern einen gewinnerbindenden Einsatz von KI:
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
v_15	int	KI steigert die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
v_16	int	KI bietet künftig viele Vorteile für ein Unternehmen:
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu

ID	Variable	Fragen/ Antworten
v_17	int	KI-gestützte Anwendungen innerhalb eines Unternehmens werden Aufgabenfelder in bestimmten Aufgabenbereichen überflüssig machen:
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
v_18	int	Finanzielle Hilfen und Weiterbildungen (auch Informationsmaterial) seitens des Staates können das Thema KI bei den Unternehmen attraktiver machen und diesen dazu behelfen, KI im eigenen Unternehmen zu integrieren:
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
v_19	int	Innerhalb meines Unternehmens gibt es viele Widerstände oder wenig Akzeptanz gegenüber KI-Lösungen in der Produktentwicklung:
	1	stimme voll zu
	2	stimme eher zu
	3	stimme eher nicht zu
	4	stimme absolut nicht zu
Welche Gründe würden Sie hierfür benennen? (0 - stimme nicht zu, 1 stimme zu)		
v_20	int	Mangelnde Kommunikation der Vorgesetzten
v_21	int	Fehlendes Fachwissen über die Methoden und Tools sowie deren Einsatz
v_22	int	Fehlendes Wissen über (Digitalisierungs-)Potenziale in der Produktentwicklung
v_23	int	Fehlendes qualifiziertes Personal
v_24	int	Fehlendes Datenmanagement innerhalb des Unternehmens
v_25	int	Zu geringes Datenvolumen
v_26	int	Mangelnde / fehlende Datentransparenz
v_27	int	Unsicherheit bei der Anwendung von KI-Lösungen im eigenen Unternehmen
v_28	int	Keine passenden / individuell anpassbaren KI-Lösungen für das Unternehmen
v_29	int	Fehlende technische Ausstattung (z.B.: ausreichende Speicherkapazität, Rechenleistung)

ID	Variable	Fragen/ Antworten
v_30	int	Unsicherheit / Unklarheit bezüglich der Nutzungsrechte an den erhobenen Daten (Datenschutz)
v_31	int	Fehlende Standards
v_32	int	Mangelnde Cyber-Sicherheit
v_33	int	Fehlende / begrenzte finanzielle Mittel
v_35	int	Sonstiges:
v_36	varchar	Sonstiges:
Wo sehen Sie Potenziale von dem KI-Einsatz in der Produktentwicklung Ihres Unternehmens? (0 - stimme nicht zu, 1 stimme zu)		
v_37	int	Entscheidungsfindung mithilfe von Daten optimieren / unterstützen
v_38	int	Besseres Verständnis für Kunden, Produkte und Märkte
v_39	int	Verwendung der Daten zur Optimierung und Weiterentwicklung der Produkte
v_40	int	Verbesserung der Produktqualität und Prozessbeherrschung über den gesamten Produktlebenszyklus
v_41	int	Unterstützung der Entwickler bei Ihren Tätigkeiten und Entscheidungen während der Produktentwicklung
v_42	int	Bewältigung des zunehmenden Datenvolumens infolge der steigenden Digitalisierung
v_43	int	Vereinfachung der Auswertung, Analyse und Interpretation großer Datenmengen
v_44	int	Nachverfolgbarkeit aller Daten
v_45	int	Schnellere und flexiblere Reaktion auf disruptive Veränderungen des Marktes möglich
v_46	int	Sonstiges:
v_47	varchar	Sonstiges:
v_48	blob	Feedback

Tabelle A4: Ergebnisse zur Umfrage zu Status und Potenzialen der KI in der Produktentwicklung, Frage IDs v_1 bis v_5

ID	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
1	3	10	-1	1	-1
2	3	8	-1	8	Industrie Elektronik
3	4	2	Consulting	3	-1
4	4	1	-1	8	Maschinenbau

Anhang

ID	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
5	3	3	-1	2	-1
6	4	3	-1	8	Anlagenbau
7	4	3	-1	8	Sondermaschinenbau
8	3	2	Abteilungsleiter FuE und Konstruktion	2	-1
9	4	2	Digitalisierung	8	Maschinenbau
10	4	3	-1	6	-1
11	4	3	-1	8	Logistik
12	4	8	-1	8	Medien
13	4	6	-1	2	-1
14	4	3	-1	2	-1
15	3	3	-1	8	Antriebstechnik
16	3	10	-1	1	-1
20	4	5	-1	2	-1
21	4	2	Fortbildung	3	-1
22	2	3	-1	9	-1
23	4	3	-1	1	-1
24	4	3	-1	8	Großmaschinenbau
25	4	5	-1	1	-1
26	4	3	-1	6	-1
27	4	3	-1	3	-1
28	4	3	-1	2	-1
31	1	6	-1	8	Produktentwicklung
32	4	3	-1	1	-1
33	4	4	-1	7	-1
34	4	6	-1	8	Anlagenbau
35	2	3	-1	2	-1
36	4	3	-1	6	-1
37	2	8	-1	8	Sensorik
39	4	3	-1	8	Metallverarbeitung
40	4	3	-1	3	-1
41	4	3	-1	8	Antriebstechnik
43	4	3	-1	8	Halbleiter
44	4	3	-1	2	-1
45	4	3	-1	9	-1
46	4	3	-1	1	-1
47	4	3	-1	1	-1

ID	v_1	v_2	v_3		v_4	v_5
49	4	6	-1		1	-1
51	4	2		Digitale Transformation	7	-1
52	4	3	-1		1	-1
53	4	3	-1		1	-1
55	4	2		Marketing	8	Software
56	1	3	-1		3	-1
57	4	2		Mittleres Management	8	IT und TelCo
58	4	3	-1		1	-1

Tabelle A5: Ergebnisse zur Umfrage zu Status und Potenzialen der KI in der Produktentwicklung, Frage IDs v_49 bis v_19

ID	v_49	v_50	v_51	v_52	v_53	v_54	v_78	v_80	v_9	v_10	v_11	v_12	v_13	v_14	v_15	v_16	v_17	v_18	v_19
1	2	2	4	3	-1	3	2	2	2	-1	2	1	1	2	2	2	2	1	3
2	4	3	1	1	-1	-1	-1	-1	4	3	2	3	3	4	3	3	2	2	3
3	2	2	3	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	2	2	1	3	2	2	2	1	2
4	2	3	3	4	-1	3	2	2	3	2	1	2	2	3	2	2	2	2	3
5	4	3	3	8	-1	-1	-1	-1	3	2	1	3	2	3	3	2	3	2	3
6	3	2	3	5	-1	4	2	4	3	2	1	2	2	3	2	2	2	2	3
7	2	1	3	6	-1	3	1	2	2	-1	1	2	1	2	2	1	2	3	3
8	4	2	4	1	-1	-1	-1	-1	3	2	2	2	2	3	3	2	1	2	2
9	2	1	2	6	-1	5	4	4	2	-1	2	2	1	2	1	1	1	1	2
10	4	1	3	8	-1	-1	-1	-1	2	-1	2	2	2	4	3	3	1	1	3
11	1	2	2	6	-1	5	4	2	2	-1	2	1	1	3	1	1	2	1	2
12	2	3	3	6	-1	5	4	2	1	-1	2	2	1	3	2	2	2	2	3
13	4	3	3	1	-1	-1	-1	-1	2	-1	1	2	2	3	3	3	2	3	1
14	2	2	2	6	-1	5	4	4	1	-1	2	2	2	3	1	1	2	2	3
15	3	2	4	8	-1	-1	-1	-1	4	4	1	1	2	2	3	3	3	3	2
16	2	2	2	3	-1	3	2	2	2	-1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
20	2	1	2	6	-1	4	1	3	2	-1	2	2	2	3	2	2	2	1	3
21	1	1	1	5	-1	3	4	2	1	-1	2	3	1	3	1	1	3	2	3
22	2	2	3	4	-1	5	4	3	2	-1	2	1	1	3	2	2	2	2	3
23	2	2	2	5	-1	5	4	4	3	1	2	3	1	4	1	1	1	3	4
24	4	2	4	8	-1	-1	-1	-1	4	4	1	4	3	2	3	3	2	2	3
25	1	2	2	6	-1	5	4	4	1	-1	2	2	1	2	1	1	2	2	3

Anhang

ID	v_49	v_50	v_51	v_52	v_53	v_54	v_78	v_80	v_9	v_10	v_11	v_12	v_13	v_14	v_15	v_16	v_17	v_18	v_19
26	1	1	1	5	-1	5	4	4	1	-1	1	1	2	2	1	1	2	2	2
27	1	2	2	6	-1	2	4	2	2	-1	2	1	1	2	1	1	1	2	3
28	1	2	1	4	-1	5	2	2	1	-1	1	2	1	3	1	1	2	1	2
31	2	2	4	3	-1	4	2	3	3	2	1	1	2	3	2	2	2	1	3
32	2	2	3	5	-1	3	2	2	2	-1	1	1	3	3	2	1	1	1	3
33	2	2	2	5	-1	3	4	2	2	-1	2	2	2	2	2	2	2	2	3
34	2	2	2	6	-1	2	2	2	2	-1	2	2	2	3	2	2	3	2	4
35	4	2	4	1	-1	-1	-1	-1	3	2	3	1	1	2	2	1	1	2	1
36	3	1	3	5	-1	5	4	2	2	-1	2	2	1	1	1	1	3	2	4
37	2	3	3	5	-1	2	2	2	2	-1	2	2	2	3	2	2	3	2	3
39	4	3	4	8	-1	-1	-1	-1	2	-1	2	2	2	3	2	2	2	2	3
40	1	1	4	2	-1	-1	-1	-1	3	2	2	2	3	3	1	2	2	3	3
41	3	2	4	8	-1	-1	-1	-1	3	2	1	2	2	3	2	2	3	2	3
43	2	2	2	6	-1	3	2	3	3	2	1	3	3	4	1	2	4	3	4
44	1	1	4	2	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	3	1	1	2	2	1
45	1	1	3	6	-1	3	2	3	4	3	1	3	3	4	2	3	2	2	2
46	2	2	3	6	-1	3	4	1	2	-1	1	3	3	3	2	2	3	3	3
47	4	3	3	3	-1	4	4	4	3	2	1	2	3	3	2	2	2	2	3
49	2	2	3	5	-1	3	2	2	2	-1	2	2	2	3	2	2	2	2	3
51	2	2	3	3	-1	2	1	4	1	-1	1	1	3	3	1	2	2	3	2
52	1	3	3	6	-1	2	4	2	4	2	2	2	1	3	2	2	3	2	3
53	2	2	3	5	-1	2	2	2	2	-1	1	1	1	3	1	1	1	1	3
55	1	3	2	6	-1	5	2	3	1	-1	1	2	1	3	1	1	1	3	4
56	3	2	4	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	2	1	1	3	2	2	1	1	2
57	2	2	2	3	-1	5	1	2	2	-1	2	2	1	2	1	3	3	2	3
58	1	1	2	6	-1	5	4	4	1	-1	3	3	1	2	1	1	1	1	3

Tabelle A6: Ergebnisse zur Umfrage zu Status und Potenzialen der KI in der Produktentwicklung, Frage IDs v_20 bis v_36

ID	v_20	v_21	v_22	v_23	v_24	v_25	v_26	v_27	v_28	v_29	v_30	v_31	v_32	v_33	v_35	v_36
1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	-1
2	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
3	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1

ID	V_20	V_21	V_22	V_23	V_24	V_25	V_26	V_27	V_28	V_29	V_30	V_31	V_32	V_33	V_35	V_36
4	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	-1
5	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1
6	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	-1
7	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	-1
8	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Schwer einschätzbares Investitionsrisiko
9	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	-1
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	KI kann nicht für alles verwendet werden, dieser Glaube besteht aber häufig. Folglich gibt es Problemstellungen, die mit anderen Werkzeugen (z.B. Statistischen Auswertungen) einfacher und teilweise besser gelöst werden können + schwierige Validierung.
11	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1
12	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1
13	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	-1
14	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Zu allen aktuellen Problemen haben wir Lösungen. Deshalb wird ein KI-Einsatz gar nicht erst in Erwägung gezogen.
16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
20	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
21	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1
22	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	-1

Anhang

ID	v_20	v_21	v_22	v_23	v_24	v_25	v_26	v_27	v_28	v_29	v_30	v_31	v_32	v_33	v_35	v_36
23	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
24	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
25	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	-1
26	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	die Einsatzmöglichkeiten von KI-Methoden sind in Fertigung und Montage oft unbekannt
27	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-1
28	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1
31	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	-1
32	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1
33	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1
34	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
35	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	-1
36	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
37	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
39	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1
40	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	-1
41	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1
43	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
44	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
45	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	-1
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Beantwortung dieser Frage macht keinen Sinn, da der vorherigen Aussage nicht zu gestimmt wurde.
47	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1
49	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1
51	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	-1
52	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1
53	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1
55	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
56	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	-1

ID	v_20	v_21	v_22	v_23	v_24	v_25	v_26	v_27	v_28	v_29	v_30	v_31	v_32	v_33	v_35	v_36
57	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-1
58	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Tabelle A7: Ergebnisse zur Umfrage zu Status und Potenzialen der KI in der Produktentwicklung, Frage IDs v_37 bis v_48

ID	v_37	v_38	v_39	v_40	v_41	v_42	v_43	v_44	v_45	v_46	v_47	v_48
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	-1	-1
2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	-1
3	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	-1
4	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	-1	-1
5	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
6	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	-1	-1
7	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	-1	-1
												KI bedingt große verfügbare Datenmengen, die im Sondermaschinenbau nur teilweise vorhanden sind. Die Aussageschärfe der KI ist daher limitiert - in manchen Feldern aber ausreichend. KI-Lösungen als Produkt sind dagegen sehr attraktiv, können aber nur in enger Zusammenarbeit mit Nutzern/Kunden erarbeitet werden, da nur diese über die entsprechenden Produktionsdatensmengen verfügen.
8	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	-1	-1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-1	-1

ID	v_37	v_38	v_39	v_40	v_41	v_42	v_43	v_44	v_45	v_46	v_47	v_48
10	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	-1	Um KI noch mehr im Unternehmen anzuwenden, bedarf es einheitlicher Definitionen und bessere Kenntnisse über die erreichbaren Güten der Modelle. Aktuell findet häufig ein try-and-error Verfahren statt, dessen Ausgang maßgeblich vom Anwender und von der Vorverarbeitung der Daten abhängt. Die Datenmenge ist in vielen Unternehmen bereits vorhanden, ebenso wie der Zugriff auf die Daten mittels API Schnittstellen. Auch die Speicherung in Cloud Systemen (AWS, Google, IBM, SAP) ist häufig bereits gelöst. Ähnliches gilt für Server bzw. Virtual Machines für Webanwendungen. Evtl. sollte hier der Fokus noch mehr auf kleinere Unternehmen <1000 Mitarbeiter gelegt werden.
11	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	-1	-1
12	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	-1	-1

ID	v_37	v_38	v_39	v_40	v_41	v_42	v_43	v_44	v_45	v_46	v_47	v_48
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Ich sehe kaum Potenzial in meinem Unternehmen, das kann an mangelndem Wissen meinerseits liegen.	-1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-1	-1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Hier sehen wir eher das Potential, dass ein KI-Einsatz uns eher lähmen und verlangsamen würde ohne einen Mehrwert zu generieren.	Generell sehen wir kein Potential von KI-Methoden bei unserer Produktentwicklung. Die versprochenen Vorteile von KI scheinen nur auf dem Papier von Dienstleistern zu existieren und können meist nur für sehr spezielle Lösungen eingesetzt werden. In der Praxis ist es oft schon problematisch ein Problem zu identifizieren, bei dem ein KI-Einsatz überhaupt sinnvoll erscheint. Aktuell ist dies kein Thema mehr für uns.
16	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
20	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	-1	-1
21	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	-1	KI nicht nur interessant in der Produktentwicklung sondern auch in der Produktwartung
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-1	-1

ID	v_37	v_38	v_39	v_40	v_41	v_42	v_43	v_44	v_45	v_46	v_47	v_48
23	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	KI-gestützte Analyse von Engineering-Daten auf deren Datenqualität und die teilweise automatisierte Verbesserung mit KI	In vielen Situation fehlen große Mengen qualitativ hochwertiger Daten um größere Vorteile mit KI zu heben. Viele Unternehmen befinden sich gerade dabei Dateninfrastruktur aufzubauen und hochwertige Daten zu erzeugen. Ohne diese Basis kann KI in meinem Umfeld ihr Potential nicht ausschöpfen.
24	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-1	KI wird heute als Buzz-Word häufig auf solche Probleme angesetzt, wo es bislang mit konventionellen Möglichkeiten keine anwendbaren Lösungen gab. Anlernen (bestehender Lösungen) und Erkennen von ggf. bislang unentdeckten Mustern werden hier nicht den Durchbruch bringen. KI hilft uns weiter bei Fragestellungen deren prinzipielle Lösung bekannt, die nun aber automatisiert werden sollen. Hierfür ist KI-gemacht.
25	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	-1	-1

ID	v_37	v_38	v_39	v_40	v_41	v_42	v_43	v_44	v_45	v_46	v_47		v_48
26	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1		Nutzung vorhandener Funktionsbaugruppen zur Generierung von Varianten und Beherrschung des Variantenmanagements	Es ist eine Initiative zur Nutzung von KI-Methoden in der Entwicklung, im Anforderungsmanagement und in der Fertigungs-/Montageplanung erforderlich, die durch den Bund gefördert werden muss. Lösungen sind dann den individuellen Erfordernissen in den jeweiligen KMUs anzupassen - modulare Lösungen sind das Ziel.
27	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	-1		-1
28	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	-1		KI Lösungen und Potenziale sind weitestgehend nicht bekannt in der Produktentwicklung.
31	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	-1		-1
32	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	-1		-1
33	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1		-1
34	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-1		-1
35	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	-1		-1
36	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	-1		-1
37	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	-1		-1
39	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	-1		-1
40	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	-1		-1
41	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	-1		-1
43	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	-1		-1
44	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-1		-1
45	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	-1		-1
46	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	-1		-1
47	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	-1		-1
49	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	-1		-1

ID	v_37	v_38	v_39	v_40	v_41	v_42	v_43	v_44	v_45	v_46	v_47	v_48
51	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1
52	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	-1	-1
53	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	-1	-1
55	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	-1	-1
56	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	-1
57	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	-1	-1
58	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-1	-1

Ergänzungen zu Kapitel 5.1

Tabelle A8 gibt einen weiteren Überblick über die in Kapitel 5.1 definierten Aufgabencluster der Prdouktentwicklung.

Ergänzungen zu Kapitel 5.2

Im folgenden werden die detaillierten Klassendefinitionen der in Kapitel 5.2 vorgestellten Ontologie dargestellt. Sämtliche Definitionen wurden bereits in [P10] präsentiert.

Klasse *ProductDevelopmentProcess*

$$\begin{aligned}
 \textit{ProductDevelopmentProcess} &\sqsupseteq \textit{1hasSubprocess.SubProcess} \\
 &\sqsubseteq \textit{1doneBy.Team}
 \end{aligned}$$

Klasse *SubProcess*

$$\begin{aligned}
 \textit{SubProcess} &\sqsubseteq \textit{1hasTask.Task} \vee \exists \textit{hasSubprocess.SubProcess} \\
 &\sqsupseteq \textit{1generatesData.Data} \\
 &\sqsupseteq \textit{1UsesData.Data} \\
 &\sqsubseteq \textit{1isPartOfProcess.ProductDevelopmentProcess} \\
 &\sqsubseteq \textit{1isPartOf.TaskCluster} \\
 &\sqsubseteq \textit{1doneBy.Team} \vee \textit{1doneBy.Person}
 \end{aligned}$$

Tabelle A8: Übersicht über die definierten Aufgabenschwerpunkte.

Cluster	Ziel	Wissensarbeit	Änderung des Datentyps	Eingabe	Ausgabe
Erstellung von Berichten Freigabe	Dokumentation	nein	ja	Ingenieursdaten	Bericht
	Freigabe definierter Statuswerte	ja	ja	Bericht	Entscheidung
Zusammenhänge	Umwandlung von Eingaben in definierte Ausgaben	ja	ja	Ingenieursdaten	unterschiedlich, aber Ingenieursdaten
	Verwendung alter Daten für die Generierung neuer Produkte	ja	nein	Ingenieursdaten	identisch mit Eingabe
Ergebnisbewertung	Bewertung von Messungen oder Simulationen	ja	ja	Ingenieursdaten	Plausibilitätsprüfung
	Pflege von Wissensmanagementsystemen	nein	ja	Wissen	formalisiertes Wissen
Beauftragung	Übertragung von Informationen an Subunternehmer	nein	ja/nein	aufgabenabhängig	aufgabenabhängig
	Beschaffung fehlender Daten oder Informationen	nein	nein	aufgabenabhängig	aufgabenabhängig

Klasse *Task*

$$\begin{aligned} \text{Task} &\sqsubseteq= \text{isPartOfProcess.SubProcess} \\ &\sqsubseteq \exists \text{generatesData.Data} \\ &\sqsubseteq \exists \text{UsesData.Data} \\ &\equiv \text{prov} : \text{Activity} \end{aligned}$$

Klasse *TaskCluster*

$$\begin{aligned} &\exists \text{hasInput.Data} \cap \exists \text{hasOutput.Data} \cap \exists \text{use.Tool} \\ &\cap \text{use.DataDrivenTask} \sqsupseteq \text{TaskCluster} \end{aligned}$$

Klasse *Team*

$$\begin{aligned} \text{Team} &\sqsupseteq \text{hasMember.Person} \\ &\sqsupseteq \text{workingOn.ProductDevelopmentProcess} \end{aligned}$$

Klasse *Person*

$$\begin{aligned} \text{Person} &\sqsupseteq \text{memberOf.Team} \\ &\sqsupseteq \text{workingOn.Task} \\ &\sqsubseteq= \text{isUserType.UserGroup} \\ &\equiv \text{foaf} : \text{Person} \end{aligned}$$

Klasse *Data*

$$\begin{aligned} \text{Data} &\sqsupseteq \text{generatedBy.Task} \vee \text{generatedBy.SubProcess} \\ &\sqsupseteq \text{generatedBy.Tool} \\ &\sqsupseteq \text{usedBy.Task} \vee \text{usedBy.SubProcess} \end{aligned}$$

Klasse *DataDrivenTechnique*

$$\begin{aligned} \text{DataDrivenTechnique} &\sqsupseteq \exists \text{DoesAnalysis.Analysis} \\ &\cap \exists \text{UsedBy.DataDrivenTask} \end{aligned}$$

Klasse *UseCase*
$$\begin{aligned} \textit{UseCase} \sqsupseteq & \textit{hasInput.Data} \cap \geq \textit{hasOutput.Data} \cap \geq \textit{use.Tool} \\ & \cap \geq \textit{use.DataDrivenMethod} \cap \geq \textit{use.DataDrivenTask} \\ & \cap \textit{partOf.TaskCluster} \end{aligned}$$

Literaturverzeichnis

- [1] Ongsulee, P. „Artificial Intelligence, Machine Learning and Deep Learning“. *2017 15th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*. Bangkok: IEEE, Nov. 2017, S. 1–6. DOI: 10.1109/ICTKE.2017.8259629.
- [2] Dumbach, P.; Schwinn, L.; Löhr, T.; Elsberger, T. und Eskofier, B. M. „Artificial Intelligence Trend Analysis in German Business and Politics: A Web Mining Approach“. *International Journal of Data Science and Analytics* (Dez. 2023). DOI: 10.1007/s41060-023-00483-9.
- [3] Die Bundesregierung. *Nationale KI Strategie*. 2018.
- [4] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. *Ki Als Markenzeichen Für Deutschland: Strategie Künstliche Intelligenz*. 2018. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/digitalisierung/ki-als-markenzeichen-fuer-deutschland-1549732> (besucht am 22. 01. 2024).
- [5] Bundesministerium für Bildung und Forschung. *Nationale Ki Strategie Für Künstliche Intelligenz - Ai Made in Germany*. 2022. <https://www.ki-strategie-deutschland.de/home.html> (besucht am 22. 01. 2024).
- [6] Johnson, J.; Hurst, A. und Safayeni, F. „Managing Data-Driven Design: A Survey of the Literature and Future Directions“. *Proceedings of the Design Society 3* (Juli 2023), S. 2525–2534. DOI: 10.1017/pds.2023.253.
- [7] Haefner, N.; Wincent, J.; Parida, V. und Gassmann, O. „Artificial Intelligence and Innovation Management: A Review, Framework, and Research Agenda“. *Technological Forecasting and Social Change* 162 (Jan. 2021), S. 120392. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120392.
- [8] Verganti, R.; Vendraminelli, L. und Iansiti, M. „Innovation and Design in the Age of Artificial Intelligence“. *Journal of Product Innovation Management* 37.3 (2020), S. 212–227. DOI: 10.1111/jpim.12523.
- [9] BMBF. *Bericht Der Bundesregierung Zur Hightech-Strategie 2025*. Techn. Ber. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2021.
- [10] Hensel, M. *KI-Investitionen – Führungskräfte Erwarten Wettbewerbsvorteile*. Aug. 2022. <https://www.bigdata-insider.de/ki-investitionen-fuehrungskraefte-erwarten-wettbewerbsvorteile-a-4625c72d49c682c09ea8c08383a5713c/> (besucht am 22. 01. 2024).
- [11] Kiel, D.; Arnold, C. und Voigt, K.-I. „The Influence of the Industrial Internet of Things on Business Models of Established Manufacturing Companies – A Business Level Perspective“. *Technovation* 68 (Dez. 2017), S. 4–19. DOI: 10.1016/j.technovation.2017.09.003.

- [12] Cantamessa, M.; Montagna, F.; Altavilla, S. und Casagrande-Seretti, A. „Data-Driven Design: The New Challenges of Digitalization on Product Design and Development“. *Design Science* 6 (2020), e27. DOI: 10.1017/dsj.2020.25.
- [13] Wartzack, S. „Predictive Engineering – Assistenzsystem Zur Multi-kriteriellen Analyse Alternativer Produktkonzepte“. Diss. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2001.
- [14] Evsan, I. „Die digitale Transformation in all ihren Facetten anpacken“. *Gestaltung und Management der digitalen Transformation*. Hrsg. von Fürst, R. A. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 135–153. DOI: 10.1007/978-3-658-24493-4_9.
- [15] Bosse, C. K.; Hellge, V.; Schröder, D. und Dupont, S. „Digitalisierung im Mittelstand erfolgreich gestalten“. *Arbeit 4.0 im Mittelstand*. Hrsg. von Bosse, C. K. und Zink, K. J. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 13–34. DOI: 10.1007/978-3-662-59474-2_2.
- [16] Czichos, R. und Neuburger, R. „Digitaler Wandel: Die größten Stolpersteine für KMU“. *Wissensmanagement* 3.3 (Mai 2021), S. 28–31. DOI: 10.1007/s43443-021-0244-5.
- [17] Abele, E.; Kuhn, S. M. und Liebeck, T. „Wissensmanagement Und KMU: Entwicklung Eines Wissensmanagement-Werkzeugkastens Für Kleine Und Mittelständische Unternehmen“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 98.7-8 (Aug. 2003), S. 375–379. DOI: 10.3139/104.100666.
- [18] Voigt, S.; Seidel, H.; Orth, R. und Kohl, H. „Herausforderung für Unternehmen“. *Wissensmanagement im Mittelstand*. Hrsg. von Kohl, H.; Mertins, K. und Seidel, H. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 9–18. DOI: 10.1007/978-3-662-49220-8_2.
- [19] Gierlich, M.; Schüritz, R. und Volkwein, M. „Die Rolle von KMUs in digitalen Ökosystemen – Wie sich KMUs in einer zunehmend digitalisierten Welt positionieren“. *Digitale Transformation in der Unternehmenspraxis*. Hrsg. von Dahm, M. H. und Thode, S. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 303–324. DOI: 10.1007/978-3-658-28557-9_15.
- [20] Rieke, T. und Klasen, A. S. „Einführung von Digitalen Technologien in KMU - Vorgehensmodell Und Technology Evaluation Canvas“. *PVM*. 2019.

- [21] Gimpel, H.; Hosseini, S.; Huber, R. X. R.; Probst, L.; Röglinger, M. und Faisst, U. „Structuring Digital Transformation: A Framework of Action Fields and Its Application at ZEISS“. *J. Inf. Technol. Theory Appl.* 19 (2018), S. 3.
- [22] Gersch, M.; Guldenberg, S.; Güttel, W. H.; Müller-Seitz, G.; Renzl, B. und Schulz, A.-C. „Gestaltungsherausforderungen Der Digitalen Transformation: Pfade Erkennen, Gestalten Oder Verlassen?“ *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 49.2-3 (2020), S. 44-49. DOI: 10.15358/0340-1650-2020-2-3-44.
- [23] Feldhusen, J. und Grote, K.-H., Hrsg. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0.
- [24] VDI/VDE 2206:2021-11 - *development of mechatronic and cyber-physical systems*. Techn. Ber. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Nov. 2021.
- [25] VDI Gesellschaft für Produkt- und Prozessgestaltung, Hrsg. *VDI 2221 Blatt 1 Design of Technical Products and Systems—Model of Product Design*. 2019.
- [26] Döbel, I.; Leis, M.; Vogelsang, M. M.; Neustroev, D.; Petzka, H.; Rüping, S.; Voss, A.; Wegerle, M. und Welz, J. *Maschinelles Lernen – Kompetenzen, Anwendungen Und Forschungsbedarf*. Techn. Ber. München: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 2018.
- [27] *Datengetriebenes Risikomanagement für Supply Chains. Ansätze, Technologien und Beispiele aus der Praxis*. 1. Auflage. München: Studylab, 2018.
- [28] Jänsch, J. *Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz: Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht*. Als Ms. gedr. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente 396. Düsseldorf: VDI-Verl, 2007.
- [29] Nicklas, S. J.; Walisch, A. und Paetzold, K. „Herausforderung Methodeneinsatz – Erklärungsansätze Aus Der Akzeptanzforschung“. *DS III: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X*. The Design Society, 2021. DOI: 10.35199/dfx2021.05.
- [30] Wallisch, A.; Nicklas, S. J. und Paetzold, K. „Method accepted - fields of action for increasing methods application in product development“. *Proceedings of the Design Society* 1 (Aug. 2021), S. 2037–2046. DOI: 10.1017/pds.2021.465.

- [31] Gönzheimer, P.; Netzer, M.; Mohr, L.; von Hörsten, G. und Fleischer, J. „Erhöhung Der Skalierbarkeit von KI-Anwendungen in Produktionsanlagen“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020), S. 517–519. DOI: 10.3139/104.112318.
- [32] Lauer, W. „Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen“. Diss. Technische Universität München, 2010, S. 244.
- [33] Usländer, T. „KI-Engineering Für Die Produktion Im Kontext von Datenräumen“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 118.5 (Mai 2023), S. 352–355. DOI: 10.1515/zwf-2023-1071.
- [34] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. und Grote, K.-H., Hrsg. *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [35] Vajna, S.; Weber, C.; Zeman, K.; Hehenberger, P.; Gerhard, D. und Wartzack, S. *CAX für Ingenieure: eine praxisbezogene Einführung*. 3., vollständig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Germany: Springer Vieweg, 2018.
- [36] Schumann, M.; Schenk, M.; Schmucker, U. und Saake, G. „Digital Engineering - Herausforderungen, Ziele Und Lösungsbeispiele“. 14. *IFF Wissenschaftstage 2011*. Magdeburg, Germany: Fraunhofer-Verlag, 28.06.-30.06.2011.
- [37] Künzel, M.; Schulz, J. und Gabriel, P. *Engineering 4.0 Grundzüge Eines Zukunftsmodells*. Techn. Ber. 2016.
- [38] Jacob, M. „Management und Informationstechnik“. *Wirtschaftsinformatik & Management* 4.1 (Feb. 2012), S. 62–67. DOI: 10.1365/s35764-012-0111-4.
- [39] North, K. *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2011.
- [40] Cambridge University Press. *ARTIFICIAL INTELLIGENCE | meaning in the cambridge english dictionary*. Mai 2020. <https://dictionary.cambridge.org/de/worterbuch/englisch/artificial-intelligence>.
- [41] Monostori, L. „Artificial Intelligence“. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Hrsg. von The International Academy for Production Engineering; Laperrière, L. und Reinhart, G. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 47–50. DOI: 10.1007/978-3-642-20617-7_16703.

- [42] Montáns, F. J.; Chinesta, F.; Gomez-Bombarelli, R. und Kutz, J. N. „Data-Driven Modeling and Learning in Science and Engineering“. *Comptes Rendus Mécanique* 347.11 (Nov. 2019), S. 845–855. DOI: 10.1016/j.crme.2019.11.009.
- [43] ISO. *ISO 9000:2015*. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/04/54/45481.html> (besucht am 08.06.2022).
- [44] Best, E. und Weth, M. *Geschäftsprozesse optimieren: Der Praxisleitfaden für erfolgreiche Reorganisation*. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.
- [45] Lunnemann, P.; Stark, R.; Wang, W. M.; Stark, R. und Manteca, P. I. „Engineering Activities — Considering Value Creation from a Holistic Perspective“. *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. Madeira, Portugal: IEEE, 2017-06-27/2017-06-29, S. 315–323. DOI: 10.1109/ICE.2017.8279904.
- [46] Whitfield, T. „Tools“. *Design Dictionary: Perspectives on Design Terminology*. Hrsg. von Erlhoff, M. und Marshall, T. Basel: Birkhäuser Basel, 2008, S. 404–404. DOI: 10.1007/978-3-7643-8140-0_279.
- [47] Stark, R.; Brandenburg, E. und Lindow, K. „Characterization and Application of Assistance Systems in Digital Engineering“. *CIRP Annals* 70.1 (2021), S. 131–134. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.04.061.
- [48] Duigou, J. L.; Bernard, A.; Perry, N. und Delplace, J. C. „Generic PLM System for SMEs: Application to an Equipment Manufacturer“. *International Journal of Product Lifecycle Management* 6.1 (2012), S. 51. DOI: 10.1504/ijplm.2012.046429.
- [49] Bickel, S.; Spruegel, T. C.; Schleich, B. und Wartzack, S. „How Do Digital Engineering and Included AI Based Assistance Tools Change the Product Development Process and the Involved Engineers“. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design* 1.1 (Juli 2019), S. 2567–2576. DOI: 10.1017/dsi.2019.263.
- [50] Weyer, T.; Daun, M. und Tenbergen, B. „The Changing World and the Adapting Machine: How Digital Transformation Changes Requirements Engineering in the Embedded and Cyberphysical Systems Industry“. *IEEE Software* 38.5 (Sep. 2021), S. 83–91. DOI: 10.1109/MS.2020.3036287.
- [51] Margarov, G. und Konovalova, V. „Interdisciplinary Competencies Needed for Engineers in the Digital Economy“. *2019 Computer Science and Information Technologies (CSIT)*. Yerevan, Armenia: IEEE, Sep. 2019, S. 144–147. DOI: 10.1109/CSITechnol.2019.8895029.

- [52] Makarova, I.; Boyko, A.; Giniyatullin, I.; Pashkevich, A. und Mukhametdinov, E. „Changes in Engineering Education in the Transition to a Digital Society“. *2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. High Tatras, Slovakia: IEEE, Okt. 2020, S. 1–6. DOI: 10.1109/ICCC49264.2020.9257231.
- [53] Ebert, C. und Duarte, C. H. C. „Requirements Engineering for the Digital Transformation: Industry Panel“. *2016 IEEE 24th International Requirements Engineering Conference (RE)*. Beijing, China: IEEE, Sep. 2016, S. 4–5. DOI: 10.1109/RE.2016.21.
- [54] Richert, A.; Shehadeh, M.; Willicks, F. und Jeschke, S. „Digital Transformation of Engineering Education - Empirical Insights from Virtual Worlds and Human-Robot-Collaboration“. *International Journal of Engineering Pedagogy (ijEP)* 6.4 (Nov. 2016), S. 23. DOI: 10.3991/ijep.v6i4.6023.
- [55] Tomiyama, T.; Lutters, E.; Stark, R. und Abramovici, M. „Development Capabilities for Smart Products“. *CIRP Annals* 68.2 (Jan. 2019), S. 727–750. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.010.
- [56] Rieg, F.; Nützel, F. und Wehmann, C. „Numerische Simulationsverfahren“. *Handbuch Produktentwicklung*. Hrsg. von Lindemann, U. München: Hanser, 2016, S. 905–938.
- [57] Miorandi, D.; Sicari, S.; De Pellegrini, F. und Chlamtac, I. „Internet of Things: Vision, Applications and Research Challenges“. *Ad Hoc Networks* 10.7 (Sep. 2012), S. 1497–1516. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.02.016.
- [58] Marion, T. J. und Fixson, S. K. „The Transformation of the Innovation Process: How Digital Tools Are Changing Work, Collaboration, and Organizations in New Product Development*“. *Journal of Product Innovation Management* 38.1 (Jan. 2021), S. 192–215. DOI: 10.1111/jpim.12547.
- [59] Fechter, M. C. „Modeling of preliminary embodiment designs in virtual reality with natural finger interactionModellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion“. Diss. FAU University Press, 2021, 8667 KB, x, 188 Seiten pages. DOI: 10.25593/978-3-96147-405-9.
- [60] Harlan, J.; Goetz, S. und Wartzack, S. „USE CASES FOR A HYBRID AUGMENTED REALITY COMPUTER WORKSTATION IN CAD WORKFLOWS“. *Proceedings of the Design Society* 3 (Juli 2023), S. 3731–3740. DOI: 10.1017/pds.2023.374.

- [61] Boyle, J.-M. „Interactive Engineering Systems Design: A Study for Artificial Intelligence Applications“. *Artificial Intelligence in Engineering* 4.2 (Apr. 1989), S. 58–69. DOI: 10.1016/0954-1810(89)90001-0.
- [62] Brown, D. C. und Chandrasekaran, B. *Design Problem Solving: Knowledge Structures and Control Strategies*. Research Notes in Artificial Intelligence. London San Mateo, Calif: Pitman M. Kaufmann Publishers, 1989.
- [63] Gonnet, S.; Henning, G. und Leone, H. „A Model for Capturing and Representing the Engineering Design Process“. *Expert Systems with Applications* 33.4 (Nov. 2007), S. 881–902. DOI: 10.1016/j.eswa.2006.07.004.
- [64] Mittal, S. und Araya, A. A. „A Knowledge-Based Framework for Design“. *AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 1986.
- [65] International Organization for Standardization, Hrsg. *ISO 9001:2015 Quality Management Systems*. 2015.
- [66] Hales, C. und Gooch, S. *Managing Engineering Design*. London: Springer London, 2004. DOI: 10.1007/978-0-85729-394-7.
- [67] Bender, K., Hrsg. *Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. DOI: 10.1007/b138984.
- [68] Malmqvist, J. und Svensson, D. „A Design Theory Based Approach towards Including Qfd Data in Product Models“. 1999. DOI: 10.1115/DETC99/DTM-8769.
- [69] Nattermann, R. und Anderl, R. „The W-model – Using Systems Engineering for Adaptronics“. *Procedia Computer Science* 16 (2013), S. 937–946. DOI: 10.1016/j.procs.2013.01.098.
- [70] Ponn, J. und Lindemann, U. *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-20580-4.
- [71] Kesselring, F. *Technische Kompositionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1954. DOI: 10.1007/978-3-642-92624-2.
- [72] Lindemann, U. *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-01423-9.
- [73] Tzortzopoulos, P. und Kagioglou, M. „Application of Lean Construction Principles in Product Development Process Modelling“. 2003.

- [74] Lindner, D. und Leyh, C. „Digitalisierung von KMU – Fragestellungen, Handlungsempfehlungen sowie Implikationen für IT-Organisation und IT-Servicemanagement“. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 56.2 (Apr. 2019), S. 402–418. DOI: 10.1365/s40702-019-00502-z.
- [75] Sieger, D. B.; Badiru, A. B. und Milatovic, M. „A Metric for Agility Measurement in Product Development“. *IIE Transactions* 32.7 (Juli 2000), S. 637–645. DOI: 10.1080/07408170008967422.
- [76] Haan, K. und Main, K. *Remote Work Statistics And Trends In 2024*. 2023. <https://datawrapper.dwcdn.net/8PBDo/1/> (besucht am 02. 01. 2024).
- [77] Roelofsen, J. und Lindemann, U. „An Approach Towards Planning Development Processes According to the Design Situation“. *Modeling and Management of Engineering Processes*. Hrsg. von Heisig, P.; Clarkson, P. J. und Vajna, S. Springer London, 2010, S. 41–52. DOI: 10.1007/978-1-84996-199-8_4.
- [78] Kreimeyer, M. „A Structural Measurement System for Engineering Design Processes“. Diss. München: Technische Universität München, 2009.
- [79] Smithers, T. „Towards a Knowledge Level Theory of Design Process“. *Artificial Intelligence in Design '98*. Hrsg. von Gero, J. S. und Sudweeks, F. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998, S. 3–21. DOI: 10.1007/978-94-011-5121-4_1.
- [80] Dorst, K. und Cross, N. „Creativity in the Design Process: Co-Evolution of Problem–Solution“. *Design Studies* 22.5 (Sep. 2001), S. 425–437. DOI: 10.1016/S0142-694X(01)00009-6.
- [81] Hillier, B.; Musgrove, J. und O’Sullivan, P. „Knowledge and Design“. *Environmental design: research and practice* 2 (1972), S. 3–1.
- [82] Gero, J. S. „Computational Models of Innovative and Creative Design Processes“. *Technological Forecasting and Social Change* 64.2-3 (Juni 2000), S. 183–196. DOI: 10.1016/S0040-1625(99)00105-5.
- [83] Guindon, R. „Designing the Design Process: Exploiting Opportunistic Thoughts“. *Human–Computer Interaction* 5.2-3 (Juni 1990), S. 305–344. DOI: 10.1080/07370024.1990.9667157.
- [84] Gero, J. S. und Kannengiesser, U. „The Situated Function–Behaviour–Structure Framework“. *Design Studies* 25.4 (Juli 2004), S. 373–391. DOI: 10.1016/j.destud.2003.10.010.
- [85] Wynn, D. C. und Eckert, C. M. „Perspectives on Iteration in Design and Development“. *Research in Engineering Design* 28.2 (Apr. 2017), S. 153–184. DOI: 10.1007/s00163-016-0226-3.

- [86] Eppler, M. J.; Seifried, P. M. und Röpneck, A. „Improving Knowledge Intensive Processes through an Enterprise Knowledge Medium“. *Special Interest Group on Computer Personnel Research Annual Conference*. 1999. DOI: 10.1145/299513.299686.
- [87] Reddy, E. J.; Sridhar, C. N. V. und Rangadu, V. P. „Knowledge Based Engineering: Notion, Approaches and Future Trends“. *American Journal of Intelligent Systems* 5 (2015), S. 1–17.
- [88] Verhagen, W. J.; Bermell-Garcia, P.; van Dijk, R. E. und Curran, R. „A Critical Review of Knowledge-Based Engineering: An Identification of Research Challenges“. *Advanced Engineering Informatics* 26.1 (Jan. 2012), S. 5–15. DOI: 10.1016/j.aei.2011.06.004.
- [89] Stjepandić, J.; Verhagen, W. J. C.; Liese, H. und Bermell-Garcia, P. „Knowledge-Based Engineering“. *Concurrent Engineering in the 21st Century*. Hrsg. von Stjepandić, J.; Wognum, N. und J.C. Verhagen, W. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 255–286. DOI: 10.1007/978-3-319-13776-6_10.
- [90] VDI Gesellschaft für Produkt- und Prozessgestaltung. *VDI 5610 Blatt 2 - Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Wissensbasierte Konstruktion (KBE)*. Mai 2017.
- [91] Kügler, P.; Dworschak, F.; Schleich, B. und Wartzack, S. „The Evolution of Knowledge-Based Engineering from a Design Research Perspective: Literature Review 2012–2021“. *Advanced Engineering Informatics* 55 (Jan. 2023), S. 101892. DOI: 10.1016/j.aei.2023.101892.
- [92] Chandrasegaran, S. K.; Ramani, K.; Sriram, R. D.; Horváth, I.; Bernard, A.; Harik, R. F. und Gao, W. „The Evolution, Challenges, and Future of Knowledge Representation in Product Design Systems“. *Computer-Aided Design* 45.2 (Feb. 2013), S. 204–228. DOI: 10.1016/j.cad.2012.08.006.
- [93] Gruber, T. R. „A Translation Approach to Portable Ontology Specifications“. *Knowledge Acquisition* 5.2 (Juni 1993), S. 199–220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
- [94] Kügler, P.; Marian, M.; Schleich, B.; Tremmel, S. und Wartzack, S. „tribAI—towards an Explicit Specification of Shared Tribological Understanding“. *Applied Sciences* 10.13 (Juni 2020), S. 4421. DOI: 10.3390/app10134421.
- [95] Gene Ontology Consortium. „The Gene Ontology (GO) Database and Informatics Resource“. *Nucleic Acids Research* 32.90001 (Jan. 2004), S. 258D–261. DOI: 10.1093/nar/gkho36.

- [96] Chen, X.; Chen, C.-H.; Leong, K. F. und Jiang, X. „An Ontology Learning System for Customer Needs Representation in Product Development“. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67.1-4 (Juli 2013), S. 441-453. DOI: 10.1007/s00170-012-4496-2.
- [97] Kim, K.-Y.; Manley, D. G. und Yang, H. „Ontology-Based Assembly Design and Information Sharing for Collaborative Product Development“. *Computer-Aided Design* 38.12 (Dez. 2006), S. 1233-1250. DOI: 10.1016/j.cad.2006.08.004.
- [98] Kestel, P.; Kügler, P.; Zirngibl, C.; Schleich, B. und Wartzack, S. „Ontology-Based Approach for the Provision of Simulation Knowledge Acquired by Data and Text Mining Processes“. *Advanced Engineering Informatics* 39 (Jan. 2019), S. 292-305. DOI: 10.1016/j.aei.2019.02.001.
- [99] Kügler, P.; Kestel, P.; Schon, C.; Marian, M.; Schleich, B.; Staab, S. und Wartzack, S. „ONTOLOGY-BASED APPROACH FOR THE USE OF INTENTIONAL FORGETTING IN PRODUCT DEVELOPMENT“. *15th International Design Conference*. Dubrovnik, Croatia, May, 21-24, 2018, S. 1595-1606. DOI: 10.21278/idc.2018.0402.
- [100] Yang, Q.; Miao, C.; Zhang, Y. und Gay, R. „Ontology Modelling and Engineering for Product Development Process Description and Integration“. *2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics*. Singapore: IEEE, Aug. 2006, S. 85-90. DOI: 10.1109/INDIN.2006.275722.
- [101] Lebo, T.; Sahoo, S. und McGuinness, D. *PROV-O: The PROV Ontology*. 2013. <https://www.w3.org/TR/prov-o/> (besucht am 25. 01. 2023).
- [102] Brickley, D. und Miller, L. *FOAF Vocabulary Specification*. 2004. <http://xmlns.com/foaf/o.1/> (besucht am 27. 10. 2022).
- [103] Trauer, J.; Schweigert-Recksiek, S.; Onuma Okamoto, L.; Spreitzer, K.; Mörtl, M. und Zimmermann, M. „Data-Driven Engineering – Definitions and Insights from an Industrial Case Study for a New Approach in Technical Product Development“. *DS 101: Proceedings of NordDesign 2020, Lyngby, Denmark, 12th - 14th August 2020*. 2020, S. 1-12. DOI: 10.35199/norddesign2020.46.
- [104] Prysłak, J. *The Key Differences Between Data-Driven And Data-Led*. 2019. <https://www.forbes.com/sites/jakepryslak/2019/03/08/the-key-differences-between-data-driven-and-data-led/> (besucht am 14. 07. 2023).
- [105] Aishah, N. *Data-Informed, Data-Driven, Data-Inspired: What's the Difference?* März 2021. (Besucht am 14. 07. 2023).

- [106] Stewart, S. *Are You Data-driven, Data-informed or Data-inspired?* 2019. (Besucht am 14. 07. 2023).
- [107] Werder, K.; Seidel, S.; Recker, J.; Berente, N.; Gibbs, J.; Abboud, N. und Benzeghadi, Y. „Data-Driven, Data-Informed, Data-Augmented: How Ubisoft’s Ghost Recon Wildlands Live Unit Uses Data for Continuous Product Innovation“. *California Management Review* 62.3 (Mai 2020), S. 86–102. DOI: 10.1177/0008125620915290.
- [108] Bogers, S.; Frens, J.; van Kollenburg, J.; Deckers, E. und Hummels, C. „Connected Baby Bottle: A Design Case Study Towards a Framework for Data-Enabled Design“. *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*. DIS ’16. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Juni 2016, S. 301–311. DOI: 10.1145/2901790.2901855.
- [109] Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G. und Smyth, P. „From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases“. *AI Magazine* 17.3 (März 1996), S. 37–37. DOI: 10.1609/aimag.v17i3.1230.
- [110] Samuel, A. L. „Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers“. *IBM Journal of Research and Development* 44.1.2 (Jan. 2000), S. 206–226. DOI: 10.1147/rd.441.0206.
- [111] StackExchange. *Distinction between AI, ML, Neural Networks, Deep Learning and Data Mining*. Forum Post. März 2018. <https://softwareengineering.stackexchange.com/q/366996> (besucht am 28. 10. 2022).
- [112] Alpaydin, E. *Introduction to Machine Learning*. 2. Aufl. Adaptive Computation and Machine Learning. Cambridge, Mass: MIT Press, 2010.
- [113] Kohavi, R. und Provost, F. „Glossary of Terms“. *Machine Learning* 30.2/3 (1998), S. 271–274. DOI: 10.1023/A:1017181826899.
- [114] *Artificial Intelligence a Modern Approach*. Fourth edition, global edition. Boston: Pearson, 2022.
- [115] Tan, P.-N.; Steinbach, M. und Kumar, V. *Introduction to Data Mining*. Nueva Delhi (India): Pearson, 2006.
- [116] Witten, I. H.; Frank, E.; Hall, M. A. und Pal, C. J. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Fourth Edition. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [117] Petersohn, H. *Data Mining: Verfahren, Prozesse, Anwendungsarchitektur*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2005. DOI: 10.1524/9783486593334.

- [118] Koza, J. R.; Bennett, F. H.; Andre, D. und Keane, M. A. „Automated Design of Both the Topology and Sizing of Analog Electrical Circuits Using Genetic Programming“. *Artificial Intelligence in Design '96*. Hrsg. von Gero, J. S. und Sudweeks, F. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996, S. 151–170. DOI: 10.1007/978-94-009-0279-4_9.
- [119] Bishop, C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York, NY, USA: Spring, 2006.
- [120] Fernandes De Mello, R. und Antonelli Ponti, M. *Machine Learning: A Practical Approach on the Statistical Learning Theory*. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-94989-5.
- [121] Jordan, M. I. und Mitchell, T. M. „Machine Learning: Trends, Perspectives, and Prospects“. *Science* 349.6245 (Juli 2015), S. 255–260. DOI: 10.1126/science.aaa8415.
- [122] Kulin, M.; Kazaz, T.; De Poorter, E. und Moerman, I. „A Survey on Machine Learning-Based Performance Improvement of Wireless Networks: PHY, MAC and Network Layer“. *Electronics* 10.3 (Jan. 2021), S. 318. DOI: 10.3390/electronics10030318.
- [123] Aggarwal, C. C. *Data Mining: The Textbook*. Cham: Springer International Publishing, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-14142-8.
- [124] Goodfellow, I.; Bengio, Y. und Courville, A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016.
- [125] Han, J. und Kamber, M. *Data Mining: Concepts and Techniques*. 2nd ed. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Amsterdam ; Boston : San Francisco, CA: Elsevier ; Morgan Kaufmann, 2006.
- [126] Linoff, G. S. und Berry, M. J. A. *Data Mining Techniques: For Marketing, Sales, and Customer Relationship Management*. 3rd ed. Indianapolis, IN: Wiley Pub, 2011.
- [127] Runkler, T. A. *Data Mining: Modelle und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. DOI: 10.1007/978-3-8348-2171-3.
- [128] Babyak, M. A. „What You See May Not Be What You Get: A Brief, Nontechnical Introduction to Overfitting in Regression-Type Models“. *Psychosomatic Medicine* 66.3 (Mai 2004), S. 411–421. DOI: 10.1097/01.psy.0000127692.23278.a9.
- [129] Ying, X. „An Overview of Overfitting and Its Solutions“. *Journal of Physics: Conference Series* 1168 (Feb. 2019), S. 022022. DOI: 10.1088/1742-6596/1168/2/022022.

- [130] Brzoska, M. „Modellierung Zwischen „overfitting“ Und „underfitting““. *Rationale Entscheidungen Unter Unsicherheit*. Hrsg. von Fleischer, B.; Lauterbach, R. und Pawlik, K. De Gruyter, Dez. 2018, S. 152–156. DOI: 10.1515/9783110600261-016.
- [131] Mohri, M.; Rostamizadeh, A. und Talwalkar, A. *Foundations of Machine Learning*. Adaptive Computation and Machine Learning. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2012.
- [132] Bonaccorso, G. *Mastering Machine Learning Algorithms: Expert Techniques to Implement Popular Machine Learning Algorithms and Fine-Tune Your Models*. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2018.
- [133] Silver, D.; Singh, S.; Precup, D. und Sutton, R. S. „Reward Is Enough“. *Artificial Intelligence* 299 (Okt. 2021), S. 103535. DOI: 10.1016/j.artint.2021.103535.
- [134] Sutton, R. S. und Barto, A. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Nachdruck. Adaptive Computation and Machine Learning. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2014.
- [135] Wiering, M. und Otterlo, M. van, Hrsg. *Reinforcement Learning: State-of-the-Art*. Adaptation, Learning, and Optimization v.12. Heidelberg ; New York: Springer, 2012.
- [136] Brandt, S. *Datenanalyse: Mit Statistischen Methoden Und Computerprogrammen*. Spektrum Lehrbuch. Heidelberg Berlin: Spektrum Akad. Verl, 1999.
- [137] Fahrmeir, L.; Kneib, T. und Lang, S. *Regression*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-01837-4.
- [138] Myers, R. H.; Montgomery, D. C. und Anderson-Cook, C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Fourth edition. Wiley Series in Probability and Statistics. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.
- [139] Box, G. E. P. und Wilson, K. B. „On the Experimental Attainment of Optimum Conditions“. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 13.1 (Jan. 1951), S. 1–38. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x.
- [140] Simpson, T.; Poplinski, J.; Koch, P. N. und Allen, J. „Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and Recommendations“. *Engineering with Computers* 17.2 (Juli 2001), S. 129–150. DOI: 10.1007/PL00007198.
- [141] Hand, D. J. *Discrimination and Classification*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. Chichester [Eng.] ; New York: Wiley, 1981.

- [142] Weiss, S. und Kulikowski, C. *Computer Systems That Learn: Classification and Prediction Methods from Statistics, Neural Nets, Machine Learning, and Expert Systems*. Machine Learning Series. M. Kaufmann Publishers, 1991.
- [143] Jain, A. K.; Murty, M. N. und Flynn, P. J. „Data Clustering: A Review“. *ACM Computing Surveys* 31.3 (Sep. 1999), S. 264–323. DOI: 10.1145/331499.331504.
- [144] Tibshirani, R.; Walther, G. und Hastie, T. „Estimating the Number of Clusters in a Data Set Via the Gap Statistic“. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology* 63.2 (Juli 2001), S. 411–423. DOI: 10.1111/1467-9868.00293.
- [145] Agrawal, R.; Imieliński, T. und Swami, A. „Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases“. *ACM SIGMOD Record* 22.2 (Juni 1993), S. 207–216. DOI: 10.1145/170036.170072.
- [146] Ali, K.; Manganaris, S. und Srikant, R. „Partial Classification Using Association Rules“. *Knowledge Discovery and Data Mining*. 1997.
- [147] Beierle, C. und Kern-Isberner, G. *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. DOI: 10.1007/978-3-8348-2300-7.
- [148] Chandola, V.; Banerjee, A. und Kumar, V. „Anomaly Detection: A Survey“. *ACM Computing Surveys* 41.3 (Juli 2009), S. 1–58. DOI: 10.1145/1541880.1541882.
- [149] Cleveland, W. S. und McGill, R. „Graphical Perception: The Visual Decoding of Quantitative Information on Graphical Displays of Data“. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)* 150.3 (1987), S. 192. DOI: 10.2307/2981473. JSTOR: 2981473.
- [150] Chen, C.-h.; Härdle, W. und Unwin, A. *Handbook of Data Visualization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-33037-0.
- [151] Nabil, M.; Aly, M. und Atiya, A. „ASTD: Arabic Sentiment Tweets Dataset“. *Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Lisbon, Portugal: Association for Computational Linguistics, 2015, S. 2515–2519. DOI: 10.18653/v1/D15-1299.
- [152] Razavi, S.; Tolson, B. A. und Burn, D. H. „Review of Surrogate Modeling in Water Resources“. *Water Resources Research* 48.7 (Juli 2012), 2011WR011527. DOI: 10.1029/2011WR011527.
- [153] Fawcett, T. „An Introduction to ROC Analysis“. *Pattern Recognition Letters* 27.8 (Juni 2006), S. 861–874. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.

- [154] Kohn, W. „Statistik, Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung“. *Statistik und ihre Anwendungen*. Hrsg. von Dette, H. und Härdle, W. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. DOI: 10.1007/b138042.
- [155] Powers, D. M. W. „Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation“. *Journal of Machine Learning Technologies* 2.1 (2011), S. 37–62.
- [156] Sammut, C. und Webb, G. I., Hrsg. *Encyclopedia of Machine Learning*. Boston, MA: Springer US, 2010. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
- [157] Montgomery, D. C. und Runger, G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Sixth edition. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc, 2014.
- [158] Kvålseth, T. O. „Cautionary Note about R^2 “. *The American Statistician* 39.4 (Nov. 1985), S. 279–285. DOI: 10.1080/00031305.1985.10479448.
- [159] Spiess, A.-N. und Neumeyer, N. „An Evaluation of R_2 as an Inadequate Measure for Nonlinear Models in Pharmacological and Biochemical Research: A Monte Carlo Approach“. *BMC Pharmacology* 10.1 (Dez. 2010), S. 6. DOI: 10.1186/1471-2210-10-6.
- [160] Will, J. und Most, T. „Metamodell of Optimized Prognosis (MoP) -an Automatic Approach for User Friendly Parameter Optimization“ (2009). DOI: 10.13140/2.1.4946.9122.
- [161] Ait-Amir, B.; Pougnet, P. und El Hami, A. „Meta-Model Development“. *Embedded Mechatronic Systems 2 (Second Edition)*. Hrsg. von El Hami, A. und Pougnet, P. Second Edition. ISTE, 2020, S. 157–187. DOI: 10.1016/B978-1-78548-190-1.50006-2.
- [162] Erlhoff, M.; Marshall, T.; Bruce, L. M. J. und Lindberg, S. *Design Dictionary: Perspectives on Design Terminology*. Berlin, Boston: Birkhäuser, 2007.
- [163] Mikut, R. und Reischl, M. „Data Mining Tools“. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 1.5 (Sep. 2011), S. 431–443. DOI: 10.1002/widm.24.
- [164] Awan, A. A. *Top Data Science Tools for 2022*. 2022. <https://www.kdnuggets.com/top-data-science-tools-for-2022> (besucht am 02. 01. 2024).
- [165] Mehreen, K. *A Comparative Overview of the Top 10 Open Source Data Science Tools in 2023*. 2023. <https://www.kdnuggets.com/a-comparative-overview-of-the-top-10-open-source-data-science-tools-in-2023> (besucht am 02. 01. 2024).

- [166] Krensky, P.; Idoine, C.; Brethenoux, E.; den Hamer, P.; Choudhary, F.; Jaffri, A. und Vashisth, S. *Magic Quadrant for Data Science and Machine Learning Platforms*. 2022. <https://www.gartner.com/doc/reprints?id=1-25D1N8PX&ct=210302&st=sb> (besucht am 30. 05. 2022).
- [167] Bigus, J. P. *Data Mining with Neural Networks: Solving Business Problems—from Application Development to Decision Support*. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [168] Chapman, P.; Clinton, J.; Kerber, R.; Khabaza, T.; Reinartz, T.; Shearer, C. und Wirth, R. *CRISP-DM 1.0 Step-by-Step Data Mining Guide*. Chicago, IL, USA, The CRISP-DM Consortium, 2000.
- [169] Azevedo, A. und Santos, M. F. „KDD, SEMMA and CRISP-DM: A Parallel Overview“. *IADIS European Conference on Data Mining 2008, Amsterdam, the Netherlands, July 24-26, 2008. Proceedings*. Hrsg. von Abraham, A. IADIS, 2008, S. 182–185.
- [170] Breitsprecher, T.; Kestel, P.; Küster, C.; Sprügel, T. und Wartzack, S. „Einsatz von Data-Mining in modernen Produktentstehungsprozessen: Ganzheitliche Forschung für Ingenieure von morgen“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110.11 (Nov. 2015), S. 744–750. DOI: 10.3139/104.111423.
- [171] Burggräf, P.; Wagner, J. und Weißer, T. „Knowledge-Based Problem Solving in Physical Product Development—A Methodological Review“. *Expert Systems with Applications: X* 5 (Apr. 2020), S. 100025. DOI: 10.1016/j.eswax.2020.100025.
- [172] Kreis, A.; Hirz, M. und Rossbacher, P. „CAD-Automation in Automotive Development – Potentials, Limits and Challenges“. *Computer-Aided Design and Applications* 18.4 (Nov. 2020), S. 849–863. DOI: 10.14733/cadaps.2021.849-863.
- [173] Menezes, B. C.; Kelly, J. D. und Leal, A. G. „Identification and Design of Industry 4.0 Opportunities in Manufacturing: Examples from Mature Industries to Laboratory Level Systems“. *IFAC-PapersOnLine* 52.13 (2019), S. 2494–2500. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.581.
- [174] Rigger, E.; Shea, K. und Stankovic, T. „Task Categorisation for Identification of Design Automation Opportunities“. *Journal of Engineering Design* 29.3 (März 2018), S. 131–159. DOI: 10.1080/09544828.2018.1448927.
- [175] Shabestari, S. S.; Herzog, M. und Bender, B. „A Survey on the Applications of Machine Learning in the Early Phases of Product Development“. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design* 1.1 (Juli 2019), S. 2437–2446. DOI: 10.1017/dsi.2019.250.

- [176] Agard, B. und Kusiak, A. „Data-Mining-Based Methodology for the Design of Product Families“. *International Journal of Production Research* 42.15 (2004), S. 2955–2969. DOI: 10.1080/00207540410001691929.
- [177] Arbabi, H.; Vahedi-Nouri, B.; Iranmanesh, S. und Tavakkoli-Moghaddam, R. „A Data-Driven Multi-Criteria Decision-Making Approach for Assessing New Product Conceptual Designs“. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 236.14 (2021), S. 1900–1911. DOI: 10.1177/0954405421991418.
- [178] Bertoni, A.; Hallstedt, S. I.; Dasari, S. K. und Andersson, P. „Integration of Value and Sustainability Assessment in Design Space Exploration by Machine Learning: An Aerospace Application“. *Design Science* 6 (2020), e2. DOI: 10.1017/dsj.2019.29.
- [179] Chan, C. C.-s.; Yu, K.-m. und Yung, K.-l. „Green Product Development by Using Life Cycle Assessment (LCA), Theory of Inventive of Problems Solving (TRIZ)“. *2010 International Conference on Manufacturing Automation*. Dez. 2010, S. 24–29. DOI: 10.1109/icma.2010.3.
- [180] Cheung, W. M.; Marsh, R.; Newnes, L. B.; Mileham, A. R. und Lanham, J. D. „Cost Data Modelling and Searching to Support Low-Volume, High-Complexity, Long-Life Defence System Development“. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 229.5 (Mai 2015), S. 835–846. DOI: 10.1177/0954405414534226.
- [181] Diestmann, T.; Broedling, N.; Götz, B. und Melz, T. „Surrogate Model-Based Uncertainty Quantification for a Helical Gear Pair“. *Uncertainty in Mechanical Engineering*. Hrsg. von Pelz, P. F. und Groche, P. Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 191–207. DOI: 10.1007/978-3-030-77256-7_16.
- [182] Dworschak, F.; Kügler, P.; Schleich, B. und Wartzack, S. „Integrating the Mechanical Domain into Seed Approach“. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*. Bd. 2019-August. Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED. 2019, S. 2587–2596. DOI: 10.1017/dsi.2019.265.
- [183] Gussen, L. C.; Ellerich, M. und Schmitt, R. H. „Prediction of Perceived Quality through the Development of a Robot-Supported Multisensory Measuring System“. *Procedia CIRP*. Bd. 84. Procedia CIRP. 2019, S. 368–373. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.206.

- [184] Hoefler, M. J. und Frank, M. C. „Automated Manufacturing Process Selection During Conceptual Design“. *Journal of Mechanical Design* 140.3 (März 2018), S. 031701. DOI: 10.1115/1.4038686.
- [185] Kashkoush, M. und ElMaraghy, H. „An Integer Programming Model for Discovering Associations between Manufacturing System Capabilities and Product Features“. *Journal of Intelligent Manufacturing* 28.4 (Apr. 2017), S. 1031–1044. DOI: 10.1007/s10845-015-1044-6.
- [186] Kretschmer, R.; Rulhoff, S. und Stjepandić, J. „Design for Assembly in Series Production by Using Data Mining Methods“. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. Advances in Transdisciplinary Engineering (2014), S. 379–388. DOI: 10.3233/978-1-61499-440-4-379.
- [187] Lindemann, M.; Nuy, L.; Briele, K. und Schmitt, R. „Methodical Data-Driven Integration of Perceived Quality into the Product Development Process“. *Procedia CIRP*. Bd. 84. Procedia CIRP. Póvoa de Varzim, Portugal, 2019-05-08/2019-05-10, S. 406–411. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.205.
- [188] Lin, K.-Z. und Chiu, M.-C. „Utilizing Text Mining and Kansei Engineering to Support Data-Driven Design Automation“. Bd. 5. Advances in Transdisciplinary Engineering. 2017, S. 949–958. DOI: 10.3233/978-1-61499-779-5-949.
- [189] Lützenberger, J.; Klein, P.; Hribernik, K. und Thoben, K.-D. „Improving Product-Service Systems by Exploiting Information From The Usage Phase. A Case Study“. *Procedia CIRP*. Bd. 47. Procedia CIRP. 2016, S. 376–381. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.064.
- [190] Prajapati, S. P.; Bhaumik, R.; Kumar, T. und Sait, U. „An AI-Based Pedagogical Tool for Creating Sketched Representation of Emotive Product Forms in the Conceptual Design Stages“. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Hrsg. von Tuba, M.; Akashe, S. und Joshi, A. Bd. 1270. Singapore: Springer Singapore, 2021, S. 649–659. DOI: 10.1007/978-981-15-8289-9_63.
- [191] Sauer, C.; Breitsprecher, T.; Küstner, C.; Schleich, B. und Wartzack, S. „SLASSY—an Assistance System for Performing Design for Manufacturing in Sheet-Bulk Metal Forming: Architecture and Self-Learning Aspects“. *AI* 2.3 (Sep. 2021), S. 307–329. DOI: 10.3390/ai2030019.
- [192] Settaluri, K.; Haj-Ali, A.; Huang, Q.; Hakhamaneshi, K. und Nikolic, B. „AutoCkt: Deep Reinforcement Learning of Analog Circuit Designs“. *2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. Grenoble, France: IEEE, März 2020, S. 490–495. DOI: 10.23919/date48585.2020.9116200.

- [193] Schreiber, T.; Netsch, C.; Eschweiler, S.; Wang, T.; Storek, T.; Baranski, M. und Müller, D. „Application of Data-Driven Methods for Energy System Modelling Demonstrated on an Adaptive Cooling Supply System“. *Energy* 230 (Sep. 2021), S. 120894. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120894.
- [194] Sprügel, T. C.; Rothfelder, R.; Bickel, S.; Grauf, A.; Sauer, C.; Schleich, B. und Wartzack, S. „Methodology for Plausibility Checking of Structural Mechanics Simulations Using Deep Learning on Existing Simulation Data“. *DS 91: Proceedings of NordDesign 2018*. Linköping, Sweden, 2018-08-14/2018-08-17, S. 10.
- [195] Tüchsen, J.; Pop, A.-C.; Koch, M.; Schleich, B. und Wartzack, S. „Data Driven Product Portfolio Analysis of Electric Motors Based on Product Platforms Using Knowledge-Based Systems“. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1.1* (Juli 2019), S. 2537–2546. DOI: 10.1017/dsi.2019.260.
- [196] Wolf, A.; Binder, N.; Miehling, J. und Wartzack, S. „Towards Virtual Assessment of Human Factors: A Concept for Data Driven Prediction and Analysis of Physical User-product Interactions“. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*. Bd. 1. Cambridge University Press, Juli 2019, S. 4029–4038. DOI: 10.1017/dsi.2019.410.
- [197] Zhang, X.; Goh, K.-Y.; Laurent, P.; Formosa, K. und Teysseyre, J. „Simulation Driven Physics-of-failure Analysis for System-in-Package Development“. *PROCEEDINGS OF THE 2013 IEEE 15TH ELECTRONICS PACKAGING TECHNOLOGY CONFERENCE (EPTC 2013)*. Electronics Packaging Technology Conference Proceedings. 2013, S. 612–617.
- [198] Zhang, C.; Kwon, Y. P.; Kramer, J.; Kim, E. und Agogino, A. M. „Concept Clustering in Design Teams: A Comparison of Human and Machine Clustering“. *Journal of Mechanical Design* 139.11 (Nov. 2017), S. 111414. DOI: 10.1115/1.4037478.
- [199] Lassmann, W., Hrsg. *Wirtschaftsinformatik*. Wiesbaden: Gabler, 2006. DOI: 10.1007/978-3-8349-9152-2.
- [200] Chen, M.; Mao, S. und Liu, Y. „Big Data: A Survey“. *Mobile Networks and Applications* 19.2 (Apr. 2014), S. 171–209. DOI: 10.1007/s11036-013-0489-0.
- [201] Sainter, P.; Oldham, K.; Larkin, A.; Murton, A. und Brimble, R. „Product Knowledge Management Within Knowledge-Based Engineering Systems“. *Volume 2: 26th Design Automation Conference*. Baltimore,

- Maryland, USA: American Society of Mechanical Engineers, Sep. 2000, S. 113–120. DOI: 10.1115/DETC2000/DAC-14501.
- [202] Fan, I.-S. und Bermell-Garcia, P. „International Standard Development for Knowledge Based Engineering Services for Product Lifecycle Management“. *Concurrent Engineering* 16.4 (Dez. 2008), S. 271–277. DOI: 10.1177/1063293X08100027.
- [203] Maedche, A. und Staab, S. „Ontology Learning for the Semantic Web“. *IEEE Intelligent Systems* 16.2 (März 2001), S. 72–79. DOI: 10.1109/5254.920602.
- [204] Andersson, P.; Ludvigsson, M. und Isaksson, O. „Automated CFD Blade Design within a CAD System“. *NAFEMS Nordic Seminar: Integration of Numerical Simulation into the Product Development Process (FEA and CFD)* 02/11/2006-03/11/2006. NAFEMS Contact Nordic Countries, 2006.
- [205] Sandberg, M. *Knowledge Based Engineering : In Product Development*. Techn. Ber. 2003:05. Luleå University of Technology, Innovation and Design, 2003, S. 15.
- [206] Stokes, M. J. „Managing Engineering Knowledge: MOKA-Methodology for Knowledge Based Engineering Applications“. 2001.
- [207] Klein, R. „Knowledge Modeling In Design — The MOKA Framework“. *Artificial Intelligence in Design '00*. Hrsg. von Gero, J. S. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000, S. 77–102. DOI: 10.1007/978-94-011-4154-3_5.
- [208] Cooper, D. und LaRocca, G. „Knowledge-Based Techniques for Developing Engineering Applications in the 21st Century“. *7th AIAA ATIO Conf, 2nd CEIAT Int'l Conf on Innov and Integr in Aero Sciences, 17th LTA Systems Tech Conf; Followed by 2nd TEOS Forum*. Belfast, Northern Ireland: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Sep. 2007. DOI: 10.2514/6.2007-7711.
- [209] Avram, G. „Empirical Study on Knowledge Based Systems“. *Electronic Journal of Information Systems Evaluation* 8.1 (2005), pp11–20.
- [210] Lutz, C. „Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte : Rahmenwerk für die Konzeption und Einführung wissensbasierter Assistenzsysteme in die Konstruktion“. Thesis. Technische Universität Wien, 2011.

- [211] Küstner, C. „Engineering assistance system to aid data-driven product developmentAssistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung“. Diss. FAU University Press, 2020, 5297 KB, xii, 219 Seiten pages. DOI: 10.25593/978-3-96147-349-6.
- [212] Emberey, C.; Milton, N.; Berends, J.; Van Tooren, M.; Van Der Elst, S. und Vermeulen, B. „Application of Knowledge Engineering Methodologies to Support Engineering Design Application Development in Aerospace“. *7th AIAA ATIO Conf, 2nd CEIAT Int'l Conf on Innov and Integr in Aero Sciences, 17th LTA Systems Tech Conf; Followed by 2nd TEOS Forum*. Belfast, Northern Ireland: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Sep. 2007. DOI: 10.2514/6.2007-7708.
- [213] Karagiannis, D. „Wissensmanagement: Einige Konzepte & Technologien“. *Informationswirtschaft: Ein Sektor mit Zukunft* (2003).
- [214] Briard, T.; Jean, C.; Aoussat, A.; Véron, P.; Le Cardinal, J. und Wartzack, S. „DATA-DRIVEN DESIGN CHALLENGES IN THE EARLY STAGES OF THE PRODUCT DEVELOPMENT PROCESS“. *Proceedings of the Design Society* 1 (Aug. 2021), S. 851–860. DOI: 10.1017/pds.2021.85.
- [215] Al-Jaroodi, J. und Mohamed, N. „Characteristics and Requirements of Big Data Analytics Applications“. *2016 IEEE 2nd International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC)*. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, Nov. 2016, S. 426–432. DOI: 10.1109/CIC.2016.062.
- [216] Labrinidis, A. und Jagadish, H. V. „Challenges and Opportunities with Big Data“. *Proceedings of the VLDB Endowment* 5.12 (Aug. 2012), S. 2032–2033. DOI: 10.14778/2367502.2367572.
- [217] Bertoni, A. „Role and Challenges of Data-Driven Design in the Product Innovation Process“. *IFAC-PapersOnLine* 51.11 (2018), S. 1107–1112. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.455.
- [218] Wilberg, J.; Triep, I.; Hollauer, C. und Omer, M. „Big Data in Product Development: Need for a Data Strategy“. *2017 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*. Portland, OR: IEEE, Juli 2017, S. 1–10. DOI: 10.23919/PICMET.2017.8125460.
- [219] Lichtenthaler, E. „Methoden Der Technologie-Früherkennung Und Kriterien Zu Ihrer Auswahl“. *Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen* (2008), S. 59–84. DOI: 10.1007/978-3-540-74755-0_4.
- [220] Dumas, M.; La Rosa, M.; Mendling, J. und Reijers, H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. 2nd ed. 2018. Springer Berlin Heidelberg, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-56509-4.

- [221] Scheer, A.-W. *ARIS - vom Geschäftsprozess zum Anwendungssystem*. 4., durchgesehene Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
- [222] Schmelzer, H. J. und Sesselmann, W. *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis: Kunden zufriedenstellen, Produktivität steigern, Wert erhöhen*. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2020.
- [223] Gronau, N. *Geschäftsprozessmanagement in Wirtschaft und Verwaltung - Analyse, Modellierung und Konzeption*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: GITO mbH Verlag, 2017.
- [224] Hammer, M. und Champy, J. *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. Updated and rev., with a new introduction. London: Brealey, 2001.
- [225] Gadatsch, A. *Grundkurs Geschäftsprozess-Management: Analyse, Modellierung, Optimierung und Controlling von Prozessen*. 9., aktualisierte und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2020.
- [226] Bayer, F. und Kühn, H. *Prozessmanagement Für Experten*. New York: Springer, 2013.
- [227] Sharp, A. und McDermott, P. *Workflow Modeling Tools for Process Improvement and Applications Development*. Boston: Artech House, 2009.
- [228] Brenner, J. *Lean Administration: Verschwendung in Büros erkennen, analysieren und beseitigen*. Praxisreihe Qualitätswissen. München: Hanser, 2018.
- [229] Koubarakis, M. und Plexousakis, D. „Business Process Modelling and Design — a Formal Model and Methodology“. 17.4 (1999), S. 13. DOI: 10.1023/a:1009686723414.
- [230] Atteslander, P.; Cromm, J.; Grabow, B.; Klein, H.; Maurer, A. und Siegert, G. *Methoden der empirischen Sozialforschung*. 13., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. ESV basics. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2010.
- [231] Stier, W. *Empirische Forschungsmethoden*. Zweite, verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999.
- [232] Feldbrügge, R. und Brecht-Hadraschek, B. *Prozessmanagement leicht gemacht: Geschäftsprozesse analysieren und gestalten*. 2., aktualisierte Aufl. Leicht gemacht. München: Redline Wirtschaft, 2008.
- [233] Heine, M. und Rehder, S. A. *Geschäftsprozessmanagement*. Executive education. Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer, 2017.

- [234] Bundesministerium des Innern. *Organisationshandbuch - Dokumentenanalyse*. 2023. https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6_MethodenTechniken/61_Erhebungstechniken/611_Dokumentenanalyse/dokumentenanalyse-node.html (besucht am 27. 11. 2023).
- [235] Van Der Aalst, W. M. P. *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-19345-3.
- [236] Van Der Aalst, W. „Process Mining: Overview and Opportunities“. *ACM Transactions on Management Information Systems* 3.2 (Juli 2012), S. 1–17. DOI: 10.1145/2229156.2229157.
- [237] Reinkemeyer, L., Hrsg. *Process Mining in Action: Principles, Use Cases and Outlook*. Cham: Springer International Publishing, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-40172-6.
- [238] Meyer, A.; Smirnov, S. und Weske, M. „Data in Business Processes.“ *EMISA Forum* 31.3 (2011), S. 5–31.
- [239] Wynn, D. C. und Clarkson, P. J. „Process Models in Design and Development“. *Research in Engineering Design* 29.2 (Apr. 2018), S. 161–202. DOI: 10.1007/s00163-017-0262-7.
- [240] Aguilar-Savén, R. S. „Business Process Modelling: Review and Framework“. *International Journal of Production Economics* 90 (2004), S. 129–149. DOI: 10.1016/S0925-5273(03)00102-6.
- [241] Inc., K. B. S. *IDEF – Integrated DEFinition Methods (IDEF)*. <https://www.idef.com/> (besucht am 21. 11. 2023).
- [242] Kim, C.-H.; Weston, R.; Hodgson, A. und Lee, K.-H. „The Complementary Use of IDEF and UML Modelling Approaches“. *Computers in Industry* 50.1 (Jan. 2003), S. 35–56. DOI: 10.1016/S0166-3615(02)00145-8.
- [243] Mayer, R. J.; Menzel, C.; Painter, M. K.; Dewitte, P.; Blinn, T. M. und Perakath, B. „Information Integration for Concurrent Engineering (IICE) IDEF3 Process Description Capture Method Report“. 1992.
- [244] Booch, G.; Maksimchuk, R.; Engle, M.; Conallen, J.; Houston, K.; Young, B. und John Fuller, J. *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. 3rd ed. Hoboken: Pearson Education, Limited, 2007.
- [245] Li, Q. und Chen, Y.-L. „Data Flow Diagram“. *Modeling and Analysis of Enterprise and Information Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 85–97. DOI: 10.1007/978-3-540-89556-5_4.

- [246] Petri, C. A. „Kommunikation Mit Automaten“. Diss. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 1962.
- [247] Reisig, W. *Understanding Petri Nets: Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-33278-4.
- [248] Jensen, K. „An Introduction to the Practical Use of Coloured Petri Nets“. *Lectures on Petri Nets II: Applications*. Hrsg. von Goos, G.; Hartmanis, J.; Van Leeuwen, J.; Reisig, W. und Rozenberg, G. Bd. 1492. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, S. 237–292. DOI: 10.1007/3-540-65307-4_50.
- [249] Bretschneider, F. und Lagger, H. „D DESIGN-FLOW MODELING AND KNOWLEDGE-BASED MANAGEMENT“. *Applied Artificial Intelligence* 6.1 (Jan. 1992), S. 45–57. DOI: 10.1080/08839519208949941.
- [250] Kusiak, A. und Wang, J. „Decomposition of the Design Process“. *Journal of Mechanical Design* 115.4 (Dez. 1993), S. 687–695. DOI: 10.1115/1.2919255.
- [251] Gadatsch, A. *Geschäftsprozesse analysieren und optimieren: Praxis-tools zur Analyse, Optimierung und Controlling von Arbeitsabläufen*. Online-ausg. Geschäftsprozesse analysieren und optimieren. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [252] White, S. A. „Introduction to BPMN“. *Ibm Cooperation* 2 (2004).
- [253] Khurum, M.; Petersen, K. und Gorschek, T. „Extending Value Stream Mapping through Waste Definition beyond Customer Perspective: EXTENDING VALUE STREAM MAPPING“. *Journal of Software: Evolution and Process* 26.12 (Dez. 2014), S. 1074–1105. DOI: 10.1002/smr.1647.
- [254] Rother, M. und Shook, J. *Learning to See: Value-Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda*. Version 1.5 ; 20th Anniversary Edition. Boston: Lean Enterprise Inst, 2018.
- [255] McManus, H. L. *Product Development Value Stream Mapping (PDVSM) Manual*. Techn. Ber. 1st ed. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [256] Heger, S.; Thiem, H.; Valett, L.; Schröder, J. und Gimpel, H. „Value Stream Model and Notation – Digitale Transformation von Wertströmen“. *WI2020 Zentrale Tracks*. GITO Verlag, März 2020, S. 710–724. DOI: 10.30844/wi_2020_g2-heger.
- [257] Meudt, T.; Metternich, J. und Abele, E. „Value Stream Mapping 4.0: Holistic Examination of Value Stream and Information Logistics in Production“. *CIRP Annals* 66.1 (2017), S. 413–416. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.005.

- [258] Booch, G.; Rumbaugh, J. und Jacobson, I. *Unified Modeling Language User Guide, the (2nd Edition) (Addison-Wesley Object Technology Series)*. Addison-Wesley Professional, 2005.
- [259] Becker, J.; Mathas, C. und Winkelmann, A. *Geschäftsprozessmanagement*. Informatik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-85155-4.
- [260] Smith, R. P. und Morrow, J. A. „Product Development Process Modeling“. *Design Studies* 20.3 (Mai 1999), S. 237–261. DOI: 10.1016/S0142-694X(98)00018-0.
- [261] Steward, D. V. „The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems“. *IEEE Transactions on Engineering Management* EM-28.3 (1981), S. 71–74. DOI: 10.1109/TEM.1981.6448589.
- [262] Smith, R. P. und Eppinger, S. D. „A Predictive Model of Sequential Iteration in Engineering Design“. *Management Science* 43.8 (Aug. 1997), S. 1104–1120. DOI: 10.1287/mnsc.43.8.1104.
- [263] Belhe, U. und Kusiak, A. „Modeling Relationships Among Design Activities“. *Journal of Mechanical Design* 118.4 (Dez. 1996), S. 454–460. DOI: 10.1115/1.2826912.
- [264] Smith, R. P. und Eppinger, S. D. „Identifying Controlling Features of Engineering Design Iteration“. *Management Science* 43.3 (März 1997), S. 276–293. DOI: 10.1287/mnsc.43.3.276.
- [265] Adler, P. S.; Mandelbaum, A.; Nguyen, V. und Schwerer, E. „From Project to Process Management: An Empirically-Based Framework for Analyzing Product Development Time“. *Management Science* 41.3 (März 1995), S. 458–484. DOI: 10.1287/mnsc.41.3.458.
- [266] Blessing, L. „A process-based approach to computer supported engineering design“. PhD Thesis - Research UT, graduation UT. Netherlands: University of Twente / University of Twente, Mai 1994.
- [267] Shah, J. J.; Jeon, D. K.; Urban, S. D.; Bliznakov, P. und Rogers, M. „Database Infrastructure for Supporting Engineering Design Histories“. *Computer-Aided Design* 28.5 (Mai 1996), S. 347–360. DOI: 10.1016/0010-4485(95)00054-2.
- [268] Taylor, B. W. und Moore, L. J. „R & D Project Planning with Q-Gert Network Modeling and Simulation“. *Management Science* 26.1 (1980), S. 44–59. DOI: 10.1287/mnsc.26.1.44. JSTOR: 2630744.

- [269] Wynn, D. C.; Eckert, C. M. und Clarkson, P. J. „Applied Signposting: A Modeling Framework to Support Design Process Improvement“. *Volume 4a: 18th International Conference on Design Theory and Methodology*. Bd. 2006. Philadelphia, Pennsylvania, USA: ASME, 2006, S. 553–562. DOI: 10.1115/DETC2006-99402.
- [270] Lévárdy, V. und Browning, T. R. „An Adaptive Process Model to Support Product Development Project Management“. *IEEE Transactions on Engineering Management* 56.4 (Nov. 2009), S. 600–620. DOI: 10.1109/TEM.2009.2033144.
- [271] Lindemann, U.; Maurer, M. und Braun, T. *Structural Complexity Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-87889-6.
- [272] Levitt, R. E.; Thomsen, J.; Christiansen, T. R.; Kunz, J. C.; Jin, Y. und Nass, C. „Simulating Project Work Processes and Organizations: Toward a Micro-Contingency Theory of Organizational Design“. *Management Science* 45.11 (Nov. 1999), S. 1479–1495. DOI: 10.1287/mnsc.45.11.1479.
- [273] Park, H. und Cutkosky, M. R. „Framework for Modeling Dependencies in Collaborative Engineering Processes.“ *Research in Engineering Design* 11.2 (Aug. 1999), S. 84–102. DOI: 10.1007/PL00003885.
- [274] Trauer, J.; Wöhr, F.; Eckert, C.; Kannengiesser, U.; Knippenberg, S.; Sankowski, O. und Zimmermann, M. „Criteria for Selecting Design Process Modelling Approaches“. *Proceedings of the Design Society 1* (Aug. 2021), S. 791–800. DOI: 10.1017/pds.2021.79.
- [275] Fricke, E.; Negele, H.; Schrepfer, L.; Dick, A.; Gebhard, B. und Hartlein, N. „Modeling of Concurrent Engineering Processes for Integrated Systems Development“. *17th DASC. AIAA/IEEE/SAE. Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No.98CH36267)*. Bd. 1. Bellevue, WA, USA: IEEE, 1998, B13/1, B13/1. DOI: 10.1109/DASC.1998.741453.
- [276] Browning, T. R. „Process Integration Using the Design Structure Matrix“. *Systems Engineering* 5.3 (Jan. 2002), S. 180–193. DOI: 10.1002/sys.10023.
- [277] Browning, T. R. und Ramasesh, R. V. „A Survey of Activity Network-Based Process Models for Managing Product Development Projects“. *Production and Operations Management* 16.2 (März 2007), S. 217–240. DOI: 10.1111/j.1937-5956.2007.tb00177.x.
- [278] Stacey, M.; Eckert, C. und Hillerbrand, R. „Process Models: Plans, Predictions, Proclamations or Prophecies?“ *Research in Engineering Design* 31.1 (Jan. 2020), S. 83–102. DOI: 10.1007/s00163-019-00322-8.

- [279] Becker, T. *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [280] McConnel, E. *Project Management Framework: Definition Components Examples*. 2023.
- [281] Korn, K. C. *Strategic Management Framework*. 2023. <https://managingresearchlibrary.org/glossary/strategic-management-framework> (besucht am 03. 12. 2023).
- [282] Paulk, M.; Curtis, B.; Chrissis, M. und Weber, C. „Capability Maturity Model, Version 1.1“. *IEEE Software* 10.4 (1993), S. 18–27. DOI: 10.1109/52.219617.
- [283] Becker, J.; Knackstedt, R. und Pöppelbuß, J. „Developing Maturity Models for IT Management: A Procedure Model and Its Application“. *Business & Information Systems Engineering* 1.3 (Juni 2009), S. 213–222. DOI: 10.1007/s12599-009-0044-5.
- [284] Kulkarni, U. und Freeze, R. „Development and Validation of a Knowledge Management Capability Assessment Model“. *ICIS 2004 Proceedings* (Dez. 2004).
- [285] de Bruin, T. und Rosemann, M. „Towards a Business Process Management Maturity Model“. *European Conference on Information Systems*. 2005.
- [286] Valdez-de-Leon, O. „A Digital Maturity Model for Telecommunications Service Providers“. *Technology Innovation Management Review* 6.8 (Aug. 2016), S. 19–32. DOI: 10.22215/timreview/1008.
- [287] Glöckler, U. und Maul, G. „„Situatives Führen“ nach Hersey und Blanchard“. *Ressourcenorientierte Führung als Bildungsprozess*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 35–45. DOI: 10.1007/978-3-531-92432-8_3.
- [288] Kobayashi, I. *20 Keys to Workplace Improvement*. Rev. and expanded. Portland, Ore: Productivity Press, 1995.
- [289] Töpfer, A. „Six Sigma, Balanced Score Card Und EFQM-Modell Im Wirkungsverbund“. *Six Sigma: Konzeption Und Erfolgsbeispiele Für Praktizierte Null-Fehler-Qualität*. Hrsg. von Töpfer, A. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 371–383. DOI: 10.1007/978-3-540-48593-3_16.
- [290] Poeppelbuss, J. und Roeglinger, M. „What Makes a Useful Maturity Model? A Framework of General Design Principles for Maturity Models and Its Demonstration in Business Process Management“. *19th European Conference on Information Systems, ECIS 2011*. Bd. 19. Helsinki, Finland, 2011-06-09/2011-06-11.

- [291] Maier, C.; Laumer, S. und Eckhardt, A. „An Integrated IT-Architecture for Talent Management and Recruitment:“ *Proceedings of the 3rd International Workshop on Human Resource Information Systems*. Milan, Italy: SciTePress - Science and and Technology Publications, 2009, S. 28–38. DOI: 10.5220/0002173700280038.
- [292] North, K.; Aramburu, N. und Lorenzo, O. J. „Promoting Digitally Enabled Growth in SMEs: A Framework Proposal“. *Journal of Enterprise Information Management* 33.1 (Sep. 2019), S. 238–262. DOI: 10.1108/JEIM-04-2019-0103.
- [293] Blatz, F.; Bulander, R. und Dietel, M. „Maturity Model of Digitization for SMEs“. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. Stuttgart: IEEE, Juni 2018, S. 1–9. DOI: 10.1109/ICE.2018.8436251.
- [294] Grossman, R. L. „A Framework for Evaluating the Analytic Maturity of an Organization“. *International Journal of Information Management* 38.1 (Feb. 2018), S. 45–51. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2017.08.005.
- [295] Morais, E. und Santos, S. „Electronic Business Maturity in Portuguese SME and Large Enterprises“. *Communications of the IBIMA* (Jan. 2011). DOI: 10.5171/2011.283342.
- [296] Catlin, T.; Scanlan, J. und Willmott, P. „Raising Your Digital Quotient“. *McKinsey Quarterly* (2015). (Besucht am 11. 12. 2023).
- [297] Hölzle, K.; Gerhardt, F. und Petzolt, S. „Reifegradmessung zur digitalen Transformation von KMU“ (2019). DOI: 10.13140/RG.2.2.28402.66242.
- [298] Britze, N.; Schulze, A.; Fenge, K.; Woltering, M.; Gross, M.; Menge, F.; Mucke, A.; Ensinger, A.; Keller, H.; Oldenburg, L.; Wederhake, A.; Backers, S.; von Braunschweig, M.-C.; Wankerl, A.; Rapp, C.; Sturm, T.; Hoffmann, G.; Laux, M.; Schröder, T.; Zibell, M.; Hoffmann, D.; Streif, M.; Wörner, A. und Halstenbach, V. *Reifegradmodell Digitale Geschäftsprozesse*. 2020. https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-04/200406_lf_reifegradmodell_digitale-geschäftsprozesse_final.pdf (besucht am 15. 02. 2022).
- [299] Wiesner, S. A.; Gaiardelli, P.; Gritti, N. und Oberti, G. „Maturity Models for Digitalization in Manufacturing - Applicability for SMEs“. *Advances in Production Management Systems*. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-99707-0_11.
- [300] Mittal, S.; Romero, D. und Wuest, T. „Towards a Smart Manufacturing Maturity Model for SMEs (SM₃E)“. *Advances in Production Management Systems*. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-99707-0_20.

- [301] Trung Pham, Q. „Measuring The ICT Maturity Of SMEs“. *Journal of Knowledge Management Practice* 11.1 (März 2010).
- [302] Rübél, S.; Emrich, A.; Klein, S. und Loos, P. „A Maturity Model for Business Model Management in Industry 4.0“. *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2018*. Lüneburg, Germany, 2018-03-06/2018-03-09.
- [303] Adamik, A. und Nowicki, M. „Preparedness of Companies for Digital Transformation and Creating a Competitive Advantage in the Age of Industry 4.0“. *Proceedings of the International Conference on Business Excellence* 12.1 (Mai 2018), S. 10–24. DOI: 10.2478/picbe-2018-0003.
- [304] Warwick Manufacturing Group, Hrsg. *An Industry 4 Readiness Assessment Tool*. 2017. (Besucht am 11. 12. 2023).
- [305] Evans, N. D. *Mastering Digital Business: How Powerful Combinations of Disruptive Technologies Are Enabling the next Wave of Digital Transformation*. Swindon, GBR: BCS, 2017.
- [306] Appelfeller, W. und Feldmann, C. *Die digitale Transformation des Unternehmens: systematischer Leitfaden mit zehn Elementen zur Strukturierung und Reifegradmessung*. Berlin [Heidelberg]: Springer Gabler, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-54061-9.
- [307] Lichtblau, K.; Bertenrath, R.; Millack, A.; Schröter, M.; Schmitz, E.; Stich, V.; Bleider, M.; Blum, M. und Schmitt, K. „Industrie 4.0-Readiness“. 2015.
- [308] Remane, G.; Hanelt, A.; Wiesböck, F. und Kolbe, L. „Digital Maturity in Traditional Industries – an Exploratory Analysis“. *Proceedings of 25th European Conference on Information Systems (ECIS 2017)*. Guimarães, Portugal, 2017-06-05/2017-06-10.
- [309] Westerman, G.; Tannou, M.; Bonnet, D.; Ferraris, P. und McAfee, A. „The Digital Advantage: How Digital Leaders Outperform Their Peers in Every Industry“. *MIT Sloan Management and Capgemini Consulting* (2012).
- [310] Bain & Company, Hrsg. *The Path to Digital Maturity*. Dez. 2016. <https://www.bain.com/insights/the-path-to-digital-maturity-infographic/> (besucht am 11. 12. 2023).
- [311] Wanner, J.; Hofmann, A.; Fischer, M.; Imgrund, F.; Janiesch, C. und Geyer-Klingeberg, J. „Process Selection in RPA Projects - towards a Quantifiable Method of Decision Making“. *Proceedings of the 40th International Conference on Information Systems, ICIS 2019, Munich, Germany, December 15-18, 2019*. Hrsg. von Krcmar, H.; Fedorowicz, J.; Boh, W. F.; Leimeister, J. M. und Wattal, S. Association for Information Systems, 2019.

- [312] Feldmann, C., Hrsg. *Praxishandbuch Robotic Process Automation (RPA): von der Prozessanalyse bis zum Betrieb*. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Gabler, 2022.
- [313] Grabner, T. *Operations Management: Auftragserfüllung bei Sach- und Dienstleistungen*. 2., aktualisierte Aufl. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [314] Gramlich, L.; Gluchowski, P.; Horsch, A.; Schäfer, K. und Waschbusch, G., Hrsg. *Gabler Banklexikon. K - Z*. 15. Auflage. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Gabler, 2020. DOI: 10.1007/9783658267575.
- [315] Gladen, W. *Kennzahlen- und Berichtssysteme: Grundlagen zum Performance Measurement*. 1. Aufl. Gabler-Lehrbuch. Wiesbaden: Gabler, 2001.
- [316] Verhaelen, B.; Mayer, F.; Peukert, S. und Lanza, G. „A Comprehensive KPI Network for the Performance Measurement and Management in Global Production Networks“ (2021). DOI: 10.5445/IR/1000131163.
- [317] Kline Jr, C. A. und Hessler, H. L. „The Du Pont Chart System for Appraising Operating Performance“. *NACA Bulletin (August, Section 3)* (1952), S. 1595–1619.
- [318] Kaplan, R. S. und Norton, D. „Putting the Balanced Scorecard to Work“. *Harvard Business Review* 71.5 (1993), S. 134–147.
- [319] Mehlstäubl, J.; Atzberger, A. und Paetzold, K. „General Approach to Support Modelling of Data and Information Flows in Product Development“. *Balancing Innovation and Operation*. The Design Society, 2020. DOI: 10.35199/norddesign2020.47.
- [320] Davenport, T. H. und Patil, D. J. „Data Scientist: The Sexiest Job of the 21st Century“. *Harvard Business Review* (Okt. 2012).
- [321] Sharafi, A.; Wolfenstetter, T.; Wolf, P. und Krčmar, H. „Analysis of Current IT Support for Product Development Processes“. 2011.
- [322] Relvas, C. und Ramos, A. „New Methodology for Product Development Process Using Structured Tools“. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 235.3 (Feb. 2021), S. 378–393. DOI: 10.1177/0954405420971228.
- [323] Almfelt, L. „Requirements-Driven Product Innovation - Methods and Tools Reflecting Industrial Needs“. 2005.
- [324] Lutters, E.; Van Houten, F. J.; Bernard, A.; Mermoz, E. und Schutte, C. S. „Tools and Techniques for Product Design“. *CIRP Annals* 63.2 (2014), S. 607–630. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.010.

- [325] Pettersen, L. „Why Artificial Intelligence Will Not Outsmart Complex Knowledge Work“. *Work, Employment and Society* 33.6 (Dez. 2019), S. 1058–1067. DOI: 10.1177/0950017018817489.
- [326] Akmal, S.; Shih, L.-H. und Batres, R. „Ontology-Based Similarity for Product Information Retrieval“. *Computers in Industry* 65.1 (Jan. 2014), S. 91–107. DOI: 10.1016/j.compind.2013.07.011.
- [327] Ameri, F. und Summers, J. D. „An Ontology for Representation of Fixture Design Knowledge“. *Computer-Aided Design and Applications* 5.5 (Jan. 2008), S. 601–611. DOI: 10.3722/cadaps.2008.601-611.
- [328] Chung, P.; Cheung, L.; Stader, J.; Jarvis, P.; Moore, J. und Macintosh, A. „Knowledge-Based Process Management—an Approach to Handling Adaptive Workflow“. *Knowledge-Based Systems* 16.3 (Apr. 2003), S. 149–160. DOI: 10.1016/S0950-7051(02)00080-1.
- [329] Solis, L. S.; Axmann, B. und Schuldt, T. „Vergleich von Methoden Zur Auswahl Digitaler Technologien Für KMU: Welche Methoden Zur Auswahl von Digitalen Technologien Sind Für Kleine Und Mittlere Unternehmen Am Besten Geeignet?“ *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116.10 (Okt. 2021), S. 735–739. DOI: 10.1515/zwf-2021-0148.
- [330] Spiegelberg, S. „Social Media in der Personalentwicklung : eine Bestandesaufnahme in Schweizer Unternehmen“ (2012). DOI: 10.21256/ZHAW-728.
- [331] European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. *Benutzerleitfaden zur Definition von KMU*. LU: Publications Office, 2020.
- [332] Wickel, M.; Schenkl, S. A.; Schmidt, D. M.; Hense, J. U.; Mandl, H. und Maurer, M. „Knowledge Structure Maps Based on Multiple Domain Matrices“. *InImpact: The Journal of Innovation Impact* 5 (2013), S. 5–16.
- [333] Uschold, M. und Gruninger, M. „Ontologies: Principles, Methods and Applications“. *The Knowledge Engineering Review* 11.2 (Juni 1996), S. 93–136. DOI: 10.1017/S0269888900007797.
- [334] Hitzler, P.; Krötzsch, M.; Parsia, B.; Patel-Schneider, P. F. und Rudolph, S. *OWL 2 Web Ontology Language Primer (Second Edition)*. 2022. <https://www.w3.org/TR/owl2-primer/> (besucht am 08. 11. 2022).
- [335] Musen, M. A. „The Protégé Project: A Look Back and a Look Forward“. *AI Matters* 1.4 (Juni 2015), S. 4–12. DOI: 10.1145/2757001.2757003.

- [336] International Electrotechnical Committee. *DIN IEC 60050-351:2014-09, International Electrotechnical Vocabulary - Part 351: Control Technology (IEC 60050-351:2013)*. 2014. DOI: 10.31030/2159569. (Besucht am 05. 06. 2023).

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Gerschütz, B.; Fechter, M.; Schleich, B. und Wartzack, S. „A Review of Requirements and Approaches for Realistic Visual Perception in Virtual Reality“. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*. Bd. 1. Delft, NL: Cambridge University Press, Juli 2019, S. 1893–1902. DOI: 10.1017/dsi.2019.195. (Besucht am 12. 08. 2019).
- [P2] Gerschütz, B.; Fechter, M.; Schleich, B. und Wartzack, S. „Konzept Zur Verbesserung Des Realitätsgetreuen, Visuellen Erlebens in Virtuellen Umgebungen Durch Eye-Tracking“. *Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung Und Design 2019* (Dresden). Hrsg. von Ralph H. Stelzer, J. K. Dresden: Thelem Universitätsverlag & Buchhandlung GmbH & Co. KG, Juni 2019, S. 51–65.
- [P3] Gerschütz, B.; Sauer, C.; Kormann, A.; Wallisch, A.; Mehlstäubl, J.; Alber-Laukant, B.; Schleich, B.; Paetzold, K.; Rieg, F. und Wartzack, S. „Towards Customized Digital Engineering: Herausforderungen Und Potentiale Bei Der Anpassung von Digital Engineering Methoden Für Den Produktentwicklungsprozess“. *Stuttgarter Symposium Für Produktentwicklung 2021 (SSP 2021)*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut IAO, Mai 2021.
- [P4] Gerschütz, B.; Schleich, B. und Wartzack, S. „A Semantic Web Approach for Structuring Data-Driven Methods in the Product Development Process“. *DS III: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X*. Tutzing, Germany: The Design Society, Sep. 2021. DOI: 10.35199/dfx2021.15.
- [P5] Gerschütz, B.; Spießl, B. V. M.; Schleich, B. und Wartzack, S. „An Adapted Method for Design Process Capturing to Meet the Challenges of Digital Product Development“. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21)*. Bd. 1. Gothenburg, Sweden: The Design Society, Aug. 2021, S. 365–374. DOI: 10.1017/pds.2021.37.
- [P6] Mehlstäubl, J.; Nicklas, S.; Gerschütz, B.; Sprogies, N.; Schleich, B.; Lohner, T.; Wartzack, S.; Stahl, K. und Paetzold, K. „Voraussetzungen Für Den Einsatz Datengetriebener Methoden in Der Produktentwicklung“. *DS III: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X*. The Design Society, 2021. DOI: 10.35199/dfx2021.13.
- [P7] Gerschütz, B.; Bickel, S.; Schleich, B. und Wartzack, S. „Enabling Initial Design-Checks of Parametric Designs Using Digital Engineering

- Methods“. *Proceedings of the Design Society 2* (Mai 2022), S. 405–414. DOI: 10.1017/pds.2022.42.
- [P8] Sauer, C.; Gerschütz, B.; Bernsdorf, J.; Schleich, B. und Wartzack, S. „A Machine Learning-Based Approach for Quick Evaluation of Live Simulations in Embodiment Design“. *Proceedings of the Design Society 2* (Mai 2022), S. 1757–1766. DOI: 10.1017/pds.2022.178.
- [P9] Gerschütz, B.; Goetz, S.; Hörmann, M. und Wartzack, S. „Case-Based-Reasoning Zur Vorhersage von Produkteigenschaften“. *Artificial Intelligence Und Machine Learning in Der CAE-basierten Simulation*. Grafing b. München: NAFEMS DACH, Okt. 2023.
- [P10] Gerschütz, B.; Goetz, S. und Wartzack, S. „AI4PD—Towards a Standardized Interconnection of Artificial Intelligence Methods with Product Development Processes“. *Applied Sciences 13.5* (2023), S. 3002. DOI: 10.3390/app13053002.
- [P11] Gerschütz, B.; Goetz, S. und Wartzack, S. „Umsetzung Der Digitalisierung in Der Produktentwicklung: **Prozesse, Methoden Und Anwendung**“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 118.3* (März 2023), S. 163–168. DOI: 10.1515/zwf-2023-1027.
- [P12] Gerschütz, B.; Sauer, C.; Goetz, S.; Hörmann, M. und Wartzack, S. „Potentiale von Simulationsdatenmanagementsystemen Zur KI-gestützten Vorhersage Und Bewertung von Produkteigenschaften“. *NAFEMS Online-Magazin 3.67* (Sep. 2023), S. 26–31.
- [P13] Gerschütz, B.; Sauer, C.; Kormann, A.; Nicklas, S. J.; Goetz, S.; Roppel, M.; Tremmel, S.; Paetzold-Byhain, K. und Wartzack, S. „Digital Engineering Methods in Practical Use during Mechatronic Design Processes“. *Designs 7.4* (Juli 2023), S. 93. DOI: 10.3390/designs7040093.
- [P14] Pickel, J.; Gerschütz, B.; Horber, D.; Goetz, S. und Wartzack, S. „Ontology-Based Knowledge Provision for Decision Support in Product Development“. *DS 125: Proceedings of the 34th Symposium Design for X (DFX2023)*. The Design Society, 2023, S. 045–054. DOI: 10.35199/dfx2023.05. (Besucht am 10. 01. 2024).
- [P15] Gerschütz, B.; Consten, Y.; Goetz, S. und Wartzack, S. „PADDME—Process Analysis for Digital Development in Mechanical Engineering“. *Processes 12.1* (2024), S. 173. DOI: 10.3390/pr12010173.

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Schiedel, J. „Entwicklung Einer Neuartigen Methode Für Die Berechnung Einer Realitätsgetreuen Darstellung Im HMD Durch Eye-Tracking“. Masterarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2018.
- [S2] Böppl, F. „Konzeptentwicklung Und Anforderungsklä rung Einer Vernetzten Virtuellen Entwicklungsumgebung“. Masterarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.
- [S3] Gusbeth, M. „Entwicklung Einer Methode Zur Nutzung Variabler Tiefenunschärfe in Der Unreal Engine“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.
- [S4] Hermann, N. „Entwicklung Einer Methode Zur Nutzung von Foveated Rendering in Der Unreal Engine“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.
- [S5] Kammel, S. „Konzeptentwicklung Einer Innovativen Automatischen Dach-Schneefräse“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.
- [S6] Langer, R. „Konzeptentwicklung Zur Integration Einer AI-basierten Methode Zur Darstellung von Tiefenschärfe in Grafikengines“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.
- [S7] Weisgerber, F. „Entwicklung Eines Eye Tracking Systems Zur Visuellen Erfassung Virtueller Produkte“. Masterarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.
- [S8] Auer, A. „Systematische Klassifizierung von datengetriebenen Methoden und Werkzeugen zum Einsatz im Produktentwicklungsprozess“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2020.
- [S9] Penzl, S. „Untersuchung Der Interaktionsmöglichkeiten in Creo Parametric Durch Den Einsatz Der Virtuellen Realität“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2020.
- [S10] Spießl, B. V. M. „Entwicklung Einer Methode Zur Erfassung Digitaler Prozessketten“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2020.
- [S11] Grote, F. „Entwicklung Einer Steuerung Zur Navigation Einer Fahrdrohne Auf Dachflächen“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.

- [S12] Hetzner, P. „Entwicklung Einer Methode Zur Abwicklung von Freigabeprozessen Durch Blockchain-Anwendungen“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [S13] Kaup, S. „Entwicklung Einer Methode Zum Featurevergleich in STEP-Daten“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [S14] Merkel, F. „Analyse von Voraussetzungen Zur Ökonomischen Und Praxistauglichen Erfassung Digitaler Entwicklungsprozesse in KMU“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [S15] Ovant, E. „Möglichkeiten Der Integration von Blockchain Lösungen Im Produktentwicklungsprozess“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [S16] Sepper, D. „Entwicklung Einer Automatisiert Auswertbaren Notation Zur Visualisierung Digitaler Prozessketten“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [S17] Spießl, B. V. M. „Entwicklung von Bewertungskriterien Für Digitale Prozesse Mit Fokus Auf Die Anwendbarkeit Digitaler Methoden“. Masterarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [S18] Stöhr, L. „Evaluation der Anwendbarkeit des Process Minings auf die Digitale Produktentwicklung“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021.
- [S19] Dorn, T. „Evaluation Der Nutzbarkeit Der Ethereum Blockchain Zur Abbildung von Freigabeprozessen“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022.
- [S20] Maier, M. „Evaluation von Siemens HEEDS Zur Generierung von FEM Vorhersagemodellen“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022.
- [S21] Nikolaus, J. „Entwicklung Eines Konzepts Zur Abschätzung von Finite Elemente Ergebnissen Auf Basis von Case-Based-Reasoning“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022.
- [S22] Pajek, Z. „Identifikation von Potentialen Und Hindernissen Der Anwendung von KI-Methoden in KMU“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022.

- [S23] Schlund, A. „Systematische Analyse von Anwendungsfällen Datenge-
triebener Methoden in Bezug Zu Aufgabenclustern Der Produktent-
wicklung“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg, 2022.
- [S24] Schott, C. „Systematischer Vergleich der Herausforderungen bei der
Einführung datengetriebener Methoden mit der Durchführung von
KBE-Projekten.“ Diss. 2022.
- [S25] Stöhr, L. „Entwicklung Einer Taxonomie von Digital Engineering
Methoden Und Tools“. Masterarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-
Universität Erlangen-Nürnberg, 2022.
- [S26] Fauth, N. „Identifikation von Anforderungen an Einen Simulations-
Copiloten Zur Unterstützung Im Konstruktionsprozess“. Masterarbeit.
Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2023.
- [S27] Hittinger, D. „Evaluation Bestehender Ontologien Im Kontext Der
Produktentwicklung“. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-
Universität Erlangen-Nürnberg, 2023.
- [S28] Nikolaus, J. „Nutzbarmachung Bestehender Ontologien Zur Anwen-
dung in Der Prozessoptimierung“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-
Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2023.
- [S29] Pajek, Z. „Ermittlung von Kenngrößen Zur Messung Des Nutzens
Datengetriebener Methoden in Der Produktentwicklung“. Masterar-
beit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,
2023.
- [S30] Süppel, L. „Automatisches Preprocessing von Simulationen Auf
Basis von Maschinellern Lernen“. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-
Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2023.
- [S31] Vogel, C. „Eine Quantitative Analyse Der Wirtschaftlichen Und
Technischen Vorteile von ”Simulation Process and Data Manage-
ment”Für Kleine Und Mittlere Unternehmen“. Bachelorarbeit. Erlan-
gen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2023.
- [S32] Wekerle, A. „Entwicklung von Kriterien Zur Ex-Post Bewertung
Der Integration von KI-Methoden in Die Produktentwicklung“. Ba-
chelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg, 2024.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2025):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel

Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel

Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinsteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme

FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur

LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen

FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen

LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten

LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie

LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen

LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen

LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung

LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungs-träger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplati-nen

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen

LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe

LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlflügeoperationen

LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte

FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen

LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld

FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile

LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen

LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks

LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen

LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen - Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung

LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche

LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe

LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten

LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation

LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil

FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren

LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren

LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014. ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des Anlagenengineering
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglügen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich**Vierzigmann**

Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellsversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces

LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner

Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein

Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion

FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos

Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie

LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander**Kahrmanidis**

Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen

LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel

Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren

FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis

Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung

LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering

Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien

LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike**Hertweck**

Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen

LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto

Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems

FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel

Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe

FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić

Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess

FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus

Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse

FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer

Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen

LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger

Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020

LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin

Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip

LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy

Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)

FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr

Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme

FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner

Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung

LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar

A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels

LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler

Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme

LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidlinchverfahren

LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle

Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen

FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc

Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen

LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung

FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer

Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden

FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018.

ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz

Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation

LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl

Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile

LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner

Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm

Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge

LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenprinzip

LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung

LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektrischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobiler Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian

Fechter
Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram

Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaf

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völk

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgerverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft
Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme
KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang
Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen
FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer
Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten
FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer
Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren
FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao
Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte
KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer
Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik
FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn
Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung
LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos
Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau
LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid
Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehsicken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen
LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg
Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial
LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl
Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlsschweißen
LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotations-schneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder

Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging

LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer

Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden

KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte

FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll

Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken

FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner

Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M

LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari

Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.

LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht

Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen

LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun

Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau

FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel

Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses

FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen

Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen

LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser

Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen

LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld

FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungsautomatisierung

FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünnter Verpackungsstähle: Entwicklung einer geeigneten Charakterisierungs- und Validierungsstrategie

LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbeeinträchtigte Personen

FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel Lutz

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches

FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehrfach überrollter elasto-plastischer Kontakte

KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian Wiesenmayer

Untersuchungen zur Stoffflusssteuerung beim Fügen durch Umformen von hochfesten Aluminiumlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung

LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen

LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation

KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärteprozess durch Verwendung maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeuge

LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohmoser
Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier
DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner
Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Simulation
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-735-7.

Band 441: Fabian Dworschak
Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion
KTmfk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-739-5.

Band 442: Martin Killmann
Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-741-8.

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann
Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des virtuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-747-0.

Band 444: Andreas Jobst
Eigenspannungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-749-4.

Band 445: Martin Anton Kraus
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchungen zum Kaltfließpressen kleinster metallischer Pin-Strukturen aus der Blechebene
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-757-9.

Band 446: Moritz Späth
Assessment of microcirculation by shifted position-diffuse reflectance imaging (SP-DRI)
LPT, xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke
Methode zur Auswahl eines alternativen Blechwerkstoffes für flexibel gewalzte und direkt warmumgeformte Karosseriestrukturbau-
teile
LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder, 27 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker
Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen
LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching
Numerische Optimierung von sekundären, geschmierten Punkt- und Ellipsenkontakten zur gezielten Auslegung von Rollenlagern
KTmfk, xxv u. 206 Seiten, 70 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler
Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder, 4 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-691-6.

Band 451: Eva Russwurm
Kombinierte Material- und Energieflussimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen
FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-770-8.

Band 452: Janik Schaudé
Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper
FMT, x u. 167 Seiten, 74 Bilder, 4 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-776-0.

Band 453: Philipp Bräuer
Nahinfrarot-Laser-Strukturierung und nasschemische Metallisierung von Aluminiumoxid mittels Laser-Absorptionsschicht
FAPS, xx u. 152 Seiten, 55 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-780-7.

Band 454: Andreas Michael Müller
Definition and applications of the spatially discrete metrological descriptor framework for triangle mesh geometry data in 3D coordinate metrology
FMT, x u. 220 Seiten, 75 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-782-1.

Band 455: Sina Martin
Einstellung anisotroper Eigenschaften dielektrischer Elastomersysteme mittels eines selektiven Druckverfahrens
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 76 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-789-0.

Band 456: Manuel Reck
Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch Mikroprägen in einem kombinierten Umformprozess
LFT, ix u. 170 Seiten, 83 Bilder, 10 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-798-2.

Band 457: Simone Neermann
Untersuchung photonischer Sinterverfahren und Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens zur Qualifizierung der Sinterung gedruckter Elektronik
FAPS, xix u. 145 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2025. ISBN 978-3-96147-800-2.

Band 458: Christian Witzgall

Berücksichtigung vorausgegangener Ermüdungsschädigung in der Crashesimulation kurzfaserverstärkter Thermoplaste
KTmfk, xxiv u. 201 Seiten, 109 Bilder, 19 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-802-6.

Band 459: Lorenz Butzhammer

3-D-Scantrajektorien für die dimensionelle Röntgen-Computertomographie durch adaptive Messobjektneigung
FMT, xvi u. 212 Seiten, 81 Bilder, 2 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-812-5.

Band 460: Benjamin Gerschütz

Identifikation von Anwendungsfällen und Integration datengetriebener Methoden im Produktentwicklungsprozess
KTmfk, xi u. 209 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-814-9.

Abstract

Advancing digitalisation and the increased use of artificial intelligence (AI) are attracting increasing attention in Germany, particularly in the context of product development. Despite the enormous potential of available data, this often remains unutilised. Digital engineering promises a paradigm shift here. However, companies - especially small and medium-sized enterprises (SMEs) - face challenges when it comes to integrating these methods into their processes. Previous research has often focussed on individual aspects and a holistic approach to the integration of data-driven methods is lacking. This thesis develops a method to support SMEs in identifying suitable use cases and integrating these methods into the product development process. Based on an industry study, knowledge deficits and the lack of qualified personnel are identified as key challenges and the method is developed on this basis. This consists of five phases, including an assessment of the level of digitalisation, a process analysis and the systematic selection and adaptation of data-driven methods. The applicability of the method in an industrial context was successfully confirmed. This work not only contributes to solving current challenges, but also shows the promising future of AI in product development.

Die fortschreitende Digitalisierung und der verstärkte Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) finden in Deutschland zunehmende Beachtung, insbesondere im Kontext der Produktentwicklung. Trotz des enormen Potenzials verfügbarer Daten bleiben diese oft ungenutzt. Das Digital Engineering verspricht hier einen Paradigmenwechsel. Jedoch stehen Unternehmen und hier insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) vor Herausforderungen bei der Integration dieser Methoden in ihre Prozesse. Die bisherige Forschung konzentrierte sich oft auf Einzelaspekte und es fehlt ein ganzheitlicher Ansatz zur Integration von datengetriebenen Methoden. Diese Arbeit entwickelt eine Methode zur Unterstützung von KMU bei der Identifikation geeigneter Anwendungsfälle und der Integration dieser Methoden in den Produktentwicklungsprozess. Basierend auf einer Industriestudie werden Wissensdefizite und der Mangel an qualifiziertem Personal als zentrale Herausforderungen identifiziert und basierend hierauf die Methode entwickelt. Diese besteht aus fünf Phasen, darunter die Bewertung des Digitalisierungsstands, einer Prozessanalyse und der systematischen Auswahl und Anpassung datengetriebener Methoden. Die Anwendbarkeit der Methode im industriellen Kontext wurde erfolgreich bestätigt. Diese Arbeit trägt nicht nur zur Lösung aktueller Herausforderungen bei, sondern zeigt auch die vielversprechende Zukunft der KI in der Produktentwicklung auf.

ISBN 978-3-96147-814-9

