



FAU Studien aus dem Maschinenbau 364

Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter
Engineering-Konfigurator
für roboterzentrierte
Automatisierungslösungen

Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für
roboterzentrierte Automatisierungslösungen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 364

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. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Eike Wolfram Schäffer

**Web- und wissensbasierter
Engineering-Konfigurator
für roboterzentrierte
Automatisierungslösungen**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2021

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.

Autoren-Kontaktinformation: Eike Wolfram Schäffer, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ([R.https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)),
<https://orcid.org/0000-0002-4439-0069>

Bitte zitieren als

Schäffer, Eike Wolfram. 2021. *Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 364. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-411-0.

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://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

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

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-410-3 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-411-0 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-411-0

**Web- und wissensbasierter
Engineering-Konfigurator für
roboterzentrierte Automatisierungslösungen**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Eike Wolfram Schäffer, M.Sc., M.Sc.

aus Nürnberg

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

Tag der mündlichen
Prüfung: 15.03.2021

Vorsitzender des
Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, KIT Karlsruhe

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber und meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing Jörg Franke für das in mich gesetzte Vertrauen und die Möglichkeit zur Promotion. Seine stetige Unterstützung sowie der gewährte wissenschaftliche Freiraum haben einen sehr großen Beitrag zur Entstehung meiner Dissertation und zu meiner persönlichen Weiterentwicklung geleistet.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing Jürgen Fleischer, Institutsleiter Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung des wbk Instituts für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats, die aufmerksame Durchsicht sowie die angeregte Diskussion recht herzlich bedanken.

Daneben gilt mein Dank meinen Kollegen bzw. meinem Forschungsbereichsleiter Matthias Brossog und Bürokollegen Maximilian Metzner sowie meinen wissenschaftlichen Sparringspartnern Andreas Mayr, Tobias Lechler, Jochen Zeitler, Jonathan Fuchs und den übrigen FAPS Kollegen/ -innen für die sehr gute und kollegiale Zusammenarbeit sowie ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre. Ihr habt mich sowohl in persönlicher als auch fachlicher Hinsicht enorm bereichert.

Auch möchte ich dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie danken, welches das Forschungsprojekt ROBOTOP ideell und finanziell gefördert hat sowie dem ROBOTOP Projektkonsortium und meinen Studierenden für die gute Zusammenarbeit.

Besonders meinen Eltern, Petra und Dr. Josef Schäffer, gilt ein großer Dank für das Ermöglichen, die Unterstützung und den Rückhalt für meinen akademischen Werdegang. Auch möchte ich meinem Bruder Jan Schäffer danken, auf den ich mich stets verlassen kann.

Nürnberg, im März 2021

Eike Wolfram Schäffer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Situation und Handlungsbedarf.....	1
1.2 Lösungsansatz	2
1.3 Vorgehensweise.....	3
1.4 Forschungsfrage	5
2 Engineering automatisierter Produktionsanlagen	7
2.1 Phasen des Fabrik- und Produktlebenszyklus	7
2.1.1 Prozesse und Rollenverteilung bei der Systemintegration von Produktionsanlagen	8
2.1.2 Reifegrade von Technologien und Systemlösungen	9
2.2 Vertriebsprozess von Produktionsanlagen und relevante Industrieroboterperipherie.....	10
2.2.1 Vertriebsprozess von Produktionsanlagen.....	11
2.2.2 Auftragspezifische Entwicklung	14
2.2.3 Industrieroboterperipherie.....	16
2.3 Maßnahmen zur Komplexitätsreduktion	17
2.3.1 Module und Modularisierung	18
2.3.2 Baukastensystem	19
2.4 Model-Based Systems Engineering mechatronischer Produktionsanlagen	21
2.4.1 Modelle, Systemmodelle und Sichten	22
2.4.2 Produkt-, Prozess- und Ressourcen- (PPR-) Modell.....	23
2.4.3 Modulare Ebenenstruktur mechatronischer Systeme	24
2.4.4 Schnittstellendiagramm und -matrix	25
2.4.5 Fähigkeiten zur Abstraktion mechatronischer Systeme	26
3 Konzepte und Methoden zur Digitalisierung des Engineerings	27
3.1 Digitalisierung als Chance für Innovation.....	28
3.1.1 Strategische Perspektive der Wissensautomatisierung	29

3.1.2	Skalierbare Wiedernutzung von Wissen als Basis digitaler Geschäftsmodelle.....	30
3.1.3	Prozessautomatisierung in der Wissensarbeit	32
3.1.4	Komplexitätsreduktion von Softwarewerkzeugen	34
3.2	Methoden zur Entwicklung innovativer Softwaresysteme für das Engineering.....	35
3.2.1	System- und Softwarearchitektur.....	36
3.2.2	Serviceorientierte- und Microservice-Architektur als konsequente, softwareseitige Modularisierung.....	37
3.2.3	Nutzerorientierte Gestaltung als agile Entwicklungsmethode für innovative Softwarelösungen.....	42
4	Wissensautomatisierung, künstliche Intelligenz und wissensbasierte Konfiguration	45
4.1	Wissen und Informationen.....	45
4.1.1	Wissen im Kontext des Menschen	46
4.1.2	Herausforderungen bei der Wissensakquise	48
4.1.3	Einsatzgebiete von Wissen	49
4.1.4	Wissen im Kontext der Informationstechnologie	50
4.1.5	Unbeständiges, unvollständiges, unsicheres, unpräzises und vages Wissen.....	51
4.2	Künstliche Intelligenz, Expertensysteme und wissensbasierte Konfiguratoren.....	53
4.2.1	Einordnung von Expertensystemen und Konfiguratoren im Bereich der künstlichen Intelligenz	53
4.2.2	Anforderungen an Experten(-systeme) und somit an Konfiguratoren.....	56
4.2.3	Wissensbasierte Konfiguratoren als Anwendungsbereich der künstlichen Intelligenz.....	57
4.2.4	Generelle Phasen bei der Entwicklung von Produktkonfiguratoren von Maschinen und Anlagen	59
4.2.5	Vorhandene Methoden zum Wissenserwerb und zur Wissensaufbereitung für wissensbasierte Systeme	60
4.3	Wissensrepräsentation für informationstechnische Systeme und Konfiguratoren.....	62
4.3.1	Wissenstrennung.....	62
4.3.2	Zustände als statische Wissensrepräsentation	64
4.3.3	Testprädikate als Validierungswissen	65
4.3.4	Zustandsoperatoren als Veränderungswissen	65
4.4	Suchverfahren und -probleme.....	66
4.4.1	Kategorien von Suchverfahren	66
4.4.2	Constraint Satisfaction Probleme.....	67

5	Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen	71
5.1	Inhaltliche und wissenschaftliche Abgrenzung	72
5.1.1	Wissensbasierter Produktkonfigurator (PK) versus wissensbasierter Engineering-Konfigurator (EK)	72
5.1.2	Abgrenzung vom Stand der Forschung	74
5.2	Wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen.....	75
5.2.1	Einordnung von Engineering-Konfiguratoren innerhalb des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0	76
5.2.2	Modulare Best-Practice-Architektur von roboterzentrierten Automatisierungslösungen für EK.....	77
5.2.3	Phase 1 des EK: Einordnung des Lösungsbedarfs.....	79
5.2.4	Phase 2 der EK: Anpassungskonfiguration.....	79
5.3	MS-basiertes Webplattformökosystem und Wertschöpfungsnetz für das Engineering.....	80
5.3.1	Bedarfsfall und Geschäftsmodellbetrachtung für EK	82
5.3.2	Wertschöpfungsnetz einer Engineering-Webplattform.....	85
5.3.3	EK- und MS-basierte Webplattformökosysteme	86
5.4	Validierung des web- und wissensbasierten Engineering-Konfigurators entlang der MSA	88
5.4.1	Prototypische Teilvalidierung der MSA für web- und wissensbasierte Engineering-Konfiguratoren	88
5.4.2	MSA für Engineering-Konfiguratoren am Beispiel der MS-basierten Webplattform ROBOTOP.....	91
5.4.3	Validierung der MSA des Engineering-Konfigurators entlang der Implementierung von ROBOTOP	97
5.4.4	Herausforderungen bei der Entwicklung web- und wissensbasierter Engineering-Konfiguratoren.....	99
6	Methode für die agile Entwicklung von Engineering-Konfiguratoren.....	103
6.1	Architektur und Rollen für die agile Wissensakquise	103
6.1.1	Drei Wissensbereiche ($W_1 - W_3$) als unabhängige Bereiche für die agile Entwicklung von EK.....	103
6.1.2	Rollen entlang der agilen Wissensarbeit	104
6.2	Methode zur Entwicklung nutzerzentrierter Engineering-Konfiguratoren (W_1)	106
6.2.1	Unterscheidung zwischen Expertenkonfiguratoren und Engineering-Konfiguratoren	107

6.2.2	Methode zur Entwicklung nutzerzentrierter Benutzerschnittstellen für Engineering-Konfiguratoren	108
6.2.3	Validierung mittels prototypischer Implementierung anhand des Anwendungsfalls 1 für Planer des PU	111
6.2.4	Weitere Anwendungsfälle und Benutzerschnittstellen für Engineering-Konfiguratoren.....	118
6.3	Methode zur Aufbereitung von Best Practices als modulare Datenbasis für 3D-EK (W_2)	121
6.3.1	Grundarchitektur und Bestandteile von Best Practices	121
6.3.2	Beschaffung und Bewertung von Best Practices.....	122
6.3.3	2D-Konzeptdarstellungsmuster.....	124
6.3.4	Modulare Best-Practice-Architektur von RA für 3D-EK	124
6.3.5	Anwendungsbeispiele der Best-Practice-Aufbereitung	127
6.4	Methode zur arbeitsteiligen Aufbereitung von logischem Expertenwissen (W_3).....	132
6.4.1	Constraintbasierte Konfiguration: eine Voraussetzung für die arbeitsteilige Wissensakquise für EK	132
6.4.2	Entwicklungsmethode zur kollaborativen Wissensakquise und -modellierung	134
6.5	Implementierung des EK und Anwendungsbeispiele	144
6.5.1	Vorgehen bei der Implementierung des 3D-EK	145
6.5.2	Fallstudie 1: Bearbeitungsmaschine beladen und entladen (handhaben).....	149
6.5.3	Fallstudie 2: Werkstücke montieren (handhaben und fügen)	151
6.5.4	Abschließendes Fazit und Argumentenbilanz zum EK	153
7	Zusammenfassung und Ausblick	157
8	Summary and outlook	161
9	Anhang	165
9.1	Danksagung und Einordnung.....	165
9.2	Weitere Veröffentlichungen	167
	Literaturverzeichnis	169

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

AI	Artificial Intelligence (zu Deutsch, künstliche Intelligenz (KI))
AML	Automation Markup Language auch AutomationML (zu Deutsch, Automatisierungs-Markup-Sprache)
AR	Augmented Reality (zu Deutsch, erweiterte Realität)
ATO	Assemble-to-Order (zu Deutsch, Montage auf Bestellung)
B2C	Business-to-Consumer (zu Deutsch, Konsumgütermarkt)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BOM	Bill of material (zu Deutsch, Stückliste)
BP	Best Practice
BPMN	Business Process Model and Notation (zu Deutsch, Geschäftsprozessmodell und -notation)
CAD	Computer-Aided Design (zu Deutsch, computergestützte Konstruktion)
CEN	Comité Européen de Normalisation (zu Deutsch, Europäisches Komitee für Normung)
CEO	Chief Executive Officer (zu Deutsch, Geschäftsführer)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTO	Design-to-Order (zu Deutsch, Design auf Bestellung)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
eEPK	Erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette
EK	Wissensbasierter Engineering-Konfigurator
ETO	Engineer-to-Order (zu Deutsch, Engineering auf Bestellung)
GUI	Graphical User Interface (zu Deutsch, graphischen Benutzeroberfläche)
IFO	Informationsobjekte
IoT	Internet Of Things (zu Deutsch, Internet der Dinge)

ISO	Internationale Organisation für Normung (Herkunft aus dem griechischen ἴσος (isos) = gleich)
IT	Informationstechnologie
K	Komponente
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
MBSE	Model-Based Systems Engineering (zu Deutsch, modellbasierte Systementwicklung)
MdW	Methoden der Wissensverarbeitung
MQB	Modulare Querbaukasten
MS	Microservice
MSA	Microservice-Architektur
MTO	Make-to-Order (zu Deutsch, Auftragsfertigung)
MVP	Minimum Viable Prototype (zu Deutsch, minimal funktionsfähiger Prototyp) häufig auch (nicht in dieser Arbeit) Minimum Viable Product (zu Deutsch, minimal funktionsfähiges Produkt)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (zu Deutsch, US-Bundesbehörde für Raumfahrt und Flugwissenschaft)
n	Number (zu Deutsch, Anzahl)
OEM	Original Equipment Manufacturer (zu Deutsch, Erstausrüster)
PAiCE	Digitale Technologien für die Wirtschaft: Forschungs- rahmen des BMWi, in dem ROBOTOP eines der geför- derten Projekte ist.
PK	Wissensbasierter Produktkonfigurator
PLM	Product-Lifecycle-Management (zu Deutsch, Produktlebenszyklusmanagement)
PM	Prozessmodul
PPR-Modell	Produkt-, Prozess- und Ressourcen-Modell
PTO	Pick-to-Order (zu Deutsch, Kommissionierung auf Bestellung)
PU	Produzierendes Unternehmen

RA	Roboterzentrierte Automatisierungslösungen
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
ROBOTOP	Forschungsprojekt: Modulare, offene und internetbasierte Plattform für Roboter-Anwendungen in Industrie und Service
REST	Representational State Transfer (zu Deutsch, darstellungsorientierte Zustandsübertragung)
SCM	Supply-Chain-Management
SOA	Serviceorientierte-Architektur
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TRL	Technology Readiness Level (zu Deutsch, Technologie-Fähigkeitsniveau)
UCD	User-centered design (zu Deutsch, nutzerorientiertes Design)
UI	User Interface (zu Deutsch, Benutzerschnittstelle)
UML	Unified Modeling Language (zu Deutsch, vereinheitlichte Modellierungssprache)
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDI/VDE	VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VR	Virtual Reality (zu Deutsch, virtuelle Realität)
VUCA	Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity (zu Deutsch, Unbeständigkeit, Unsicherheit, Komplexität und Mehrdeutigkeit)
W	Wissensbereich
WPB	Webplattformbetreiber
Z	Zustand
ZO	Zustandsoperatoren

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Vorgehensweise der Arbeit	4
Bild 2: In der Phase der Produktion treffen Produkt- und Fabriklebenszyklus aufeinander [22] mit Erweiterung um die Einbindung des Systemintegrators nach [P1]	7
Bild 3: Geschäftsprozesse und Output Dokumente entlang der Systemintegration von Produktionsanlagen basierend auf dem Automatisierungsbedarfs eines Kunden [P1, 22, 27]	8
Bild 4: Reifegrad von Produkten bzw. Ressourcen in Anlehnung an das „Technology Readiness Level“ (TRL), Ursprung aus der Raumfahrt [30, 31]	10
Bild 5: Ablauf und Bestandteile der Angebotsklärung entlang der Systemintegration im Sondermaschinenbau [1, 31, 33]	12
Bild 6: Vorteile einer automatisierten, IT-basierten Angebotserstellung [1, 31, 34]	13
Bild 7: Anforderungen an das Planungsergebnis: Vorgehensweise und Funktion der technischen Angebotsbearbeitung - als Synthese aus [1, 31, 35]	15
Bild 8: Notwendige Peripheriekomponenten zum effektiven Einsatz eines Industrieroboters im industriellen Umfeld [36].....	16
Bild 9: Mögliche und technisch sinnvolle Lösungsvarianten in Abhängigkeit von der Anzahl der Objekte, wie z. B. Roboter, Adapterplatte und Greifer sowie deren Ausprägungen.....	18
Bild 10: Sechs Arten der Modularität zur Erhöhung der Anzahl von Gleichteilen und Erschließung von Skaleneffekten für kosteneffiziente Lösungen [9, 39]	19
Bild 11: Systematik zur Untergliederung eines Baukastens in mehrere Modulkategorien anhand der Verwendungshäufigkeit und Kundenindividualität [24, 40]	20
Bild 12: Modellabstraktionsebenen von mechatronischen Systemen, mit topologischen Modellen als für die Konfiguration primär relevante Abstraktionsebene [28, 43]	21

Bild 13: Systemmodelle, als ganzheitliche Abstraktion der Realität, können mit zielgruppenspezifischen Teilsichten für einzelne Fachgebiete nutzbar gemacht werden [46, 47].....	22
Bild 14: PPR-Modell zur Planung von Produktionsanlagen und zur Beschreibung des Informationsbedarfs für die rechnergestützte Planung [44, 48–50]	23
Bild 15: Mögliche Ebenen zur systematischen Einordnung von mechatronischen Baugruppen (B1 - B5) als Module in der Fabrikplanung [24, 52]	24
Bild 16: Beispielhaftes Schnittstellendiagramm als generischer Ansatz zur Beschreibung von Schnittstellen für modulare Systeme in Anlehnung an [54]	25
Bild 17: Abstraktion von mechatronischen Anlagen, Modulen und Komponenten durch Fähigkeiten für einen effizienten Planungsprozess [53, 55]	26
Bild 18: Funktionsumfang und Kopplung heterogener Systeme am Beispiel der Konfigurator- und CAD-System-Integration für eine 3D-Darstellung von Konfigurationsergebnissen [60, 61].....	27
Bild 19: Trichtermodell: Strategie und Geschäftsmodell stellen die Anforderungen und damit Fokussierung für die späteren Phasen bereit; als Synthese aus [65, 66]	28
Bild 20: Strategischer Vorteil mittels automatisierter unternehmensinterner Prozesse, da diese schwer von Konkurrenten imitierbar sind [P4]	29
Bild 21: Nach der „10er-Regel“ steigen die Kosten pro Fehler in Abhängigkeit des Fehlerentdeckungszeitpunktes, je Phase der Produktentwicklung um den zehnfachen Wert [76, P4].....	31
Bild 22: Gegenüberstellung von herkömmlicher Prozessdokumentation und -ausführung (oben) gegenüber einer automatisierten Prozessausführung (unten) [P4]	33
Bild 23: Prozessautomatisierung ausführbarer Modelle mittels Process Engine [81, P4]	33
Bild 24: Der mustergestützte Ansatz (PSA Framework), um den Softwarewerkzeugentwicklungsprozess zu unterstützen sowie diesen effizient zu gestalten [82].....	34

Bild 25: Gestaltungsprinzipien für ein intuitiveres Verständnis von Inhalten [83], erweitert mit eigenen Beispielen im Kontext von roboterzentrierten Produktionsanlagen.....	35
Bild 26: Umgang mit der Unschärfe einer Softwarearchitektur entlang des Entwicklungsprozesses, durch eine iterative Anpassung entlang einer agilen Zielstellung [84].....	36
Bild 27: Das „4 + 1“ Sichtenmodell nach KRUCHTEN verdeutlicht, dass entlang der Entwicklung einer Architektur verschiedene Perspektiven notwendig sind [88, 89]	37
Bild 28: Exemplarische Darstellung verschiedener Softwarearchitekturen von einer monolithischen bis hin zu einer MSA; eigene Darstellung nach [P9, 92]	39
Bild 29: Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile von MS-Architekturen anhand der strategischen, organisatorischen und technologischen Perspektive [90, 93–98]	41
Bild 30: Die drei Stufen des Erfüllungsgrads von Nutzbarkeit; von der Effektivität zur Kundenzufriedenheit bei der Benutzung [P10, 102, 103] ..	42
Bild 31: Entwicklungsmethode nutzerzentrierter Software in Kombination mit der Scrum-Methode [106, 107]	43
Bild 32: Qualitative Gegenüberstellung der wissensbasierten Fähigkeiten vom menschlichen Denken und IT-Lösungen, wie Expertensysteme und Computerprogramme zueinander [111]	46
Bild 33: Kategorisierung von Problemlösetypen nach Interpretation und Konstruktion [43]	49
Bild 34: Gegenüberstellung von anweisungs- und regelbasierter Programmierung [43].....	50
Bild 35: Einordnung von Konfiguration innerhalb von Expertensystemen als Teilbereich der künstlichen Intelligenz (KI) [engl. Artificial Intelligence (AI)] [1, 111, 119–121]	54
Bild 36: Gegenüberstellung der Grundstrukturen von Konfigurations-, Zuordnungs-, Diagnose- und Planungsproblemen [43]	55
Bild 37: Generelle Bestandteile eines wissensbasierten Konfigurators [1, 4, 11, 111]	58

Bild 38: Zuordnung der Problemlösungstypen Konfiguration, Diagnostik und Simulation zu Basistechniken der Wissensverarbeitung und -repräsentation. [43]	59
Bild 39: Vier Phasen wissensaufbereitender Maßnahmen hin zur Konfiguration [126]	59
Bild 40: Abstrakter, genereller Ablauf und Stufen des Wissenserwerbs [127]	60
Bild 41: Allgemeine Methode zum Aufbau eines wissensbasierten Systems [43]	62
Bild 42: Gegenüberstellung wissensbasierter und konventioneller Softwaresysteme [4, 43].....	63
Bild 43: Ein Labyrinth als Beispiel für ein Routenproblem, bei dem der Zielzustand bekannt ist und der Lösungspfad gesucht wird. [4, 43]	64
Bild 44: Zustände und Zustandsoperatoren [43].....	66
Bild 45: Labyrinth als Suchproblem, bei dem Zielzustände gesucht werden und die Regeln definieren, wann der Zielzustand erreicht ist [4, 43]	67
Bild 46: Beschreiben eines Suchproblems am Beispiel der Mengenlehre, wobei Constraints den Lösungsraum auf die zulässigen Lösungen einschränken [34, 122]	69
Bild 47: Constraint- bzw. Abhängigkeitsnetz mit eigenem Beispiel sowie Erweiterung im Kontext der Robotik mit der Grunddarstellung nach [34, 122]	69
Bild 48: Genereller Bedarf an Methoden zur Entwicklung von Engineering-Konfiguratoren für die Grobplanung von roboterzentrierten Automatisierungslösungen [31]	72
Bild 49: Differenzierung von Produktkonfiguratoren und des von SCHÄFFER et.al eingeführten Konzepts der wissensbasierten Engineering-Konfiguratoren gemäß der Synthese aus [1, 11, 23, 24, 115, 135, 138], erstmals veröffentlicht in [P1]	73
Bild 50: Generelle Aufgaben von Wissensanwendungen; eigene Darstellung, kondensiert aus [4, 43, 49] mit ergänzender Einordnung von Engineering-Konfiguratoren.....	75
Bild 51: Die Engineering-Konfiguration unterteilt sich in zwei Phasen: grobe Einordnung der Aufgabenstellung und Individualisierung (Anpassungskonfiguration) [P9, P14].....	76

Bild 52: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) nach [147, 148] zur qualitativen Einordnung von EK innerhalb von Industrie 4.0	77
Bild 53: Modularer Aufbau von Best Practices mittels der 3-Ebenen Architektur inklusive der ergänzenden Layout- und visuelle Gestaltungs- sowie Informationsobjekte	78
Bild 54: Die Phase 1 des EK ist die grobe Einordnung des Lösungsbedarfs über Filterfragen zur Auswahl der am besten geeigneten Best Practice aus dem Lösungsraum [P9, P14]	79
Bild 55: Die Phase 2 des EK ist die Individualisierung (Anpassungskonfiguration) des Lösungsbedarfs aufbauend auf den Startparametern der BP-Vorauswahl [P9, P10]; zyklische Darstellung in Anlehnung an das Spiralmodell [149]	80
Bild 56: Webplattformökosysteme schaffen den Rahmen zur Flexibilisierung und Standardisierung im Sondermaschinenbau hin zu EK; Synthese aus [156, 157]	81
Bild 57: Einordnung von Webplattformen mit vertriebsunterstützenden Konfigurationsfunktionen als vernetzendes System für die Grobplanung in Anlehnung an [137]	83
Bild 58: Potentielles Wertschöpfungsnetzwerk einer microservicebasierten Webplattform zum Vertrieb und Engineering von RA	85
Bild 59: Mögliche Zulieferpyramide für ein Webplattformökosystem für das Engineering	86
Bild 60: Ein Webplattformökosystem bietet die Voraussetzungen zur Einbindung spezialisierter, Engineering- und Produktkonfiguratoren sowie anderer MS [P9, P11]	87
Bild 61: Vereinfachter Konfigurationsablauf zur Teilvalidierung der MSA für EK [P11]	88
Bild 62: Überblick über die MSA sowie der einzelnen MS, kategorisiert nach MS ohne visuelle Repräsentation, Zusammenstellungs- und Fragment-MS [P11]	89
Bild 63: Der Zusammenstellungs-MS (Mehrbenutzer-Konfiguration) fügt die einzelnen MS-Fragmente zu einer HTML-Seite für den Nutzer zusammen [P11]	90

Bild 64: Webbrowserbasierte Visualisierung der Zusammenstellungs-MS (Mehrbenutzer-Konfiguration), mit den MS Konfiguration, Visualisierung, Chat und statische Komponenten [P11]	91
Bild 65: MS der Webplattformarchitektur, unterteilt in MS von ROBOTOP (P-MVP siehe Tabelle 10) und potentielle MS für weitere Funktionen (P-MVP x siehe Tabelle 12)	92
Bild 66: MSA und integrierte Funktionen der ROBOTOP Webplattform als Weiterentwicklung von [P9]	93
Bild 67: ROBOTOP Webplattform, BP-Filterung auf Basis der BP- bzw. Tätigkeitskategorie sowie Werkstück- bzw. Produktparameter (Phase 1 - grobe Einordnung)	97
Bild 68: Prototyp der ROBOTOP Webplattform, Anpassungskonfiguration mit 3D-Visualisierung und Simulation der BP-Szene (Phase 2 - Individualisierung)	98
Bild 69: Zyklen bei der Entstehung von ROBOTOP, strukturiert anhand der Phasen des SECI-Modells [172], mit eigenen Beispielen sowie Konkretisierung für ROBOTOP	100
Bild 70: Drei übergeordnete Wissensbereiche (W) zur Strukturierung der agilen Entwicklung nutzerzentrierter Engineering-Konfiguratoren	104
Bild 71: Erweiterung (*) der Architektur von Expertensystemen durch die Rollen 1 und 2 sowie Detaillierung des Entwicklers in die Rollen 3 und 5 - kondensiert aus [4, 11, 43, 63, 106, 117]	105
Bild 72: Gegenüberstellung von Expertenkonfiguratoren und Engineering-Konfiguratoren sowie deren Benutzerschnittstellenausprägung [P10]	107
Bild 73: Methode zur Entwicklung von Benutzerschnittstellen für EK mittels agiler Prototypenentwicklung und Optimierung	108
Bild 74: Verwendete Werkzeuge entlang der Prototypenentwicklung bzw. Wissensaufbereitung für die Benutzerschnittstellen von EK	112
Bild 75: Phase 1 (P1) der EK - BP-Filterung über die Kenngrößen Prozess bzw. Tätigkeit und Produkt bzw. Werkstückangaben [P14, P10]	113
Bild 76: Phase 2 der EK - BP-Auswahl, als initialer Parametersatz für die Anpassungskonfiguration [P14, P10]	114
Bild 77: Phase 3 der EK - Anpassungskonfiguration [P14, P10]	114

Bild 78: Phase 4 der EK - Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Rahmenbedingungen [P14].....	115
Bild 79: Phase 5 der EK - Abschätzen der Ausbringungsmenge als Grundlage für eine weitere Wirtschaftlichkeitsrechnung [P14].....	116
Bild 80: Phase 6 der EK - Zusammenfassung der Ergebnisse und Kontaktaufnahme [P14].....	116
Bild 81: Beispiel BPMN-Dokumentation der Klickstrecken von der BP-Filterung des Klickprototypen zum Abschluss der Entwicklung.....	117
Bild 82: Anwendungsfall (2), VR-Vertrieb von RA unterstützt durch den EK als Mehrbenutzersystem	118
Bild 83: Grobplanung auf Basis des freigestellten Hallenscan der FAPS Industriehalle zur Berücksichtigung des Layouts und bestehender Anlagen bei der BP-Integration.....	119
Bild 84: Anwendungsfall (3), AR-Planung von RA in der realen Produktionsumgebung, unterstützt durch den EK	120
Bild 85: BP-Bestandteile und deren Relevanz für die Konfiguratorvisualisierung	121
Bild 86: Wechselwirkung der Wissensbereiche (W) und Einbindung der BP (W ₂) entlang der Architektur des EK	122
Bild 87: 2D-Best-Practice-Muster für die Grobplanung: Beispielhafte 2D-Aufbereitung des BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen (Werkstück handhaben)	124
Bild 88: 3D-Darstellung der Layout- und visuellen Gestaltungsobjekte am Beispiel der BP 1 - Maschinenbeladen und -entladen.....	126
Bild 89: Exemplarische Darstellung und Zuordnung der Informationsobjekte (IFO) zu den BP-Architekturebenen, wobei die Übernahme von IFO in höhere Ebenen erfolgt	127
Bild 90: Umgesetzte Validierungs-BP von RA nach Zahlen der IFR aus dem Jahr 2019, zur Ableitung möglicher BP, prozentuale Verteilung der Anwendungsfelder nach [179]	129
Bild 91: Gegenüberstellung und Abgrenzung von tabellarischer, regel- und constraintbasierter Konfiguration.....	133
Bild 92: Strukturierte Darstellung der Bestandteile eines Constraints nach eigener Erweiterung, in Anlehnung an das Regelmodell aus [43].....	134

Bild 93: Acht-Schritte-Methode zur kollaborativen Wissensakquise und -modellierung, sowie als Grundlage einer skalierbaren Entwicklung von EK [P13]	135
Bild 94: Aufbereitete BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen als Datengrundlage für die weitere Modellierung	136
Bild 95: Die 150% Topologie mit den Objektklassen (1-23) zur Modellierung einer RA als Basis zur Wissenswiedernutzung [P13]	137
Bild 96: Beispielhafter Ausschnitt aus der zweidimensionalen Zuordnungsmatrix [P13]	138
Bild 97: Entwicklungsmethode zur Implementierung eines 3D-EK basierend auf den BP und dem logischen Konfigurationsmodell	146
Bild 98: 3D-Layout-Plattform bzw. Mastermodell der BP 1, indem über Hilfsskizzen die Prozessmodule und Komponenten auf der Bodenplatte vorpositioniert werden	148
Bild 99: Validierung der BP-Konfiguration entlang einer prototypischen Implementierung mittels der CAD-Software Inventor und dem Konfigurationsframework Tacton	149
Bild 100: Beispielhafte EK der BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen mittels RA, welches über den EK adaptiert und optimiert wird	150
Bild 101: Anpassungskonfiguration der BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen	151
Bild 102: Beispielhafte EK der BP 4 - Werkstücke montieren mittels RA, welche über den EK adaptiert und optimiert wird	152
Bild 103: Anpassungskonfiguration der BP 4 - Werkstücke montieren mittels RA	153
Bild 104: Drei Entwicklungsstufen von EK von der Effektivität bei der Aufgabenerfüllung zur Zufriedenheit der Nutzer [P10]	159
Bild 105: Technisch-funktionelle Aufbereitung von BP mittels Schnittstellendiagramm und des fähigkeitsbasierten Ansatzes für die Detailplanung	160
Bild 106: Three development stages of EK from effectiveness in task fulfilment to user satisfaction [P10]	163

Bild 107: Technical-functional preparation of BP by using an interface diagram and the capability-based approach for detailed planning164

Bild 108: Einordnung der eigenen Forschungsaktivität entlang von ROBOTOP; erstelltes Design durch SCHÄFFER für das ROBOTOP Konsortium165

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schnittstellenmatrix zu Bild 16, leere Felder zeigen dabei an, dass keine Interaktion zwischen den Modulen besteht bzw. in den vier Nullen stehen würden [54]	25
Tabelle 2: Fertigungstypen und deren Eignung für den Einsatz von Konfiguratoren [79].....	32
Tabelle 3: Das 5-Stufen-Modell nach DREYFUS et al. vom Anfänger zum Experten [114]	48
Tabelle 4: Gegenüberstellung der Wissensarten im Computer nach prozeduralem (quasi implizit) und deklarativem (explizitem) Wissen [4, 43]	51
Tabelle 5: Abgrenzung der wichtigsten Problemlösungsmethoden von Expertensystemen im Kontext der Konfiguration, Zitate aus [43, S. 10] und Primärquellen [121, 115]	55
Tabelle 6: Methoden zur Wissensakquise zusammengestellt aus den Bereichen Wissensverarbeitung, Anforderungsmanagement und UCD [4, 43, 109, 130, 128, 129]	61
Tabelle 7: Übersicht implementierbarer Testprädikate [43, 49, 111, 122, 132]	65
Tabelle 8: Abgrenzung der eigenen Forschungstätigkeit (SCHÄFFER) hinsichtlich der Zielsetzung der Digitalisierung und Optimierung des Engineerings von Automatisierungslösungen anhand der Kategorien des Fokus und der Werkzeuge [1, 3, 29, 49, 53, 137, 139-146]	74
Tabelle 9: Geschätztes jährliches, weltweites Einsparungspotential für Systemintegratoren bei dem Vertrieb von RA durch den Einsatz von EK zur Angebotsbearbeitung	84
Tabelle 10: Wesentliche MS bzw. Funktionen für EK am Beispiel der MSA-basierten Webplattform ROBOTOP. Die Ausgabe der MS erfolgt in Form von Daten oder einer Webseite (Seite).....	94
Tabelle 11: Beschreibung der *Smarte Komponenten MS. Hierbei wird bei der Ausgabe in Daten und die Darstellung einer Webseite (Seite) unterschieden	95

Tabelle 12: Übersicht über die P-MVP x MS, die Funktion sowie Eingabe und Ausgabe. Hierbei wird bei der Ausgabe in Daten und die Darstellung einer Webseite (Seite) unterschieden [P9].....	96
Tabelle 13: Checkliste zur ersten Konsistenzprüfung von BP als initiale Qualitätskontrolle vor der weiteren digitalen Aufbereitung	123
Tabelle 14: Klassifizierung relevanter Prozessmodule, welche im Rahmen der Validierung erstellt wurden, geordnet nach der VDI 2860 [35], der DIN 8580 [176] sowie der DIN1319-1 [177]	130
Tabelle 15: Gegenüberstellung sowie Abgrenzung von tabellarischer, anweisungs-, regel- und constraintbasierter Konfiguration [1, 11, 34, 43, 49, 122, P13]	133
Tabelle 16: Auszug aus den werkstück- (produkt-)bezogenen Constraints	139
Tabelle 17: Auszug aus den produktionsprozess- (prozess-)bezogenen Constraints	140
Tabelle 18: Auszug aus den komponenten- (ressourcen-)bezogenen Constraints	141
Tabelle 19: Constraints zur automatischen Engineering-Konfiguration der RA nach den Optimierungskriterien Preis, Taktzeit oder Autonomiezeit	141
Tabelle 20: Exemplarisch dargestellte Ableitung der notwendigen objektlassenspezifischen Attribute aus den gesammelten Constraints ...	142
Tabelle 21: Auszug aus dem Datenschema für die Objektklassen Roboter, Endeffektor, Adapter und Werkstück.....	143
Tabelle 22: Auszug aus den Komponenten bzw. Datensätzen der Objektklasse Roboter mit den Attributen Bezeichnung, Hersteller, Traglast, Reichweite sowie Anzahl der Achsen nach den Herstellerdatenblättern [183–186]	144
Tabelle 23: Argumentenbilanz zur Gegenüberstellung der Engineering-Konfiguration (Top-down) und dem klassischen Ansatz (Bottom-up) zur Planung von RA	155
Tabelle 24: Übersicht über die Projektpartner des Forschungsprojekts ROBOTOP im Rahmen des Technologieprogramms PAiCE	166
Tabelle 25: Übersicht über weitere Veröffentlichungen im Rahmen der Lehrstuhlätigkeit	167

1 Einleitung

Im Rahmen von Industrie 4.0 und der Globalisierung der Märkte werden immer kürzere Innovationszyklen notwendig, um als Unternehmen wettbewerbsfähig zu bleiben. Hierbei müssen Unternehmen in der Lage sein, länder- und ortsspezifische Produktvarianten für verschiedene Kundensegmente anzubieten. Zugleich sind unterschiedliche gesetzliche Rahmenbedingungen sowie kundenindividuelle Bedürfnisse zu berücksichtigen. Diese Aspekte und Bedingungen sollen bei einem optimalen Kosten- zu Nutzenverhältnis im Rahmen der Leistungskriterien Zeit, Kosten und Qualität erfüllt werden. Eine schnelle, technisch korrekte Angebotserstellung, welche den Anforderungen des Kunden entspricht, stellt hierbei einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil dar. [1]

1.1 Situation und Handlungsbedarf

Im Gegensatz dazu steht der Gebrauch von semantisch nicht vernetzten Werkzeugen wie Word, Power Point oder Excel bei der Wissensarbeit wie der Angebotserstellung. Durch die einfache und verbreitete Anwendung dieser Werkzeuge können oft qualitativ gute Endresultate erzielt werden. Eine einfache skalierbare Übertragbarkeit auf zukünftige Projekte, eine automatisierte Ausführung sowie Qualitätskontrolle sind mit diesem Vorgehen nur bedingt möglich. Im Gegensatz zur überschaubaren Angebotserstellung für einfache Produkte benötigen insbesondere komplexe Anwendungen im industriellen Umfeld ein durchdachtes Wissenskonzept. Die Limitation bestehender Fabrikplanungskonzepte und deren Werkzeuge zeigt auch eine Studie von REINEMA et al. [2], in welcher bei 60 Prozent der Automatisierungsprojekte die Terminziele und in 72 Prozent die Kostenziele nicht eingehalten wurden. Das Defizit bei der Fabrikplanung lässt sich zu 52 Prozent auf Zeit- und Informationsverluste zurückführen. In der Praxis erzielt die Fabrikplanung funktionsfähige Lösungen, jedoch besteht bei der Planungseffizienz erhebliches Potential zur Verbesserung. [2, 3]

Die IT wird häufig als reine, nachgelagerte oder ausgelagerte Supportfunktion eingeordnet. Nur selten wird diese in die Prozesse und die Weiterentwicklung eines Unternehmens als Kernkompetenz integriert: „Nach außen sind oft nur die technischen Geräte (Kraftfahrzeuge, Haushaltsgeräte oder Flugzeuge) oder Anlagen (Fabriken, Mobilfunknetze) sichtbar, dagegen wird der hohe Softwareanteil jedoch leicht übersehen und die Bedeutung

der Informatik unterschätzt.“ [4, S. 13] Insbesondere nachhaltige und skalierbare wissensbasierte Lösungen haben kurzfristig nur geringe Erfolge, da sehr viel Kondensations- und Infrastrukturarbeit geleistet werden muss. Hier lassen sich Parallelen zu Webplattformen wie Google oder Amazon ziehen, welche in den ersten Jahren nur bedingt profitabel waren [5]. Gerade bei einem zu geringen Betrachtungshorizont werden viele Projekte auf kurzfristige Leistungskennzahlen optimiert oder rationalisiert, was auch als „Kostenhöcker-Phänomen“ bekannt ist [6, 7]. [8, 9]

Unterschiede entstehen durch fehlende Standardisierung, fehlende Bemühungen zur Komplexitätsreduktion, alternative Lösungsmöglichkeiten, unzureichende Marktreife und eine marketingtechnische, unternehmensspezifische Wortwahl zur Differenzierung von Wettbewerbern. Der Trend zu steigenden Produktvarianten und zu steigender unternehmensexterner und -interner Komplexität stellt nach einer Studie für 83 Prozent der Unternehmen eine große Herausforderung dar [9]. Diese wird mit einer Überpezialisierung auf Nischenmärkte und der zunehmenden Generierung von technisch interessanten, aber auftragsirrelevanten Produktvarianten begründet. Durch eine übertriebene Nischenpolitik und den Fokus auf die Dimension „Produkt“ bzw. „Technik“, anstelle der Dimension „Kundennutzen“, wird eine Abwärtsspirale der Komplexität in Gang gesetzt. Dadurch entstehen über die Zeit mehr Produktvarianten und die Komplexitätskosten steigen auf ein schwer zu kontrollierendes Maß an. [9]

1.2 Lösungsansatz

Von der Evolution der Werkstattfertigung zur Fließband- und Massenfertigung bis hin zur individuellen Massenproduktion können zur aktuellen Wissensarbeit Parallelen gezogen werden. Zu Beginn der Automobilindustrie waren Automobile Unikate. Dies änderte sich, als diese von Henry Ford im Rahmen der Einführung des Modell T im Jahre 1908 entlang der Fließbandfertigung standardisiert und somit zur Massenproduktion befähigt wurden. Im Bereich der Fertigung konnte durch eine Standardisierung der Produkte und Produktionsschritte bis hin zu einem getakteten Produktionsprozess mittels Fließbandfertigung die Ausbringung und Qualität erheblich gesteigert werden. Die Kosten des Modell T konnten durch diese Maßnahmen von 850 Dollar auf 360 Dollar gesenkt werden. [10–12]

Die Antwort auf die Frage *„wie Automobile in großer Stückzahl produziert werden konnten“* war für Ford der entscheidende Wettbewerbsvorteil. Diese Frage soll im Rahmen dieser Dissertation auf die Wissensarbeit übertragen werden. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

(BMW) sieht einen Handlungsbedarf im Bereich von Plattformen zur Planung von Automatisierungslösungen und impliziert somit auch die Auflösung der individuellen Wissenswerkstatt [13]. Die individuelle Anpassung von Produkten an die Kundenwünsche spielt im Bereich des Vertriebs, des Produktdesigns und in der Produktion eine große Rolle [14]. Auch aus strategischer Perspektive besitzen konfigurierbare Produkte als eine der acht wesentlichen Produktindividualisierungsstrategien eine wesentliche Bedeutung [15]. Der Automobilmarkt ist einer der prominentesten Anwendungsfälle von Produktkonfiguratoren [16]. In diesem Markt konfigurieren bis zu 70 Prozent der Kaufinteressenten online ihr gewünschtes Fahrzeug vor einem Händlerbesuch. Dabei erhält das Thema Produktkonfiguration bisher insbesondere aus der betriebswirtschaftlichen Perspektive [17] und aus dem Kontext der Informatik [18] erhöhte Aufmerksamkeit. Trotzdem stellt die Angebotserstellung für Investitionsgüter immer noch einen hohen Kostenfaktor dar, bei einer vergleichsweise geringen Umwandlungsrate von 5-20 Prozent bei Industriegütern. Auch werden im Schnitt 3,5 Termine im Umfang von je 10 Stunden inklusive Vor-, Nachbereitung und Durchführung für eine Neukundengewinnung benötigt [19]. Hieraus lässt sich für die Automatisierung der Wissensarbeit bzw. des Engineerings ein wesentlicher Handlungsbedarf ableiten. [1, 20]

Die Automatisierung des Erstkontakts, des Vertriebs bzw. der Angebotserstellung mittels softwaregestützter Lösungen wie Konfiguratoren stellt ein hohes Rationalisierungspotential dar [1, 19]. Konfiguratoren sollen individuelle Kundenanforderungen in eine zielkriterienoptimale, konsistente Gesamtlösung umwandeln. Hierbei sollen alle erforderlichen Dokumente entlang der Auftragsabwicklung, wie beispielsweise Lastenhefte oder Angebotsdokumente, automatisiert generiert werden. Vorteile von Konfiguratoren sind eine Reduktion der Kosten bei steigender Kundenzufriedenheit durch die automatisierte Generierung konsistenter Angebote und somit durch eine schnellere Reaktion auf Kundenwünsche. Neben einer Steigerung der Angebotsqualität, kann gleichzeitig der Schulungsaufwand für die Vertriebsmitarbeiter reduziert werden. [9, 11, 14]

1.3 Vorgehensweise

Die Methoden der Wissensverarbeitung (MdW) sind von außen betrachtet in der Regel nicht sichtbar, fördern aber den Erfolg eines Produktes bzw. einer Dienstleistung maßgeblich. Ein gelungenes Zusammenspiel vieler einzelner Komponenten ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines

Produkts bzw. des Gesamtsystems [4]. Dabei tragen die MdW zur Entwicklungs- und Lerngeschwindigkeit sowie zur Performance bei. Aber ohne sinnvolle Geschäftsmodelle entlang eines Produkts oder Services schaffen die MdW keinen Mehrwert. Die Montage benötigt aktuell 15 bis 70 Prozent der Gesamtfertigungszeit, verursacht gleichzeitig mit 70 Prozent den größten Anteil der Kosten und bietet daher ein großes Optimierungspotential. [12, 21]

Daher erfolgt die wissensbasierte Optimierung des Engineerings am Beispiel der Grobplanung von Produktionsanlagen bzw. Automatisierungslösungen im Montageumfeld, siehe Bild 1. Hierzu werden in Kapitel 2 die erforderlichen Technologien und Konzepte aus dem Engineering erläutert. Diese Aufbereitung dient einerseits der Zugänglichkeit für den Leser und andererseits als Expertenwissen für die Architektur und Implementierung des wissensbasierten Konfigurationssystems. Gleichzeitig unterstreicht das Kapitel 2 den Handlungsbedarf für die durchgeführte Forschungstätigkeit.

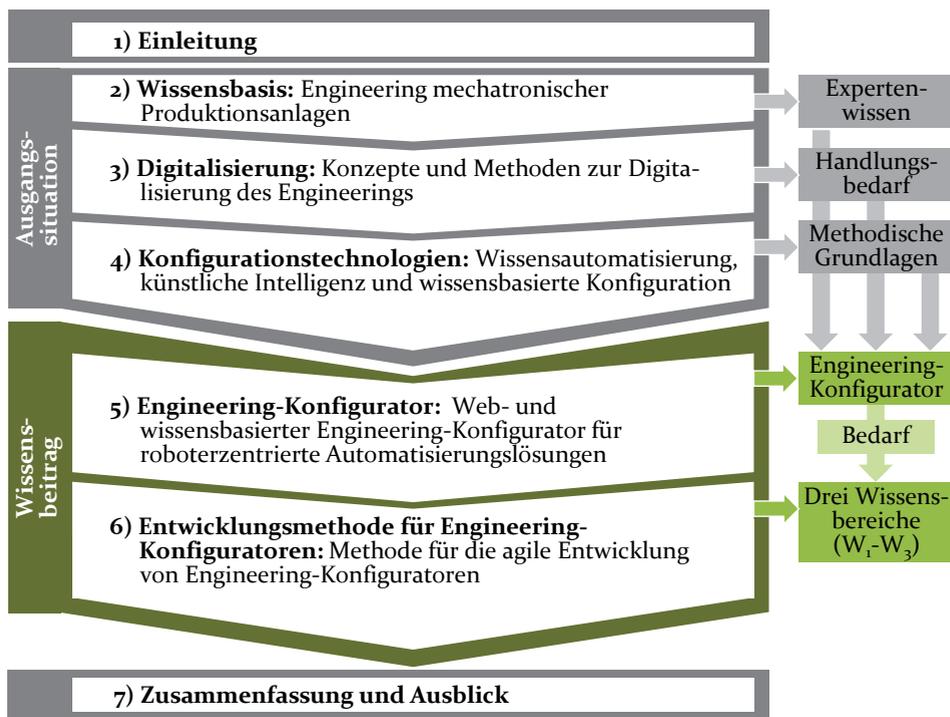


Bild 1: Vorgehensweise der Arbeit

Als Brücke zwischen dem Engineering-Expertenwissen in Kapitel 2 und der wissensbasierten Konfiguration in Kapitel 4 dient der Themenblock der Digitalisierung in Kapitel 3. Ausgehend von einer strategischen Perspektive

sowie daraus resultierenden Geschäftsmodellen werden notwendige Ansätze zur Entwicklung innovativer, digitaler Lösungen aufgezeigt. Hierauf aufbauend wird in Kapitel 4 erläutert, wie bestehende Prozesse und Lösungen mittels wissensbasierter Methoden und Systeme nachhaltig optimiert werden können und welche Grenzen bisher bestehen. Hieraus leitet sich der Lösungsansatz eines web- und wissensbasierten Engineering-Konfigurators in Kapitel 5 und die hierfür benötigte Entwicklungsmethode in Kapitel 6 ab. Kapitel 5 und 6 werden auf Basis der nachfolgenden primären Forschungsfrage strukturiert.

1.4 Forschungsfrage

Insbesondere bei Ansätzen zur Optimierung des Engineerings von Automatisierungslösungen besteht ein Handlungsbedarf. Auch die skalierbare, arbeitsteilige und vereinfachte Nutzbarmachung, Entwicklung und Wiederverwendung von Wissen zur „Massenproduktion“ des Wissensprodukts „Engineering-Lösung“ wird bisher nicht betrachtet. Hieraus leitet sich der primäre Handlungsbedarf sowie die zu beantwortende Forschungsfrage ab:

- 1) Kann das Engineering von roboterzentrierten Automatisierungslösungen vereinfacht und skalierbar optimiert werden?

Um die Forschungsfrage zu beantworten, wird der Engineering-Konfigurator (EK) für roboterzentrierte Automatisierungslösungen (RA) eingeführt, illustriert und validiert. Hierzu wird in Kapitel 5 dargelegt, wie mit Hilfe eines EK innerhalb eines Webplattformökosystems basierend auf Microservices (MS) die notwendige Kundenbasis geschaffen werden kann. Innerhalb dieses Webplattformökosystems stellen Konfiguratoren mögliche Microservices dar. Um wiederum die Entwicklung des EK feingranularer und arbeitsteiliger zu gestalten, werden in Kapitel 6 drei Wissensbereiche (W_1 - W_3) mit individuellen Teilmethoden definiert: das Wissen über den Anwendungsfall bzw. die Nutzer (W_1), die Best Practices als fallspezifisches Lösungswissen (W_2) und das generische bzw. logische Expertenwissen (W_3). Diese ermöglichen eine effiziente, skalierbare und agile Entwicklung von EK. Zusätzlich wird eine strukturierte Wiederverwendung der geschaffenen Wissens Elemente ermöglicht. Die Validierung der Methoden und Konzepte erfolgt im Rahmen von Teilprototypen sowie einer Gesamtvalidierung entlang der Webplattform ROBOTOP zur Grobplanung von RA.

2 Engineering automatisierter Produktionsanlagen

Das Engineering von Produktionsanlagen ist ein komplexes und in der Wissenschaft aus verschiedenen Perspektiven betrachtetes Forschungsfeld. Daher werden im Folgenden die im Kontext der Forschungsarbeit relevanten Themenbereiche vorgestellt.

2.1 Phasen des Fabrik- und Produktlebenszyklus

Nach WESTKÄMPER et al. [22] eignet sich der Fabrik- und der Produktlebenszyklus zur Einordnung der parallelen Aktivitäten der Produktentwicklung und Fabrikplanung. Mit jeder Phase der zwei Lebenszyklen wird der Reifegrad erhöht und das Wissen über den Bedarf, die benötigte, optimale Lösung und deren konkrete Umsetzung bis hin zum voll funktionsfähigen Produkt inklusive dessen Produktion gesteigert. Das Modell hilft, ebenfalls die Einbindung eines Systemintegrators entlang dieser beiden Zyklen besser einzuordnen, siehe Bild 2. [22, P1]

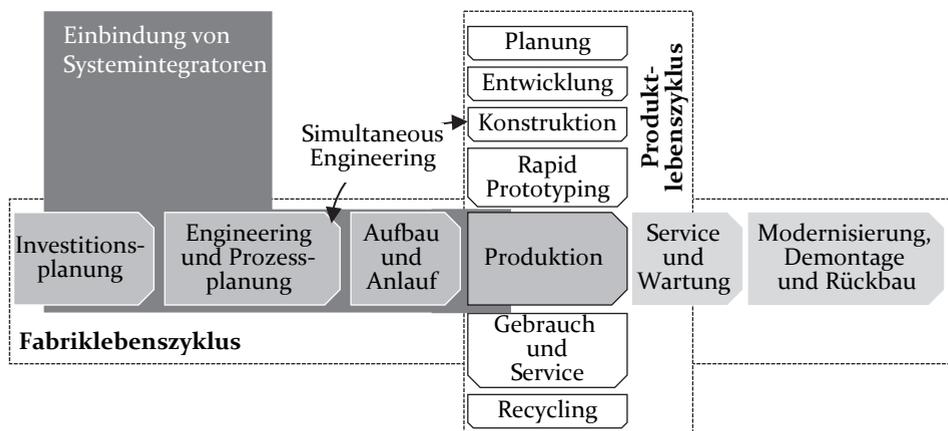


Bild 2: In der Phase der Produktion treffen Produkt- und Fabriklebenszyklus aufeinander [22] mit Erweiterung um die Einbindung des Systemintegrators nach [P1]

Im nachfolgenden Kapitel wird die Systemintegration von Produktionsanlagen betrachtet. Diese besitzt Schnittmengen zu den Phasen des Fabriklebenszyklus Phasen (Fabrik-Phasen) Investitionsplanung, Engineering, Prozessplanung, Aufbau und Anlauf sowie Produktion, siehe Bild 3.

2.1.1 Prozesse und Rollenverteilung bei der Systemintegration von Produktionsanlagen

Der spezifische Systemintegrationsprozess von Produktionsanlagen gliedert sich in sechs Phasen von der Klärung der Anforderungen des Kunden bzw. des produzierenden Unternehmens bis hin zur Inbetriebnahme und Produktion der Produkte, siehe Bild 3. [23–26]

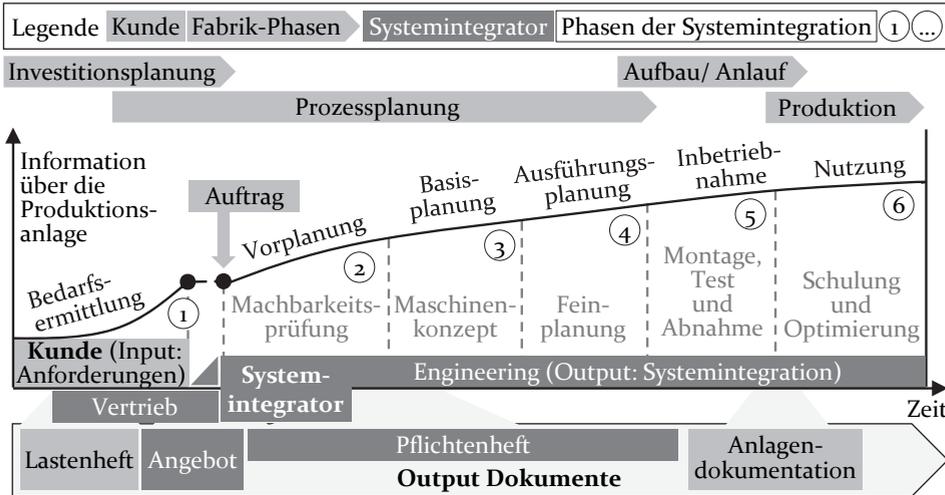


Bild 3: Geschäftsprozesse und Output Dokumente entlang der Systemintegration von Produktionsanlagen basierend auf dem Automatisierungsbedarfs eines Kunden [P1, 22, 27]

Mehrere relevante Rollen sind zu unterscheiden, nach [23–26, 28, 29]:

1. **Kunde:** Die erste Rolle ist das produzierende Unternehmen, im Folgenden „Kunde“ genannt. Dieser hat einen Automatisierungsbedarf, stellt die Anforderungen, bewertet die Produktionsanlage während der Entwicklung und integriert diese abschließend in die eigene Produktion.
2. **Systemintegrator:** Der „Systemintegrator“ ist ein Engineeringdienstleister, der den Kunden von der Konzepterstellung bis hin zur Übergabe und Wartung der Automatisierungslösung begleitet. Der Kunde besitzt die Herstellungsprozessexpertise des Produktes, der Systemintegrator die Expertise für die Realisierung von Automatisierungslösungen. Da Produktionsanlagen Investitionsgüter sind, wird die initiale Phase von der Erstellung des Lastenhefts, des Angebots bis hin zum Pflichtenheft vom Vertrieb des Systemintegrators begleitet. Nach Abschluss eines Kaufvertrags wird der Prozess

an das Engineering übergeben, was sich meist in Projektmanagement, Mechanik, Elektrik, Software und ggf. als extra Gewerk die Simulation bzw. übergreifend zwischen den Gewerken die Virtuelle Inbetriebnahme kurz VIBN aufteilt.

3. **Komponentenlieferanten:** Bei der Systemintegration werden einzelne Teiltechnologien von den „Komponentenlieferanten“ bereitgestellt und zu einer schlüsselfertigen Gesamtlösung integriert. Zulieferkomponenten sind beispielsweise Roboter, Endeffektoren, Steuerungen oder Sensoren. Insbesondere fehlende herstellerübergreifende Standards sowie kundenindividuelle Lösungen führen zu einem erhöhten Engineeringaufwand.

2.1.2 Reifegrade von Technologien und Systemlösungen

Zur Einordnung von Technologien und Systemlösungen anhand ihres Reifegrades kann das Konzept des Technologie-Fähigkeitsniveaus (engl. Technology Readiness Level), kurz TRL, auf industrielle Applikationen übertragen werden, siehe Bild 4. TRL 1 charakterisiert sich dadurch, dass eine erste Idee für ein Konzept, beispielsweise auf Basis einer physikalischen Beobachtung, vorhanden ist. Nach Stufe TRL 2 sind die Marktfähigkeit theoretisch abgeschätzt sowie das konkrete Funktionsprinzip beschrieben. Im Rahmen von TRL 3 ist ein einfacher Versuchsaufbau umgesetzt, das Funktionsprinzip ist experimentell nachgewiesen und eine Patentrecherche ist erfolgt. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie von TRL 4 ist ein Versuchsaufbau vorhanden, wobei die kritischen Funktionen integriert sind. Auch werden in dieser Stufe der Entwicklungsplan und der Marktzugang definiert. Über den Labordemonstrator auf Stufe TRL 5 wird ein repräsentabler Demonstrator aufgebaut, welcher alle definierten Funktionen aufweist. Der Messedemonstrator auf Stufe TRL 6 ist auf Fachmessen vorzeigbar und erreicht einen Teil der wirtschaftlichen Performanzkenngrößen wie z. B. Autonomiezeit oder Taktzeit. TRL 7 validiert das System und dessen Wechselwirkungen in einer realen Produktion entlang eines zeitlich begrenzten Piloteinsatzes. Dabei wird das System von einem Technologen betreut, bis es die vom Kunden geforderte Zuverlässigkeit erreicht. Mit TRL 8 ist eine erste Kundenapplikation als Referenzanwendung realisiert, ohne dass eine ständige, betriebsbegleitende Betreuung durch einen Technologen erforderlich ist. [30, 31]

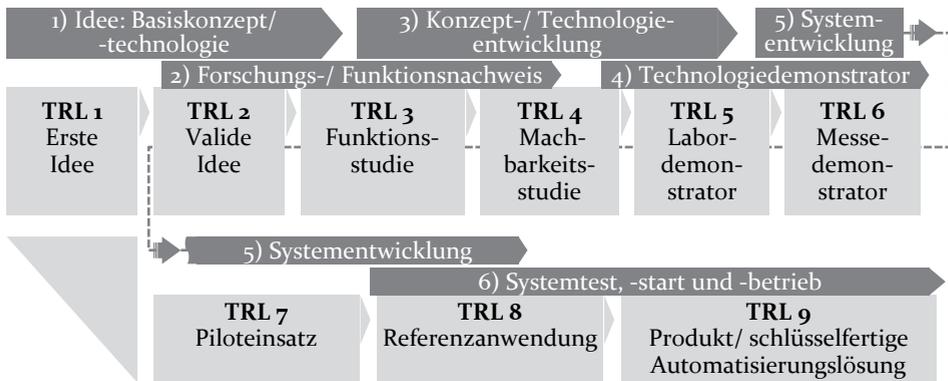


Bild 4: Reifegrad von Produkten bzw. Ressourcen in Anlehnung an das „Technology Readiness Level“ (TRL), Ursprung aus der Raumfahrt [30, 31]

Die letzte Stufe ist mit TRL 9 ein am Markt erprobtes Produkt bzw. eine schlüsselfertige Automatisierungslösung. Die Qualifizierung des Systems ist über einen längeren erfolgreichen Einsatz nachgewiesen. Die verwendeten Module und durchzuführenden Engineeringprozesse sind standardisiert. Mit jedem erreichten Level steigen die Kosten, um ein höheres TRL-Niveau zu erreichen. Für die Konfiguration sind Subsysteme wie z. B. Roboter oder Endeffektoren auf TRL 9 sinnvoll. Der Reifegrad einer Systemlösung, wie einer roboterzentrierten Produktionsanlage, erreicht hingegen nur TRL 9 im Fall einer bereits umgesetzten Automatisierungslösung (Best Practice). Bei der Konfiguration von Grobkonzepten für den Vertriebsprozess wird ein Systemkonzept auf TRL 3-5 angestrebt. [30, 31]

2.2 Vertriebsprozess von Produktionsanlagen und relevante Industrieroboterperipherie

Die Planung von Produktionsanlagen ist eine Teilaufgabe in der Fabrikplanung. Die Planungsgrundfälle lassen sich vom Neubau (Greenfield-Projekte) eines Industriebetriebs, die Um- oder Neugestaltung von bestehenden Fertigungskomplexen, bis hin zur Erweiterung und dem Rückbau einteilen (Brownfield-Projekte). Abhängig von der Phase existieren unterschiedlich detaillierte Erfahrungswerte, Anforderungen und Rahmenbedingungen zur Planung des Bausteins „Produktionsanlage“. Häufig, quasi synonym verwendete Begrifflichkeiten sind unter anderem technische Anlage oder Produktionssystem. Um eine präzise Abgrenzung zu dem Toyota-Produktionssystem als übergreifende Systematik zu gewährleisten, wird im Folgenden der Begriff Produktionsanlage verwendet. [24, 31, 32]

Definition Produktionsanlage

Produktionsanlage: „Eine materialflussintensive Produktionsanlage umfasst alle Betriebsmittel, die der Stoffumwandlung und Stoffumformung sowie der Materialbearbeitung für einen spezifizierten Prozess dienen. Durch eine Vielzahl von Transporteinrichtungen wird die Verteilung zahlreicher, stofflicher Güter innerhalb bestimmter, festgelegter Produktionsbereiche gewährleistet und kann durch Stau, Speicherung, Pufferung sowie Lagerung unterbrochen werden. Die Überwachung, Steuerung und Regelung dieser zielgerichteten Transport- und Verarbeitungsvorgänge wird über ein umfassendes informationstechnisches System gewährleistet.“ [32, S. 15]

Die Planungsaufgabe von Produktionsanlagen besitzt einen interdisziplinären Charakter, hervorgerufen durch die Komplexität der Aufgabe und die Heterogenität der involvierten Fachdisziplinen. Die Absicherung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit der Systeme stellt die zentrale Forderung und zugleich eine Herausforderung im Kontext der Digitalisierung dar. [24, 31]

2.2.1 Vertriebsprozess von Produktionsanlagen

Der Akquiseprozess von neuen Aufträgen stellt aus Sicht der Überlebensfähigkeit eines Unternehmens eine der Schlüsselaufgaben dar und genießt deshalb eine hohe Sichtbarkeit bei der Unternehmensleitung und dem oberen Management. Daher bietet der Vertriebsprozess die optimale Basis zur Einführung durchgängiger Engineeringkonzepte, da zum einen eine hohe Investitionsbereitschaft besteht, zum anderen die Kundenanforderungen erstmals aufgenommen und die weiteren Rahmenbedingungen festgelegt werden. Der Vertriebsprozess von Investitionsgütern beginnt durch die Initialisierung des Kontakts durch eine Kundenanfrage oder initiiert durch einen Vertriebsmitarbeiter. Danach folgen die Phasen der Anfragebewertung und Angebotsbearbeitung. Der Kunde gibt bei der Anfrage die Lösung vor oder spezifiziert die Anforderungen über eine Zielstellung. Die Form und Qualität der Anfrage kann je nach Kunde, Branche und Unternehmensgröße sehr unterschiedlich ausfallen, siehe Bild 5. [1, 24, 31, 33]

(1) Die Anfragebewertung (Ja- oder Nein-Entscheidung) erfolgt nach den Kriterien Auftragswahrscheinlichkeit, -volumen, Ertragsaussichten, langfristige Kundenbeziehung bzw. -relevanz, eigener Kompetenz, Wettbewerbsfähigkeit sowie Lieferfähigkeit und -kapazität.

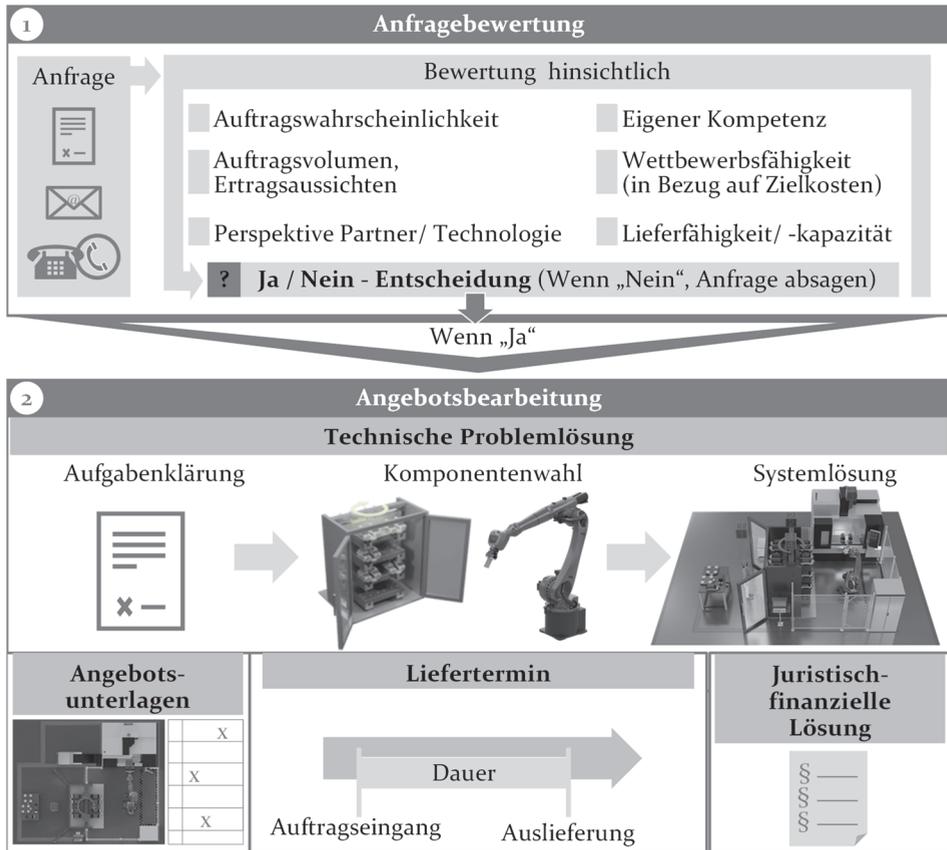


Bild 5: Ablauf und Bestandteile der Angebotsklärung entlang der Systemintegration im Sondermaschinenbau [1, 31, 33]

(2) Phasen der Angebotsbearbeitung: Die technische Problemlösung beinhaltet die Aufgabenklärung, die Bestimmung der technologischen Verfahrenskette sowie die der Leistungsanforderungen. Basierend auf dem festgelegten Materialfluss, dem Strukturplan und der Komponentenauswahl wird die Systemlösung als Teil der Detailplanung erarbeitet. Bei der Preiskalkulation für Neukonstruktionen besteht eine hohe Unsicherheit, wohingegen bei dem Zusammenbau aus bereits entwickelten Modulen eine Abschätzung der Preise auf Basis historischer Erfahrungswerte möglich ist. Anhand der Liefertermine der Zukaufteile und verfügbaren Kapazitäten wird der Liefertermin bestimmt, welcher die Zeitdauer zwischen Auftragsingang und Auslieferung darstellt. Abschließend erfolgt die Generierung der Angebots- bzw. Ergebnisunterlagen in Form einer kundenindividuellen Aggregation der Teilinformationen wie z. B. Stückliste [engl. bill of material kurz (BOM)], Aufstellplan und Visualisierung der Produktionsanlage.

Mittels juristisch-finanzieller Problemlösung werden Details des Vertrages, wie zu erbringende Leistungskriterien, Liefertermine, Zahlungsmodalitäten oder notwendige Bürgschaften, abgesichert.

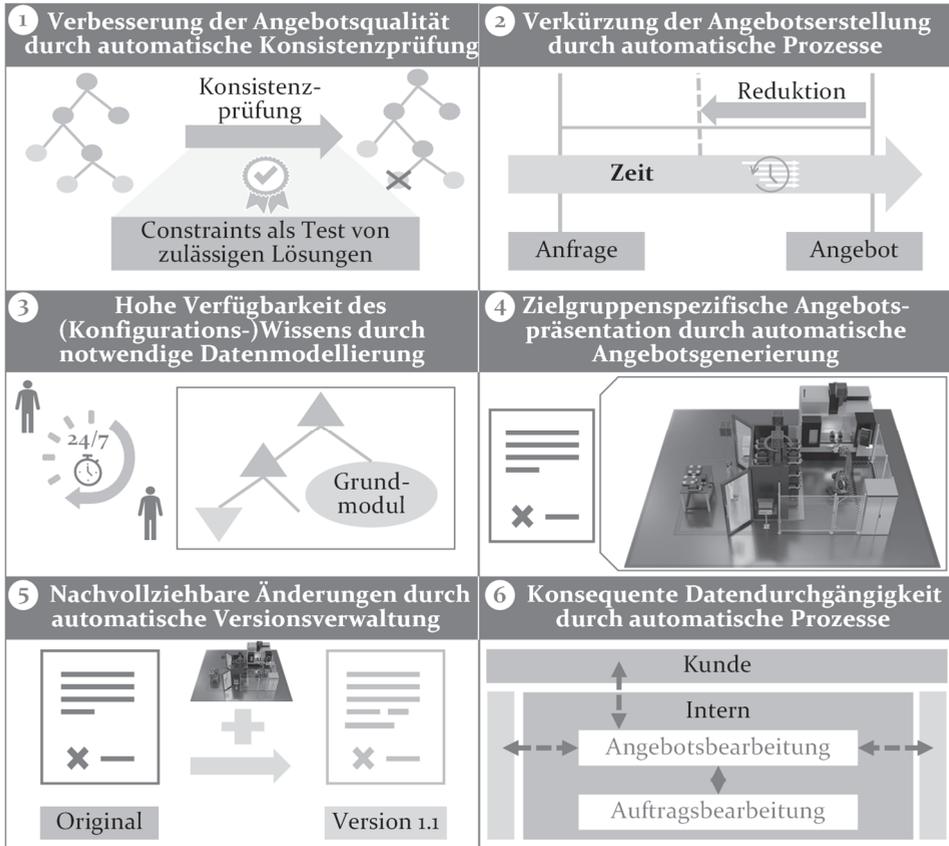


Bild 6: Vorteile einer automatisierten, IT-basierten Angebotserstellung [1, 31, 34]

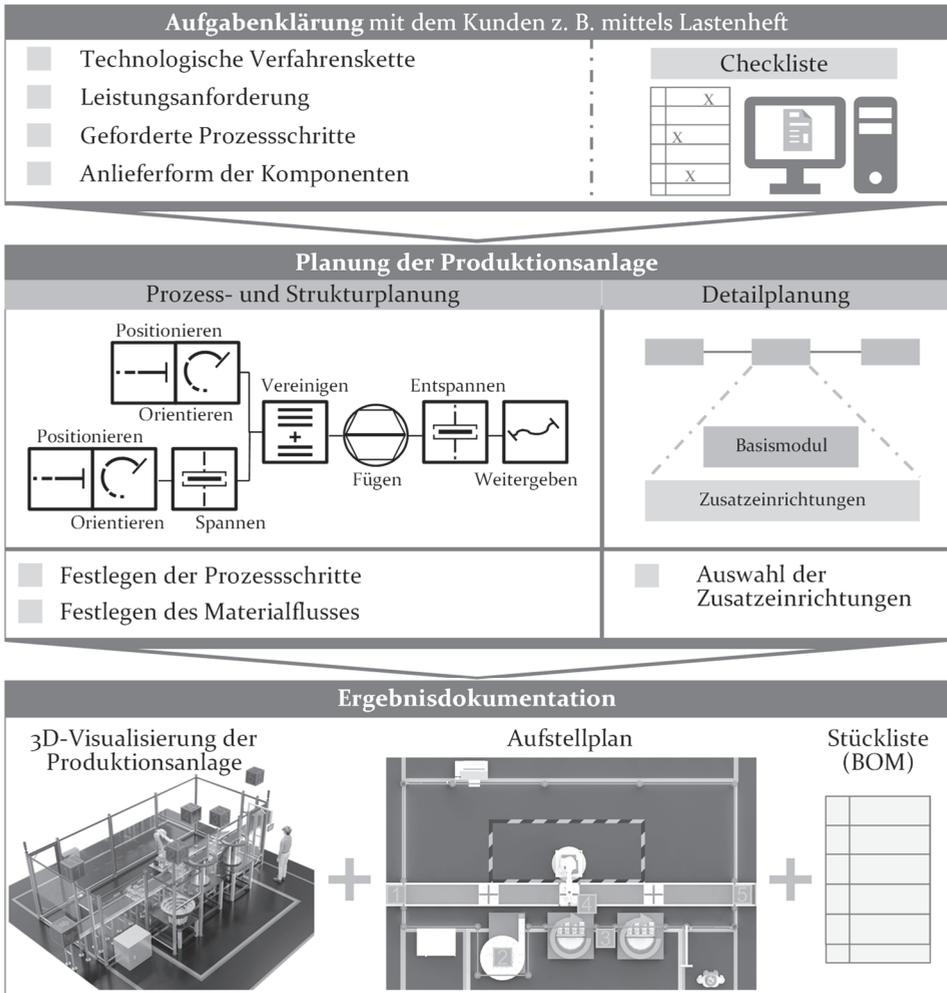
Eine Optimierung des Vertriebsprozesses und der Angebotsbearbeitung ist mittels ablauf- und aufbauorganisatorischer Maßnahmen sowie datenverarbeitender-technischer Lösungen möglich. Für die Erstellung von Angebotsunterlagen werden aus unterschiedlichen Fachbereichen Informationen benötigt. Der Vertrieb ist für die Marktbeobachtung, Akquise, Angebotsabstimmung und Auftragsverfolgung zuständig. Der Einkauf bestimmt, wann und zu welchen Kosten die Zukaufteile bereitgestellt werden können, die Fertigung, wann auf Basis der Kapazitäten der frühestmögliche Fertigungstermin ist, und das Rechnungswesen, welche Kosten entstehen. Auch für die Produktentwicklung werden Informationen durch den Vertrieb über den Einsatzbereich und den Bedarf von Anpassungen an den

Produkten erhoben, um den Marktanforderungen besser zu entsprechen. Die Vorteile der automatisierten Angebotserstellung mittels Informationstechnologie werden in Bild 6 zusammenfassend dargestellt. Durch die Interdisziplinarität und Komplexität bei der Planung von Produktionsanlagen, und damit auch bei roboterzentrierten Automatisierungslösungen, ist ein Einsatz von Konfiguratoren sinnvoll, siehe Kapitel 4.1. Die technische Konsistenzprüfung, also das Vermeiden von Fehlern bei der Projektierung, das automatische Berücksichtigen neuer Technologien z. B. durch die Integration neuer Konfigurationsmodule, das Prüfen der Adäquanz der Anforderungen und der Vergleich alternativer Lösungen, bieten großes Potential, um die Kundenanforderungen kostenoptimal zu erfüllen. [1, 24, 31, 33]

2.2.2 Auftragsspezifische Entwicklung

Die auftragsspezifische Entwicklung ist ein geeigneter Referenzprozess, bei dem Teilaufgaben durch Konfiguration gelöst werden können. Generell gliedert sich diese in die drei Phasen, Aufgabenklärung mit dem Kunden, Planung der Produktionsanlage durch die Fachabteilungen und Erstellung der Ergebnisdokumentation des Planungsprozesses, siehe Bild 7. [31, 33]

In der ersten Phase sind die Kundenanforderungen zu präzisieren, indem die aktuellen und geplanten Produktionsschritte analysiert werden. Dies gibt Aufschluss darüber, welche Schritte ein hohes wirtschaftliches Automatisierungspotential aufweisen und welche Prozessanforderungen zu erfüllen sind. Insbesondere die Leistungsanforderungen, die räumlichen Gegebenheiten und technologischen Verfahrensketten geben die wesentlichen Anforderungen vor. Diese werden kundenseitig mit einem Lastenheft gefordert und über ein Pflichtenheft seitens des Systemintegrators konkretisiert. Basierend auf diesen Anforderungen, die als relevante Eingabeparameter für die Konfiguration dienen, folgt die Prozess- und Strukturplanung sowie die Auswahl der notwendigen technischen Module.



2.2.3 Industrieroboterperipherie

Unter Peripherie wird das Umfeld eines Industrieroboterarbeitsplatzes verstanden, mit dem Roboter als zentralem Element. Diese Perspektive dient als struktureller Rahmen, da über den Roboter die meisten Einrichtungen miteinander in Verbindung stehen. Auch ist zusätzliche Peripherie erforderlich, um den Roboter wirtschaftlich sinnvoll im industriellen Umfeld nutzen zu können. Diese kann in drei Klassen eingeteilt werden: (1) Bestandteile eines Industrieroboters, (2) Einrichtungen erster Ordnung, die direkt mit dem Roboter in Wechselwirkung stehen, und (3) Einrichtungen zweiter Ordnung, welche als vor- oder nachbereitende Funktionen benötigt werden, siehe Bild 8. [36]

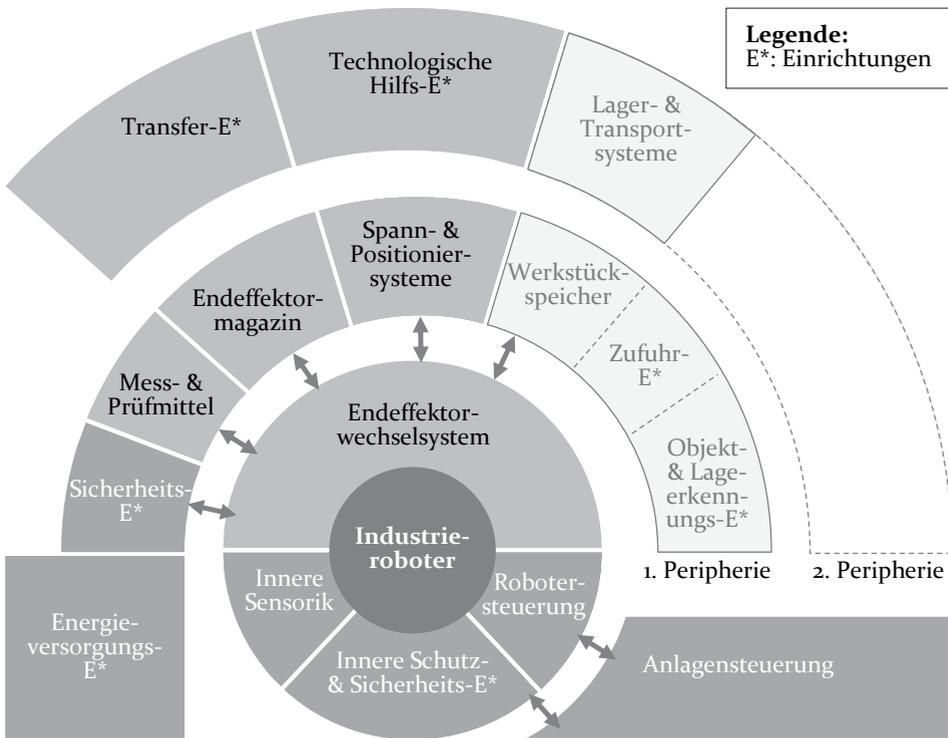


Bild 8: Notwendige Peripheriekomponenten zum effektiven Einsatz eines Industrieroboters im industriellen Umfeld [36]

Speichereinrichtungen werden für die vorübergehende Aufbewahrung des Handhabungsgutes in der Nähe des Arbeitsplatzes benötigt, wie z. B. Endeffektoren oder Magazine für Arbeitsgegenstände. Gegebenenfalls sind auch Prüfmittel in gewissen Intervallen vom Roboter zum Kalibrieren erforderlich. Die Zufuhreinrichtungen stellen automatisch Werkstücke für

die Roboterzelle bereit, geben diese weiter und führen diese ab, wie beispielsweise Bauelemente, Baugruppen oder die Montagebasis. Zur Identifizierung und Positionsbestimmung von ungeordnetem Handhabungsgut werden Objekt- und Lageerkennungssysteme benötigt. Diese können z. B. 2D-, 3D-Kamerasysteme oder pneumatische Sensoren sein. Einrichtungen zur Qualitätssicherung sind notwendig, um im automatischen Betrieb die Arbeitsergebnisse zu kontrollieren und zu dokumentieren. Beim Schweißen, Bohren, Fräsen, Entgraten und anderen Prozessen mit hohen Genauigkeitsanforderungen und wirkenden Kräften werden Positionier- und Spannsysteme erforderlich, um einen kontrollierten Ablauf sicherzustellen. Werkzeugsprüheinrichtungen oder -reinigungsvorrichtungen gehören zu den technologischen Hilfseinrichtungen. Über Sicherheitssysteme muss eine Gefahr für Personen ausgeschlossen werden. Dies kann durch eine Trennung des Arbeitsraums von Roboter und Mensch mittels Schutzzäunen oder eine Absicherung der notwendigen Interaktionsbereiche durch Sensoren, wie z. B. über Lichtschranken, erfolgen. Zu der zweiten Peripheriegruppe gehören Umschlag-, Transfer- und Transporteinrichtungen, sowie fahrerlose Flurförderzeuge oder Palettenwechselsysteme. Die vereinfachte Darstellung aus Bild 8 legt die Komplexität von roboterzentrierten Produktionsanlagen bzw. Automatisierungslösungen dar. [36, P2]

2.3 Maßnahmen zur Komplexitätsreduktion

Um die steigende Komplexität zu beherrschen und zu reduzieren, existieren etablierte Maßnahmen, wie die Modularisierung. Die Modularisierung unterstützt die Strukturierung und Vereinfachung von Systemen. Dies geschieht über Subsysteme, die an vordefinierten Schnittstellen koppel- und trennbar, aber voneinander unabhängig sind. Während sich Standardisierung und Normung primär mit dem Festlegen bzw. Konstanthalten beschäftigen, fokussiert sich die Modularisierung auf funktional und physisch trennbare Einheiten. Erfolgreiche, standardisierte Module können in die Normung überführt werden und bieten eine etablierte, nutzbare und standardisierte Struktur für alle am Markt beteiligten Akteure und die Konfiguration. Zur Verdeutlichung, weshalb eine Komplexitätsreduzierung notwendig ist, dient folgendes Beispiel: Zur Berechnung des Lösungsraums eines Konfigurationsproblems z. B. zur Planung einer Produktionsanlage, kann die Kombinatorik verwendet werden, siehe Beispiel in Formel 1. Der potentielle Lösungsraum einer Produktionsanlage bei einer vollumfänglichen Kombination von allen Modulen miteinander wie z. B. Roboter, Adapter, Endeffektoren usw., kann ohne die Verwendung von weiterem einschränkenden Expertenwissen, (wie ein Endeffektor ist meist nur am

Flansch eines Roboters sinnvoll) sehr groß sein. Einschränkendes Expertenwissen dahingehend, welche Module und Schnittstellen miteinander kombiniert werden können bzw. technisch sinnvolle Lösungen ergeben, z. B. mittels Constraints bei der Konfiguration, kann die Lösungskomplexität reduzieren, siehe Kapitel 4.4. [3, 9, 37, 38]

Formel 1: Komplexitätsberechnung von kombinatorischen Konfigurationsproblemen über die Anzahl der Objekte bzw. Module und Schnittstellen [37]

$$\text{Anzahl} = \sum_{i=1}^n (n^i \cdot m^{i-1}) = n \cdot \frac{(n \cdot m)^n - 1}{n \cdot m - 1} \quad (1)$$

n: Anzahl der Konfigurationsobjekte/ -module
m: Anzahl der Schnittstellen zwischen den Objekten

Bereits für zehn verschiedene Konfigurationsobjekte ($n = 10$), wie z. B. Roboter, Adapter und Endeffektoren sowie weitere Module, und fünf zulässige Schnittstellen ($m = 5$) ergeben sich theoretisch 19,93 Milliarden (10^{15}) kombinatorische Konfigurationsmöglichkeiten. Durch Expertenwissen wird der Lösungsraum weiter eingeschränkt, siehe Bild 9. Diese Beispiele zeigen die Notwendigkeit, durch die Modularisierung und Standardisierung die Anzahl der Komponenten und Schnittstellen zu reduzieren.

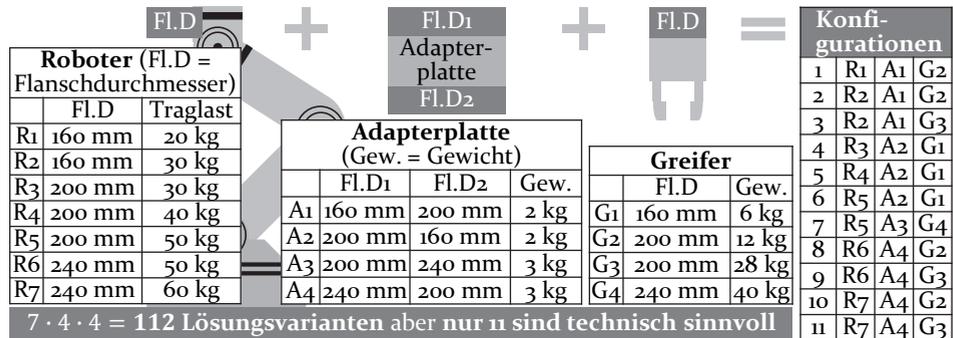


Bild 9: Mögliche und technisch sinnvolle Lösungsvarianten in Abhängigkeit von der Anzahl der Objekte, wie z. B. Roboter, Adapterplatte und Greifer sowie deren Ausprägungen

2.3.1 Module und Modularisierung

Zur effizienten Wiederverwendung von bestehenden Wissensartefakten, wie für die Konfiguration technisch komplexer Systeme, stellt ein modularer Aufbau eine notwendige Vorbedingung dar. Die Modularisierung ist der Prozess hin zu geeigneten, nutzbaren Modulen. Dabei wird das Ziel verfolgt, bei reduziertem Aufwand und Risiko im Variantenmanagement so-

wie Engineering eine hohe Endproduktvielfalt mit kundenspezifischen Lösungen bereitzustellen. Auch ist durch eine Modularisierung eine bessere Arbeitsteilung in Unternehmen möglich. [1, 9, 24]

Definition Modul und Modularisierung
<p>Modul: "Ein Modul ist eine funktional und physisch beschreibbare Einheit, die unabhängig von den restlichen Modulen entwickelt, gefertigt und geprüft werden kann. Aufgrund einer oder mehrerer standardisierter Schnittstellen können Module flexibel kombiniert oder durch andere Module ersetzt werden." [9, S. 92]</p>
<p>Modularisierung: "Die Modularisierung beschreibt die geeignete Gliederung eines Produktes, indem die Abhängigkeiten zwischen den Elementen (Modulen) verringert bzw. die Schnittstellenvarianten reduziert werden." [9, S. 94]</p>

SCHUH et al. [9] unterscheiden sechs Arten der Modularität, siehe Bild 10. Durch höhere Stückzahlen von Gleichteilen können Skaleneffekte bei der Produktion sowie der Wissensarbeit erschlossen und damit die Kosten reduziert werden. Die Misch-Modularität ist schnittstellenunabhängig, wie z. B. bei Flüssigkeiten. Für die Konfiguration sind besonders die Aspekte 1-4 relevant: Der passende Zuschnitt von Zwischenteilen, wie von Halbzeugen, die Austausch- bzw. Bus-Modularität über den Wechsel und Anbau an zuvor definierte Adapter sowie die Teil-Modularität als Baustein-Prinzip für vorab nicht festgelegte Lösungen über standardisierte Schnittstellen. [9, 39]

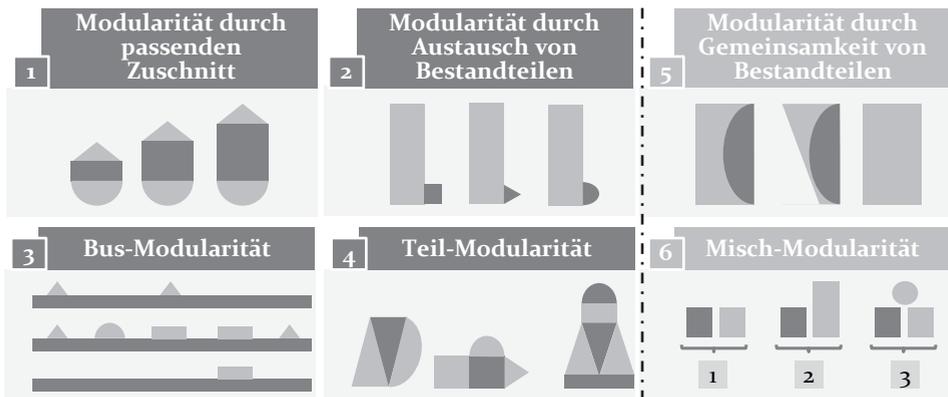


Bild 10: Sechs Arten der Modularität zur Erhöhung der Anzahl von Gleichteilen und Erschließung von Skaleneffekten für kosteneffiziente Lösungen [9, 39]

2.3.2 Baukastensystem

Baukastensysteme bieten den Konzeptvorteil einer einfachen Variantenbildung und ermöglichen somit das bessere Ausnutzen von Skaleneffekten.

Daneben verursacht ein modularer Aufbau Zusatzkosten, bedingt durch eine erforderliche Überdimensionierung partiell überflüssiger Funktionen und Schnittstellen. Die Systematisierung einzelner Funktionen und Komponenten ist notwendig, um die Kundenanforderungen möglichst umfassend mit einer geringen Anzahl an Modulen abdecken zu können. Dennoch ist Modularität erst ab einer gewissen Stückzahl wirtschaftlich sinnvoll. Eine Standardisierung von Schnittstellen und Funktionen über Produktfamilien hinweg kann die Kostenvorteile maximieren. Um die Marktflexibilität zu optimieren sowie die interne Komplexität und Kosten für die Entwicklung zu minimieren, werden Baukastensysteme eingesetzt. Der Modulare Querbaukasten (MQB) des Automobilherstellers Volkswagen ist eines der umfassendsten Baukastensysteme. [9, 24]

Definition Baukastensystem

"Baukastensysteme bestehen aus Bausteinen (Module), bei denen es sich um Baugruppen oder Bauteile handeln kann. Durch die Definition standardisierter Schnittstellen ist eine vielfältige Kombinierbarkeit möglich, sodass eine Vielzahl an Varianten effizient erzeugt werden kann." [9, S. 97]

Ein systematischer Prozess und eine nachhaltige Umsetzung stellen für ein Baukastensystem die wesentlichen Erfolgsfaktoren dar. Nach der Funktion können Grund-, Hilfs-, Sonder- und Anpassbausteine unterschieden werden, siehe Bild 11. Eine spezifische Zusammenstellung von Baukastenmodulen wird auch als Konfiguration bezeichnet. [9, 24, 40, 41]

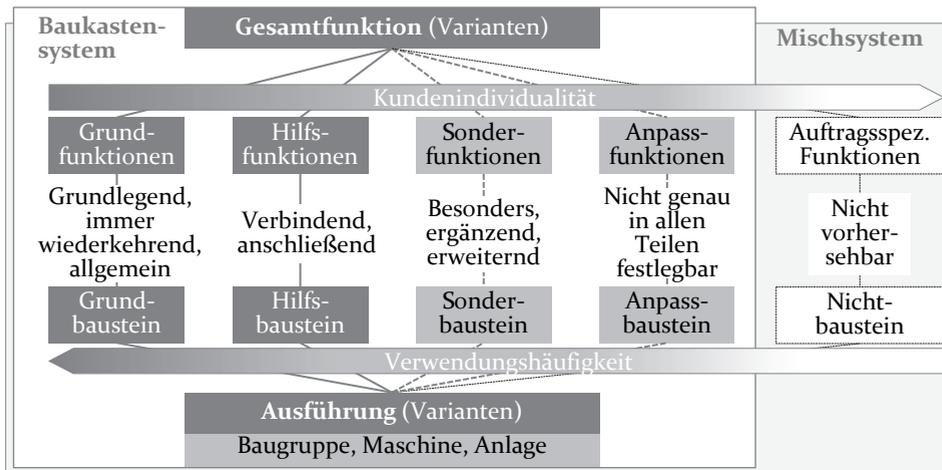


Bild 11: Systematik zur Untergliederung eines Baukastens in mehrere Modulkategorien anhand der Verwendungshäufigkeit und Kundenindividualität [24, 40]

2.4 Model-Based Systems Engineering mechatronischer Produktionsanlagen

Die rechnergestützte Planung und Konfiguration von mechatronischen, Produktionsanlagen erfordert eine abstrahierte und allgemeingültige Aufbereitung von Planungselementen. [28]

Model-Based Systems Engineering

„Model-Based Systems Engineering (MBSE) liefert Werkzeuge mit denen das Systemdenken ermöglicht wird. Innerhalb der Produktentwicklung werden viele Modelle erstellt, die einem unterschiedlichen Modellierungszweck dienen.“ [42, S. 22]

Hierfür sind domänenspezifische Modelle notwendig. Diese lassen sich in die Abstraktionsebenen topologische, physikalische, mathematische und numerische Modelle einordnen, wobei je Ebene feingranularere Aspekte berücksichtigt werden, siehe Bild 12. Für die Konfiguration von Grobkonzepten ist die Genauigkeit von topologischen Modellen ausreichend, da auf dieser Ebene Anordnungen, Module, Baugruppen, einfache Kinematik und Dynamik sowie grundlegende mechatronische Aspekte berücksichtigt werden. Das vereinfachte topologische Modell stellt die Basis für die detaillierten Modelle dar und kann nach den Anforderungen punktuell angereichert werden. [28]

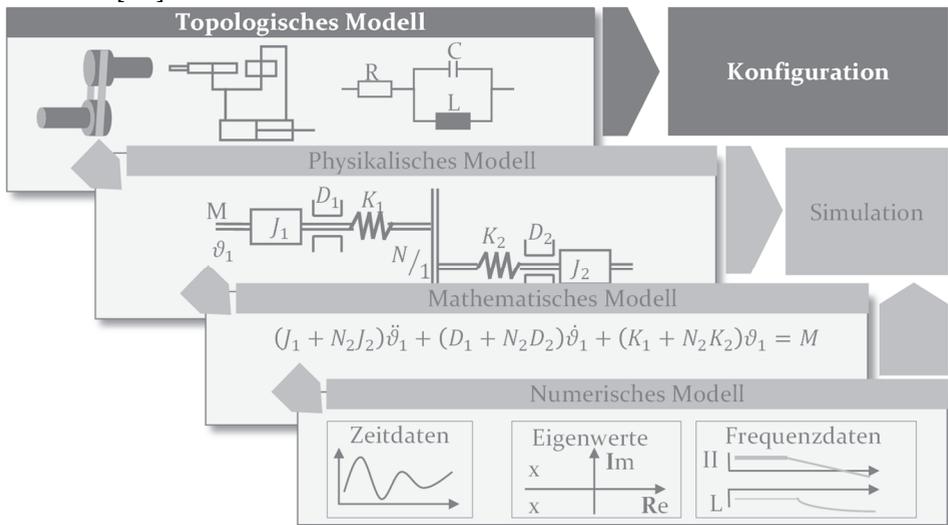


Bild 12: Modellabstraktionsebenen von mechatronischen Systemen, mit topologischen Modellen als für die Konfiguration primär relevante Abstraktionsebene [28, 43]

Im Folgenden werden relevante topologische Modelle adressiert. Diese können entlang der Entstehung einer Produktionsanlage mittels des Produkt-, Prozess- und Ressourcen-(PPR-)Modells [44] strukturiert werden.

Zur Hierarchisierung von mechatronischen Ressourcen können diese mittels Ebenenstruktur geordnet werden. Das Schnittstellendiagramm kann verwendet werden, um die Abhängigkeit zwischen den Ressourcen systematisch und herstellerunabhängig abzubilden, siehe Kapitel 2.4.4. Um Ressourcen abstrahiert und wiederverwendbar zu beschreiben, kann das Konzept der Fähigkeiten herangezogen werden, siehe Kapitel 2.4.5.

2.4.1 Modelle, Systemmodelle und Sichten

Die Herausforderung bei der Modellbildung ist, den Gesamtkontext auf die für die Interessengruppen relevanten Kenngrößen zu reduzieren und verständlich darzustellen. Das gewählte Modell sollte dabei die Zusammenhänge möglichst einfach darstellen, ohne dass relevante Informationen verloren gehen oder vernachlässigt werden. [45]

Verwendung Modelle
„Immer dort, wo Zusammenhänge nicht offensichtlich oder sehr komplex sind und wo entsprechend ein solides Verständnis nicht einfach vorausgesetzt werden kann, sondern zum Gegenstand einer expliziten Reflexion, Orientierung oder Auseinandersetzung werden soll, werden Modelle entwickelt; das ist der Fall etwa beim Zeichnen von Klosterplänen, bei der Herstellung von Landkarten oder beim Bau von Planetenmodellen. Modelle haben keinen Selbstzweck, sondern dienen der Simulation und dem besseren Verstehen von Wirklichkeiten. Sie unterstützen die Antizipation oder Rekonstruktion von möglichen Entwicklungen durch gezieltes Abstrahieren und Vereinfachen und stehen damit im Dienst der Stärkung der Vorstellungskraft.“ [45, S. 28]

Systemmodelle stellen eine ganzheitliche, n-dimensionale Abstraktion der Realität dar und können mit zielgruppenspezifischen Teilsichten für einzelne Fachgebiete, wie Vertrieb, Einkauf, Entwicklung, Projektmanagement und weitere nutzbar gemacht werden, siehe Bild 13. [46, 47]

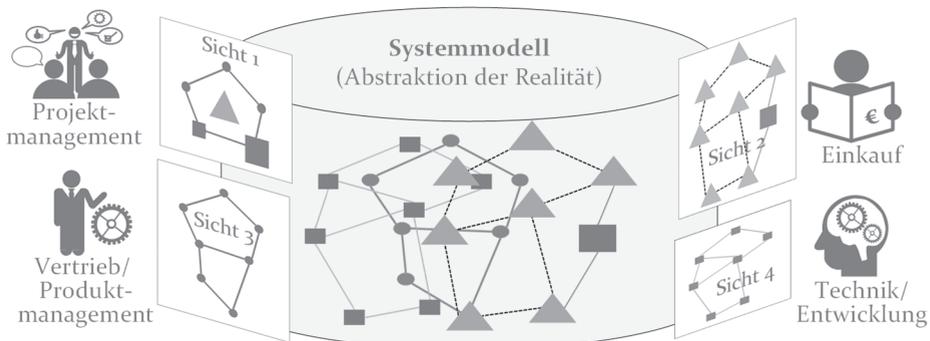


Bild 13: Systemmodelle, als ganzheitliche Abstraktion der Realität, können mit zielgruppen spezifischen Teilsichten für einzelne Fachgebiete nutzbar gemacht werden [46, 47]

Der Schwierigkeitsgrad bei der Lösung eines Problems hängt vom gewählten Bezugssystem bzw. -modell ab. Um geeignete Bezugssysteme für das Engineering zu wählen, werden im Folgenden etablierte Modelle und Konzepte vorgestellt.

2.4.2 Produkt-, Prozess- und Ressourcen- (PPR-) Modell

Nach FELDMANN et al. eignet sich das PPR-Modell gut zur Beschreibung des Informationsbedarfs von Produktionsanlagen für die computergestützte Planung [44]. Dieses wurde erstmals 1996 von STEINWASSER beschrieben [48]. Basierend auf einem zu fertigenden Produkt werden die erforderlichen (Fertigungs-)Prozesse abgeleitet, welche in einem Prozess- und Arbeitsplan kondensiert werden, siehe Bild 14. Anhand der sequentiellen Arbeitsschritte bzw. Operationen werden diesen Ressourcen, wie z. B. eine Roboterzelle, für die Montage zugeordnet. Insbesondere an den Schnittstellen zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen ergeben sich für die Planung relevante Parameter. [44, 48, 49]

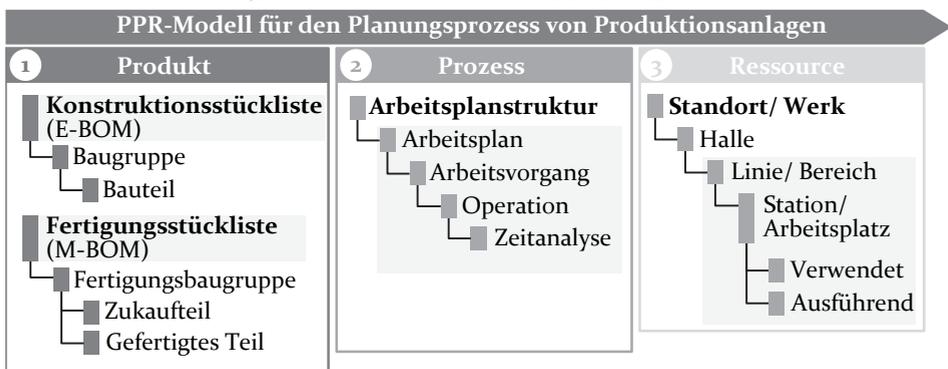


Bild 14: PPR-Modell zur Planung von Produktionsanlagen und zur Beschreibung des Informationsbedarfs für die rechnergestützte Planung [44, 48–50]

Eine Stückliste ist eine Auflistung oder Beschreibung von Rohstoffen und Komponenten, aus denen sich ein Produkt zusammensetzt, inklusive der jeweils notwendigen Mengenangaben. In Abhängigkeit vom Verwendungszweck wird das Produkt in zielgruppenspezifische Stücklisten aufbereitet. Die Konstruktionsstückliste (engl. Engineering-BOM kurz (E-BOM)) enthält alle für die Entwicklung und die Fertigungsstückliste (engl. Manufacturing-BOM kurz (M-BOM)) alle für die Herstellung relevanten Teilinformationen. Die E-BOM wird vom Konstrukteur zur Darstellung der entworfenen Produktstruktur verwendet. Unter Berücksichtigung der Montagereihenfolge und -bedingungen wird aus dieser die M-BOM abge-

leitet. Für die Planung eines Produktionssystems können hieraus die relevanten Parameter von Prozessschritten, sowie der involvierten Werkstücke bzw. Komponenten entnommen werden. [50, 51]

2.4.3 Modulare Ebenenstruktur mechatronischer Systeme

Moderne Produktionsanlagen bestehen aus mechanischen, elektronischen und softwaretechnischen Bestandteilen und sind somit mechatronische Systeme. Um eine effiziente Wiederverwendbarkeit von mechatronischen Systemen und Baugruppen entlang eines Konfigurators zu gewährleisten, ist es sinnvoll, diese in verschiedene Ebenen zu clustern, siehe Bild 15. Die kleinste Einheit (B₁) sind Subkomponenten, wie beispielsweise Antriebe, die nächste Ebene (B₂) Komponenten wie Roboter oder Greifer. Module (B₃) können in standardisierte Prozessmodule, wie Schrauben, Prüfen oder Einpressen, und prozessneutrale Strukturmodule, wie Transfer- oder Umlenkmodule, eingeordnet werden. Durch die Kombination der Prozessmodule entlang der geforderten Funktionen entstehen kundenindividuelle Produktionsanlagen (B₄), welche über die Strukturmodule an die jeweiligen räumlichen Gegebenheiten angepasst werden können. Diese können in sich geschlossene Produktionsschritte abdecken. Um ein vollständiges Produkt zu fertigen, können mehrere Produktionsanlagen zu einer Fertigungslinie (B₅) kombiniert werden. [24, 52, 53]

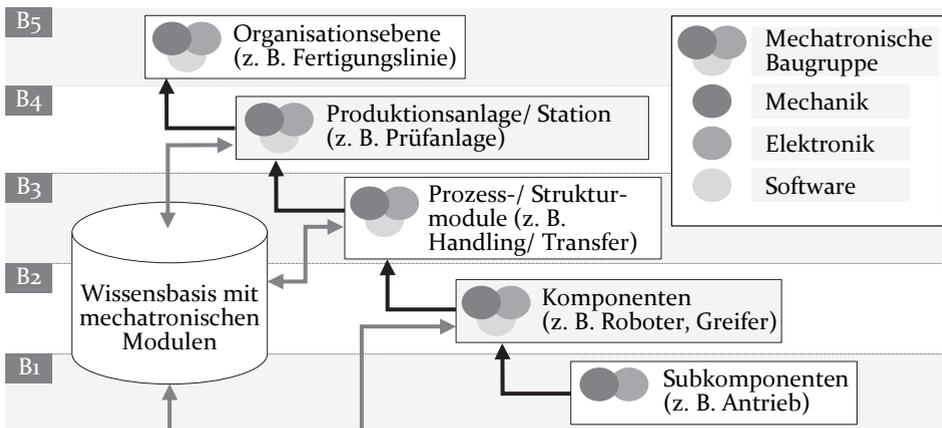


Bild 15: Mögliche Ebenen zur systematischen Einordnung von mechatronischen Baugruppen (B₁ - B₅) als Module in der Fabrikplanung [24, 52]

Um Module und deren Schnittstellen abstrakt, herstellerneutral und unabhängig von den verwendeten technischen Komponenten zu beschreiben und zu verwenden, bietet sich der Ansatz über das Schnittstellendiagramm, siehe Kapitel 2.4.4, und Fähigkeiten, siehe Kapitel 2.4.5, an. [53, 54]

2.4.4 Schnittstellendiagramm und -matrix

Das Schnittstellendiagramm und die dahinterliegende Methode wurden für das Systems Engineering entwickelt, um ein besseres Verständnis für komplexe Wechselwirkungen zwischen Komponenten eines Designs während der Entwicklung zu erlangen. Der Ansatz ist für modulare Systeme interessant, da Schnittstellen universell über vier mögliche Verbindungsformen beschrieben werden können: physikalische Verbindung, Energietransfer, Material- und Informationsaustausch. Die Wechselwirkungen der einzelnen Verbindungen variieren dabei von (-2) negative Interaktion (muss verhindert werden), zu (o) keine Interaktion, bis zu (+2) (Interaktion notwendig). In Bild 16 ist ein einfaches Beispiel dargestellt, wie Schnittstellen von mechatronischen Systemen beschrieben werden können. [54]

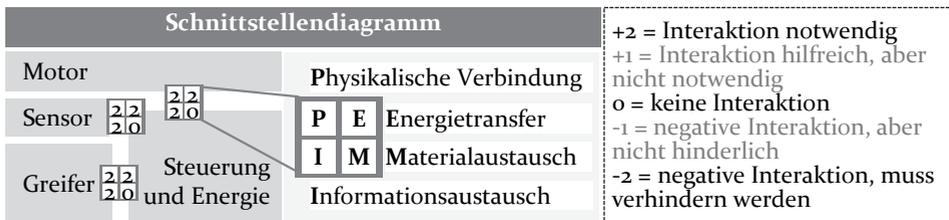


Bild 16: Beispielhaftes Schnittstellendiagramm als generischer Ansatz zur Beschreibung von Schnittstellen für modulare Systeme in Anlehnung an [54]

Um die Schnittstellen systematisch aufzubereiten, bietet sich die Schnittstellenmatrix an. In diese werden alle zuvor vereinfachten, aufbereiteten Module und deren Wechselwirkung eingetragen, siehe Tabelle 1. Da alle Module ausschließlich an die Steuerung und Energieversorgung angebunden sind, ist zwischen den übrigen Modulen keine Interaktion notwendig. Daher sind diese Felder leer. Eine strukturierte Aufbereitung von Modulen speziell für die Konfiguration über das Schnittstellendiagramm wurde bisher nicht umgesetzt, bietet aber großes Potential. [54]

Tabelle 1: Schnittstellenmatrix zu Bild 16, leere Felder zeigen dabei an, dass keine Interaktion zwischen den Modulen besteht bzw. in den vier Nullen stehen würden [54]

			A		B		C		D	
Steuerung und Energie (A)					2	2	2	2	2	2
					2	0	2	0	2	0
Greifer (B)			2	2						
			2	0						
Motor (C)			2	2						
			2	0						
Sensor (D)			2	2						
			2	0						

2.4.5 Fähigkeiten zur Abstraktion mechatronischer Systeme

Zur generischen, herstellerneutralen Beschreibung und problembezogenen Verwendung von mechatronischen Komponenten, Modulen und Anlagen sind Fähigkeiten ein vielversprechender Ansatz. Um Ingenieure bei der Erarbeitung einer Prinzipiellösung, wie bei einer ergebnisorientierten Anlagen-grobkonzeptplanung zu unterstützen, stellt die fähigkeitsbasierte Spezifikation die notwendigen Freiheitsgrade bereit. Auch ist eine Zuordnung von bereits realisierten Anlagen und Modulen auf neue Produkte und deren Fertigungs- und Montageprozesse möglich. In Bild 17 ist eine Produktions-anlage mittels Fähigkeiten anhand eines exemplarischen Ablaufs und einer Kinematik beschrieben. [53, 55]

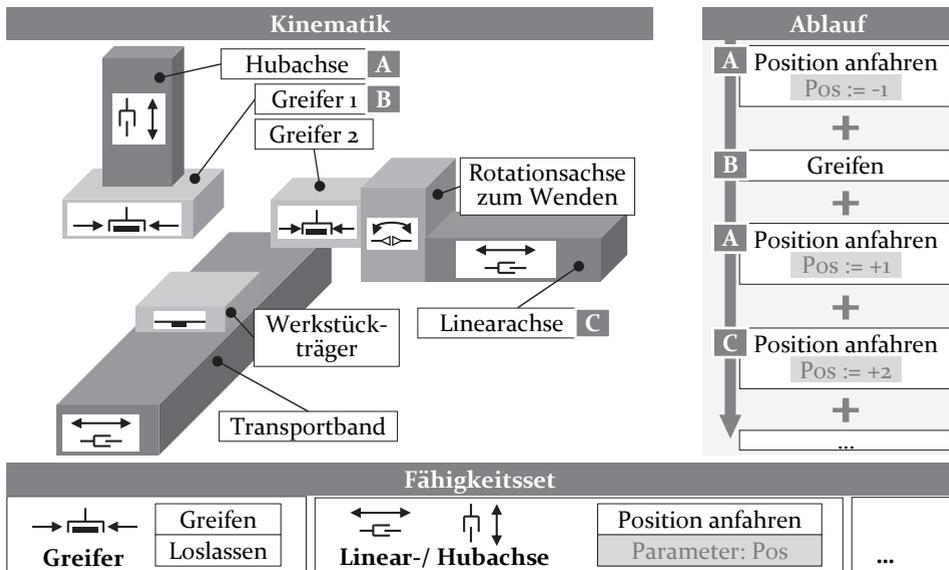


Bild 17: Abstraktion von mechatronischen Anlagen, Modulen und Komponenten durch Fähigkeiten für einen effizienten Planungsprozess [53, 55]

Die Systemkomponenten werden basierend auf einem generischen Fähigkeitsset wie Greifen, Loslassen oder Position anfahren beschrieben. Einfache Komponenten wie z. B. der Greifer (Greifen und Loslassen) oder die Linear-/ Hubachse (Position anfahren), können zu komplexeren Modulen bzw. Fähigkeiten wie Handhaben aggregiert werden. Aufgrund der einheitlichen generischen Beschreibung ist eine Arbeitsteilung im Engineering über Fähigkeiten einfacher möglich. Daher stellen Fähigkeiten für die frühen Planungsphasen und Konfiguratoren großes Potential dar, wurden aber bisher in Kombination mit Konfiguratoren nicht detailliert betrachtet. [53, 55]

3 Konzepte und Methoden zur Digitalisierung des Engineerings

Die Digitalisierung der Arbeitswelt ist einer der größten Treiber des Wandels, auch im Engineering. Die proaktive Suche nach Geschäftsmöglichkeiten und die Entscheidung, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, sind eine wirkungsvolle Antwort auf die hohe Dynamik der Digitalisierung, um für die langfristige Nachhaltigkeit eines Unternehmens zu sorgen [56].

Definition Digitalisierung
<p>„Die Digitalisierung der Arbeitswelt umfasst den vernetzten Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien zur Automatisierung betrieblicher Prozesse sowie der Entwicklung neuer Produkte und Dienste. Ziel ist die Steigerung der Wertschöpfung.</p> <p>Digitalisierung bedeutet in Bezug auf Prozesse, dass vormals analoge Informationen anschließend digital verfügbar gemacht oder vormals analoge Arbeitsschritte anschließend elektronisch ausgeführt werden oder beides.“ [57, S. 8]</p>

Dabei werden heterogene Engineering-Tools, als Rückgrat der Digitalisierung, häufig von einem Anbieter als proprietäre, lizenzpflichtige Desktopanwendung entwickelt. Ausgehend von einer Domäne als initiale Kernkompetenz, werden die von den Kunden geforderten Funktionen sukzessive erweitert (integrierte Lösung) oder durch Akquisitionen ergänzt (heterogene Systeme), siehe Bild 18. Dies führt zu einer zunehmenden Herausforderung bei der Softwareintegration und Interoperabilität verschiedener Funktionen, gerade bei monolithischen Softwarearchitekturen. [58, 59]

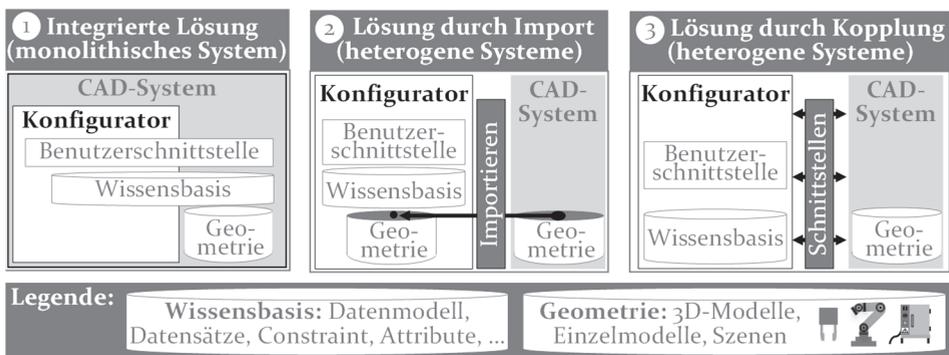


Bild 18: Funktionsumfang und Kopplung heterogener Systeme am Beispiel der Konfigurator- und CAD-System-Integration für eine 3D-Darstellung von Konfigurationsergebnissen [60, 61]

Denn heterogene Systeme sind meist nur mit hohem Integrationsaufwand kompatibel [60]. Eine Möglichkeit zur Kopplung heterogener Systeme besteht in dem Import von Dateien, wie z. B. CAD-Geometrien, siehe Bild 18. Auch können mittels vereinheitlichter, offener Schnittstellen, sofern diese verfügbar sind, heterogene Systeme bidirektional gekoppelt werden. Ein möglicher Grund für den hohen Integrationsaufwand ist, dass es noch an standardisierten, einheitlichen Semantiken und arbeitsteiligen Modellierungsmethoden mangelt [P3]. [58, 59]

Die zunehmende Komplexität im Engineering kann nur mit innovativen, besser nutzbaren Softwarewerkzeugen gelöst werden. Um dabei bezahlbare industrielle Softwarelösungen zu ermöglichen, müssen die Entwicklungskosten gesenkt und auf eine größere Nutzerbasis verteilt werden. Dies kann durch eine Wiederverwendung von Services und Wissens-elementen in mehreren Anwendungen geschehen. Nutzerzentrierte Ansätze und neue Geschäftsmodelle verbreitern die Kundenbasis. Im Gegensatz zu branchenorientierten Ansätzen bieten Lösungen aus dem Konsumgüterbereich oft ein deutlich besseres Preis-Leistungs-Verhältnis sowie eine bessere Nutzbarkeit. Dies zeigt sich in der Anpassung innovativer Softwarearchitekturmuster wie Microservices, die bereits von verbrauchernahen Unternehmen wie Netflix, Spotify oder Zalando [62], aber kaum von industriellen Softwareanbietern adaptiert sind. Daher werden im Folgenden wesentliche digitale Rahmenbedingungen und Lösungskonzepte vorgestellt. [61, 63]

3.1 Digitalisierung als Chance für Innovation

Strategie und frühzeitige Geschäftsmodellbetrachtung und -bewertung tragen dazu bei, die Unsicherheit bezüglich der konkreten Ausgestaltung einer bestimmten Technologie bzw. Softwarelösung in Hinblick auf wirtschaftlichen Erfolg abzubauen. Hieraus ergeben sich die Anforderungen an die Ausgestaltung der Geschäftsprozesse, die erforderliche IT-Support-Struktur sowie deren Softwarearchitektur, siehe Bild 19. [64, 65]

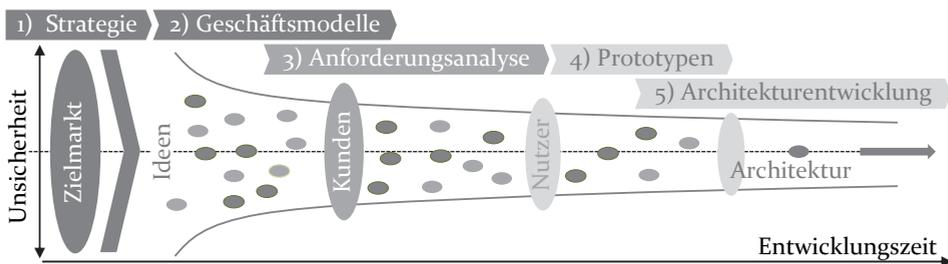


Bild 19: Trichtermodell: Strategie und Geschäftsmodell stellen die Anforderungen und damit Fokussierung für die späteren Phasen bereit; als Synthese aus [65, 66]

3.1.1 Strategische Perspektive der Wissensautomatisierung

Wissensbasierte Unternehmensstrategien stellen im Zeitalter der Digitalisierung einen Wettbewerbsvorteil dar. Nach DE WIT lassen sich Strategien in vier Ebenen einteilen: Netzwerk, Konzern, Geschäftsbereich und funktionale Strategien. Wissensbasierte Strategien lassen sich der übergreifenden Konzern- und Geschäftsbereichsstrategie zuordnen, können aber alle Ebenen nachhaltig optimieren. Ziel der Konzernstrategie ist die Klärung der Zusammenarbeit zwischen den Geschäftsbereichen. Hierbei können Geschäftsbereiche und Divisionen als Mini-Unternehmen betrachtet werden. Je nach den Anforderungen des jeweiligen Umfelds kann es erforderlich sein, als eine eng integrierte Einheit oder als viele autonome, differenzierte Divisionen zu agieren. Die Unternehmensstrategie legt fest, wie die internen Ressourcen und das externe Potential genutzt werden, um einen strategischen Wettbewerbsvorteil zu erzielen. [67, 68]

Da der darwinistische Geschäftskampf nach MOORE immer „brutaler“ wird und durch die globale Verfügbarkeit von Informationen die Differenzierung von der Konkurrenz immer kürzer anhält, ist eine nachhaltige, wissensbasierte Strategie notwendig. Eine klare Differenzierung vom Wettbewerber schafft eine höhere Kundenpräferenz beim Kauf. Produkte und Services, die zum aktuellen Zeitpunkt innovativ sind, können innerhalb weniger Monate von einem Wettbewerber potentiell besser und günstiger kopiert werden. Somit stellen innovative Produkte oder Services nur einen vorübergehenden Wettbewerbsvorteil dar. Darüber hinaus werden Informationen über Produkte und Dienstleistungen in der Regel auf transparente Weise durch Werbe- und Marketingkampagnen verbreitet. Auch das Re-Engineering beschleunigt die Lernkurve der übrigen Marktteilnehmer. Im Gegensatz dazu sind unternehmensinterne Prozesse für die Konkurrenten unsichtbar und können nur mit hohem Aufwand kopiert werden, siehe Bild 20. [69, P4]

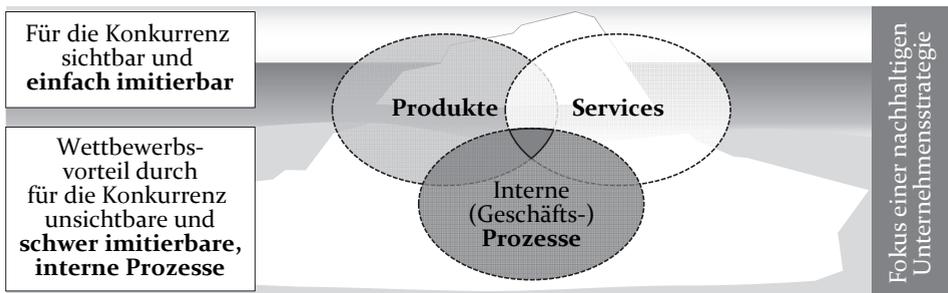


Bild 20: Strategischer Vorteil mittels automatisierter unternehmensinterner Prozesse, da diese schwer von Konkurrenten imitierbar sind [P4]

Effiziente interne Prozesse bieten einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil durch eine höhere Qualität von Services und Produkten bei geringeren Kosten bzw. höheren Gewinnmargen. Dieser Vorteil gilt für wissensbasierte und physische Tätigkeiten, wobei wissensbasierte Tätigkeiten überproportional profitieren, da sich Wissen beliebig vervielfältigen lässt, ohne verbraucht zu werden. Der Produktentstehungsprozess (PEP) gliedert sich dabei in drei Schritte: (1) Produktentwicklung, (2) Produktionsplanung und (3) Produktion [48]. Innerhalb des PEP stellt z. B. die Synchronisierung der einzelnen Disziplinen als wissensbasierte Tätigkeit (Planung, Mechanik, Elektrik und Software) seit jeher eine Herausforderung dar [70]. Durch mechatronische Produkte mit kognitiven Funktionen, digitale Dienste sowie anspruchsvollere Maschinen und Anlagen nimmt die Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Mehrdeutigkeit – auch bekannt unter dem Akronym VUCA [71] – in der Technik weiter zu [P5, P6]. Dabei wächst der Koordinationsaufwand exponentiell mit der Größe des Projekts [72]. Umso wichtiger sind effiziente und transparente Engineering-Prozesse sowie integrierte Werkzeugketten, durch die einzelne Arbeitsschritte automatisiert ausgeführt werden können. Daneben stellt die Zentralisierung, Standardisierung, Modularisierung und sukzessive Optimierung nach MOORE [69] einen der zentralen Stellhebel zur Ressourcengewinnung im Unternehmen dar. [69, P4]

3.1.2 **Skalierbare Wiedernutzung von Wissen als Basis digitaler Geschäftsmodelle**

Im Zentrum eines Geschäftsmodells steht der Kunde. Hierbei muss das Unternehmen verstehen, wer zur Zielgruppe gehört, was deren Bedürfnisse sind und wie diese zu adressieren sind. Das Nutzenversprechen stellt das zentrale Grundelement aller Lösungen sowie deren beinhaltete Produkte und Dienstleistungen dar und sollte für die adressierte Kundengruppe einen signifikanten Mehrwert schaffen. Die Wertschöpfungskette beschreibt die Aktivitäten und Prozesse, die zur Leistungserbringung notwendig sind. Dabei zeigt die Ertragsmechanik auf, wie ein Wert geschaffen wird und das Unternehmen Profit erwirtschaftet. [64, 73]

Definition Geschäftsmodell

"Ein Geschäftsmodell zeigt auf, wie ein Unternehmen durch das Zusammenspiel des Nutzenversprechens, des Kundensegments, der Wertschöpfungskette und der Ertragsmechanik Wert schafft und einen Teil des geschaffenen Wertes für sich sichert." [64, S. 25]

Roboter und Computer können mittlerweile eine Reihe von routinemäßigen körperlichen Arbeitstätigkeiten besser und günstiger ausführen als

Menschen. Zunehmend sind sie zusätzlich in der Lage, Aktivitäten durchzuführen, die kognitive Fähigkeiten beinhalten und als zu schwierig galten, um sie erfolgreich zu automatisieren, wie z. B. Emotionen wahrzunehmen oder autonom zu fahren. Nach einer Studie von McKinsey & Company führen 60 Prozent aller Berufsgruppen mindestens zu 30 Prozent repetitive Tätigkeiten aus, die mit dem aktuellen Stand der Technik automatisiert werden könnten [74]. Nach einer Studie der Bundesagentur für Arbeit aus dem Jahr 2015 zum Substituierbarkeitspotential von Berufen durch IT besteht ein Potential von 45 Prozent. Darüber hinaus wird über die nächsten 10 Jahre angenommen, dass bis zu 59 Prozent des Personals potentiell durch IT-Lösungen substituiert werden könnten. Hieraus leitet sich ein Handlungsbedarf zur Entwicklung von Strategien und Geschäftsmodellen für die Wissensautomatisierung ab. Denn nach der „10er-Regel“ können bei einer fehlerhaften Neu- und Wiederentwicklung hohe Kosten entstehen, siehe Bild 21. Eine gezielte Wissenswiedernutzung ist daher vorteilhaft, um die generellen Managementzielgrößen zu erreichen. Diese beinhalten, Arbeitsaufwand sowie Kosten zu reduzieren und die Qualität von Produkten und Dienstleistungen zu steigern. [74–76]

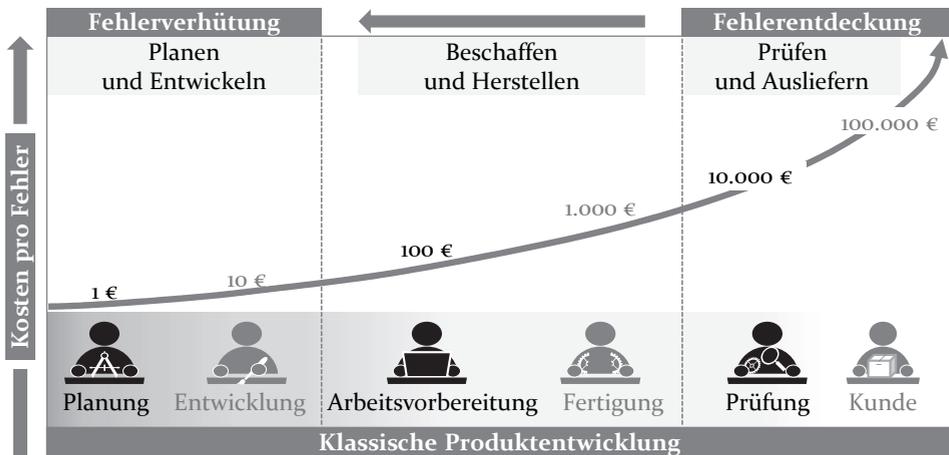


Bild 21: Nach der „10er-Regel“ steigen die Kosten pro Fehler in Abhängigkeit des Fehlerentdeckungszeitpunktes, je Phase der Produktentwicklung um den zehnfachen Wert [76, P4]

Ein Großteil der Erfindungen (77 Prozent) beruht auf der Weiterentwicklung von bekannten oder der geringfügigen Verbesserung von bestehenden Lösungen [77]. Nach der TRIZ Methode besteht für die Methoden der Wissensverarbeitung und -wiedernutzung großes Potential, denn: "Einer großen Anzahl von Erfindungen liegt eine vergleichsweise kleine Anzahl innovativer Lösungsprinzipien zugrunde." [77, S. 27] Dies legt die Basis für den

strategischen Einsatz wissensbasierter Werkzeuge, wie z. B. Konfiguratoren, welche Routinetätigkeiten softwareseitig automatisieren und die standardisierte Wissenswiedernutzung in der breiten Anwendung verbessern. Kapazitäten werden vom Tagesgeschäft eines Unternehmens für die stetige Optimierung von Prozessen befreit. [78]

Tabelle 2: Fertigungstypen und deren Eignung für den Einsatz von Konfiguratoren [79]

Fertigungstyp \ Merkmal	Einzel-fertigung	Serien-fertigung	Variante-nfertigung	Massen-fertigung	ind. Massen-fertigung
Stückzahl	--	-	o	++	o
Produktvorgaben	ao	po, ao	po, ao	po	po, ao
Kosten je Stück	++	o	o	--	-
Flexibilität	++	-	o	--	+
Automatisierungsgrad	--	o	o	++	+
Konfigurationseignung	--	--	+	--	++
Legende: ao: auftragsorientiert (Kunde) po: programmorientiert (Hersteller) ++: sehr hoch +: hoch o: durchschnittlich -: niedrig --: sehr niedrig					

Besonders in den Bereichen der Variantenfertigung und individuellen Massenfertigung liegt eine hohe Konfigurationseignung vor, da zum einen neue kundenindividuelle Lösungen und zum anderen, eine gewisse notwendige Stückzahl geschaffen werden müssen, sowie am Markt verfügbare Module vorliegen, siehe Tabelle 2 [79].

3.1.3 Prozessautomatisierung in der Wissensarbeit

Die durchgehende Digitalisierung von Geschäfts- und technischen Prozessen von der Modellierung zur Implementierung wird von der Forschung vernachlässigt. Meist werden die Prozesse für die Dokumentation modelliert und anschließend von der IT-Abteilung hartcodiert. In der Literatur zum Geschäftsprozessmanagement (engl. Business Process Model kurz BPM) liegt der Fokus primär auf den Management-Aspekten des BPM, weniger auf Aspekten einer effektiven und effizienten Ausführung der Wissensarbeit. Ähnliches gilt für technische Prozesse. Häufig eingesetzte, nicht ausführbare Modellierungssprachen sind das Aktivitätsdiagramm von der Unified Modeling Language (UML) und die erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette (eEPK) [80]. Die Ausführung und Umsetzung von Prozessen erfolgt des Öfteren über Werkzeuge wie Microsoft Excel in Kombination

mit Visual Basic Makros, welche separat entwickelt werden müssen [P7]. [8, 80]

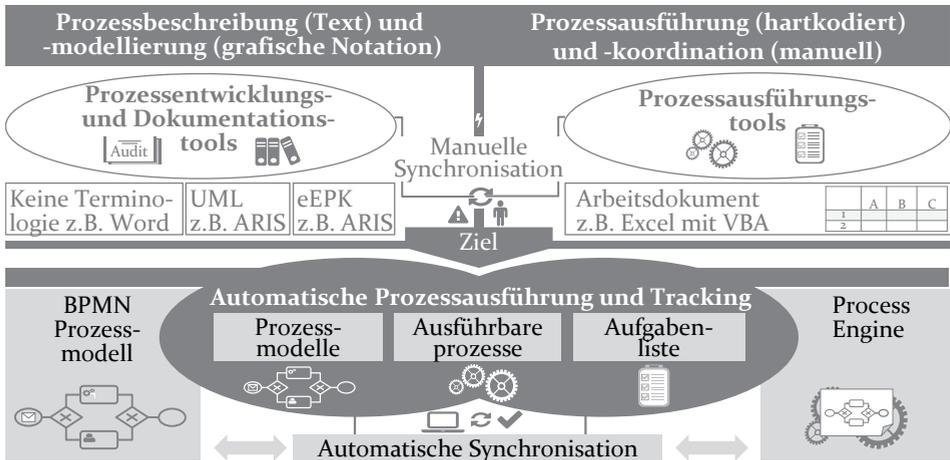


Bild 22: Gegenüberstellung von herkömmlicher Prozessdokumentation und -ausführung (oben) gegenüber einer automatisierten Prozessausführung (unten) [P4]

Hierzu gibt es mit der Einführung von BPMN 2.0 (engl. Business Process Model and Notation) im Jahr 2011 eine Alternative. BPMN ist eine grafische Notation zur leicht verständlichen Prozessmodellierung und für die direkte Prozessausführung, basierend auf dem prozessorientierten Ansatz, siehe Bild 22. Dieser wird seit 2015 in einem Großprojekt bei der SAP SE erfolgreich angewendet. [8, 80]

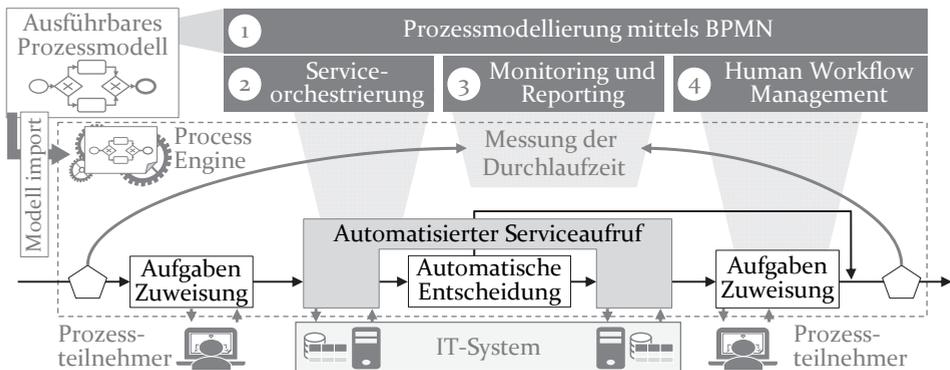


Bild 23: Prozessautomatisierung ausführbarer Modelle mittels Process Engine [81, P4]

Ausführbare Prozesse, modelliert mittels BPMN, eignen sich zur Formalisierung und Skalierung arbeitsteiliger Wissenskonzepte. Über diesen Ansatz werden die Prozesse von allen Mitarbeitern gleich ausgeführt und die erforderliche Qualität sichergestellt. Die Ausführung der Prozessmodelle

erfolgt über eine Process Engine, welche das Management, Monitoring und Reporting des Prozesses übernimmt, siehe Bild 23. [80, 81]

3.1.4 Komplexitätsreduktion von Softwarewerkzeugen

Wegen der zunehmenden Menge an Informationen ist es nötig, den Menschen mittels geeigneter IT-Werkzeuge zu entlasten [4]. Muster beschreiben generische Lösungsansätze für häufige, wiederkehrende Probleme in einem spezifischen Kontext. Dabei können Muster verwendet werden, um effektiv und ökonomisch bessere Softwarewerkzeuge zu erstellen. Hierbei kann zwischen Informations- und Gestaltungsmuster unterschieden werden, siehe Bild 24. [82]

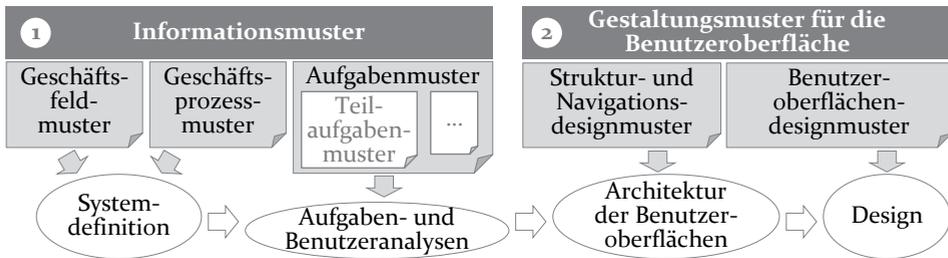


Bild 24: Der mustergestützte Ansatz (PSA Framework), um den Softwarewerkzeugentwicklungsprozess zu unterstützen sowie diesen effizient zu gestalten [82]

Geschäftsfeldmuster beschreiben die Art des Geschäfts, seine Ziele sowie die involvierten Akteure und Geschäftsprozesse. Geschäftsprozessmuster beschreiben typische Prozesse und Akteure, die an der Erbringung von Dienstleistungen/Waren in Übereinstimmung mit den Unternehmenszielen beteiligt sind. Aufgabenmuster werden verwendet, um Wissen über die Aufgabe, typische Nutzer und ihren Arbeitskontext aus früheren ähnlichen Projekten zu erfassen und weiterzugeben. Struktur- und Navigationsdesignmuster beschreiben Möglichkeiten zur Strukturierung von Informationen und zur Implementierung von Navigationsmechanismen, um die Aufgaben des Anwenders zu erleichtern. Benutzeroberflächendesignmuster dokumentieren Designprobleme, die basierend auf den Aufgaben-, Struktur- und Navigationsdesignmustern beschrieben sind. [82]

Für eine intuitiv verständliche Softwarelösung existieren aus der Gestaltungspsychologie auch generelle Prinzipien, wie komplexe Sachverhalte vereinfacht dargestellt werden können, damit diese besser und schneller wahrgenommen werden. Eine Abweichung von diesen kann zu einer ineffektiven Visualisierung, einer Fehlinterpretation bzw. fehlerhaften Wahrnehmung der Inhalte führen. Diese sind: das Prinzip der Nähe, das Prinzip

der Geschlossenheit, das Prinzip der stetigen Fortsetzung, das Prinzip der Ähnlichkeit und das Prinzip der Einfachheit, siehe Bild 25. [83]

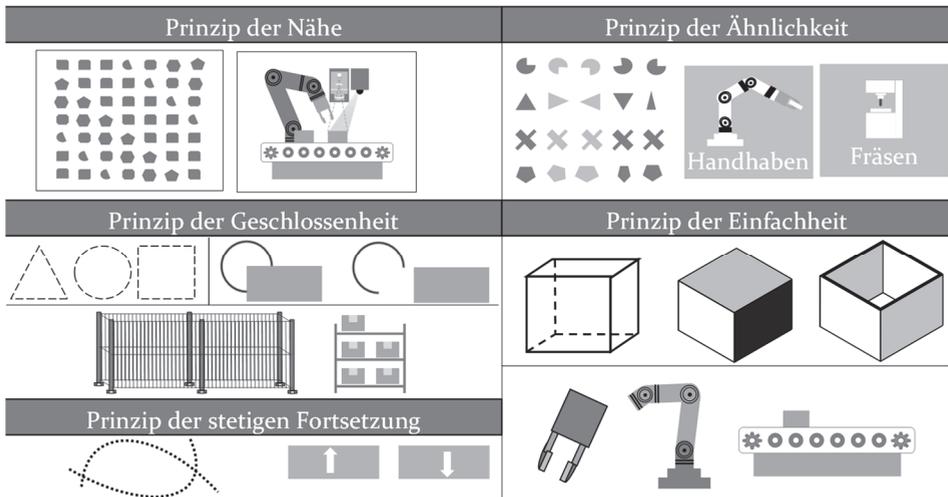


Bild 25: Gestaltungsprinzipien für ein intuitiveres Verständnis von Inhalten [83], erweitert mit eigenen Beispielen im Kontext von roboterzentrierten Produktionsanlagen

Durch bessere Softwarewerkzeuge kann eine Erhöhung der Qualität bei einer Reduzierung des Entwicklungsaufwands sichergestellt werden. Denn nur so kann sich der Entwickelnde auf den schaffenden und somit wertschöpfenden Prozess konzentrieren.

3.2 Methoden zur Entwicklung innovativer Softwaresysteme für das Engineering

Anspruchsvollere Softwareprojekte, wie z. B. wissensbasierte Konfiguratoren sind zu komplex, um vorab präzise und vollständig durchgeplant werden zu können. Hierfür sind agile Ansätze notwendig: „Wenn für herkömmliche Softwaresysteme die formale Spezifikation und Verifikation schon ein sehr schwieriges Unterfangen ist, so ist sie für Expertensysteme nahezu unmöglich.“ [4, S. 11] So weicht die geplante Lösung bei Projektbeginn meist erheblich von der tatsächlichen Lösung am Projektende ab. Durch ein iteratives, inkrementelles Vorgehen ist es dennoch möglich, eine gute Lösung für innovative Konzepte zu finden und die hierfür erforderliche Softwarearchitektur zu entwickeln, siehe Bild 26. [4, 84, 85]

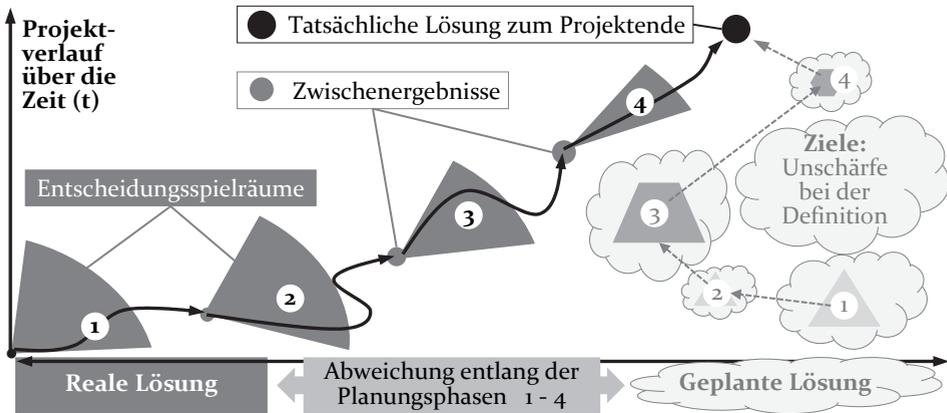


Bild 26: Umgang mit der Unschärfe einer Softwarearchitektur entlang des Entwicklungsprozesses, durch eine iterative Anpassung entlang einer agilen Zielstellung [84]

Neben den klassischen linearen Entwicklungsansätzen wie dem Wasserfallmodell und dem V-Modell existieren zahlreiche agile bzw. zyklische Methoden wie das Spiral-Modell, V-Modell XT, Feature Driven Development, eXtreme Programming oder Scrum. Diese Ansätze sind generische Vorgehensmodelle, um Projektteams zu koordinieren und den Entwicklungsprozess zu strukturieren. Grundgedanke bei den agilen Methoden ist, dass die Entwicklung entlang mehrerer, aufeinander aufbauender Zyklen verläuft, was als iterativ-inkrementelles Vorgehen bezeichnet wird. Typisch für agile Ansätze ist der Versuch, den Aufwand für die Dokumentation zu reduzieren. Bestehende Dokumentation wird regelmäßig als „überflüssig“ hinterfragt und wenn möglich abgeschafft. [84–86]

3.2.1 System- und Softwarearchitektur

Die Architektur ist eine primäre Aufgabe bei der Entwicklung eines Softwaresystems, da dessen Leistungsfähigkeit von dem erfolgreichen Zusammenspiel aller Bestandteile abhängt. Der Softwarearchitekt wird häufig mit einem Gebäudearchitekten verglichen, auch wenn bei komplexen Systemen die passende Analogie ein Stadtplaner wäre, da dieser entlang vieler, zum Teil gegensätzlicher Anforderungen einen optimalen Kompromiss finden muss. Im Rahmen der Konzeption spielen Architektur- und Entwurfsmuster eine wichtige Rolle. Bekannte Muster sind die hierarchische Schichtenarchitektur, die „Client/Server-Architektur“, die komponentenorientierte Architektur sowie die serviceorientierte Architektur. [4, 84, 87]

Definition System-/ Softwarearchitektur
„Die grundlegende Organisation eines Systems, dargestellt durch dessen Komponenten, deren Beziehungen zueinander und zur Umgebung sowie den Prinzipien, die den Entwurf und die Evolution des Systems bestimmen.“ [87, S. 48]

Das „4 + 1“ *Sichtenmodell* nach KRUCHTEN verdeutlicht, dass entlang der Entwicklung einer Architektur verschiedene Perspektiven notwendig sind, um die Gesamtkomplexität in versteh- und handhabbare Arbeitspakete aufzuteilen, siehe Bild 27. Ausgehend von einem Szenario wird die Funktionalität für die potentiellen Nutzer abgeleitet. Dieses dient als Basis für die software- und hardwareseitige Implementierung sowie deren Integration in übergeordnete Prozesse. [88]

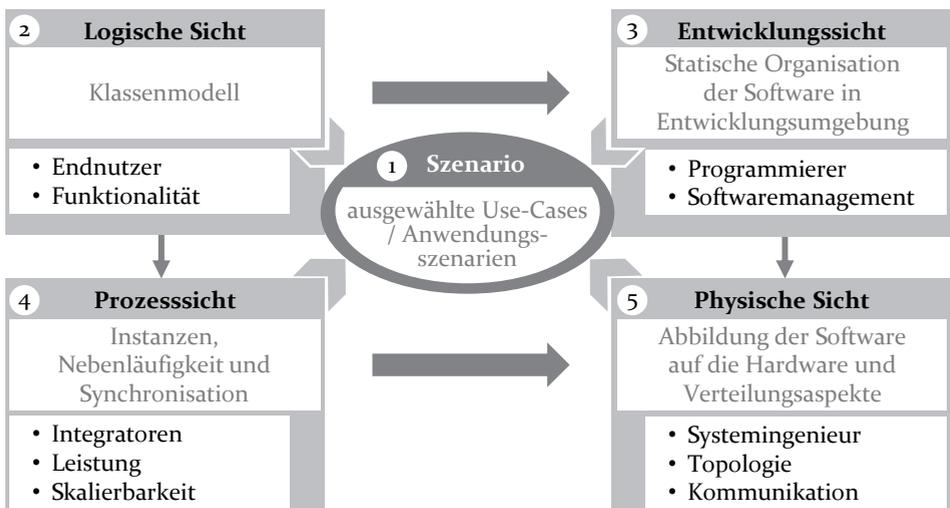


Bild 27: Das „4 + 1“ Sichtenmodell nach KRUCHTEN verdeutlicht, dass entlang der Entwicklung einer Architektur verschiedene Perspektiven notwendig sind [88, 89]

3.2.2 Serviceorientierte- und Microservice-Architektur als konsequente, softwareseitige Modularisierung

Die Microservice-Architektur (MSA) stellt eine moderne und skalierbare Lösung für die Softwareentwicklung dar, bei gleichzeitiger Komplexitätsreduzierung des gesamten Softwaresystems. Bedingt durch die Anforderungen für den Massenmarkt bieten Microservices (MS) einen innovativen Lösungsansatz. In einem Vortrag im Jahr 2006 sprach der Technologievorstand von Amazon, Werner Vogels, über kleine Teams, die Dienste mit eigenen Datenbanken entwickeln und betreiben. Dies war das erste Mal, dass MS erwähnt wurden. [90, P5, P6, P8, P9]

Die MSA ist eine serviceorientierte Architektur (SOA), in der die Software aus kleinen, unabhängigen Diensten besteht. Diese sind lose gekoppelt und auf einen überschaubaren Funktionsumfang reduziert. Dabei arbeiten die Dienste nur über universelle Schnittstellen zusammen [90]. Häufig werden die Konzepte der SOA mit der MSA verwechselt, siehe Bild 28. Obwohl beide Konzepte viele Gemeinsamkeiten besitzen, sind Unterschiede vorhanden. Diese bestehen in der Auf- und Arbeitsteilung in den Entwicklungsteams, der graphischen Benutzeroberfläche (GUI) und der Datenbank. Bei MSA kann jeder Dienst eine problemspezifische Datenbanklösung und eine integrierte GUI-Komponente besitzen. Im Gegensatz dazu wird bei SOA die GUI unabhängig von den Diensten entwickelt. Auf die zentralen Datenbanken kann von mehreren SOA-Diensten gleichberechtigt zugegriffen werden und eine übergeordnete Orchestrierung ist erforderlich. Auch gibt es Unterschiede in der Entwicklungsverantwortung der Dienste. Bei MSA ist ein Entwicklungsteam für einen MS verantwortlich. [90–92, P9]

Bei SOA können mehrere Teams an einem Service arbeiten, welcher die Komplexität und Abhängigkeit erhöht. Daher können MSA als eigenständige Dienste bereitgestellt werden, wohingegen bei SOA das System als Ganzes verwendet werden muss. Jedes Softwaresystem lässt sich bis zu einem gewissen Grad modularisieren, auch eine monolithisch programmierte Software. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass die Modularisierung für eine monolithische Software im Nachhinein sehr aufwändig zu realisieren ist. Viele Abhängigkeiten können sukzessiv entstehen, da diese nicht explizit bei der Entwicklung ausgeschlossen werden. Um dies zu vermeiden, setzen MSA von Anfang an auf eine nahezu vollständige Autonomie der Dienste. [90–92, P9]

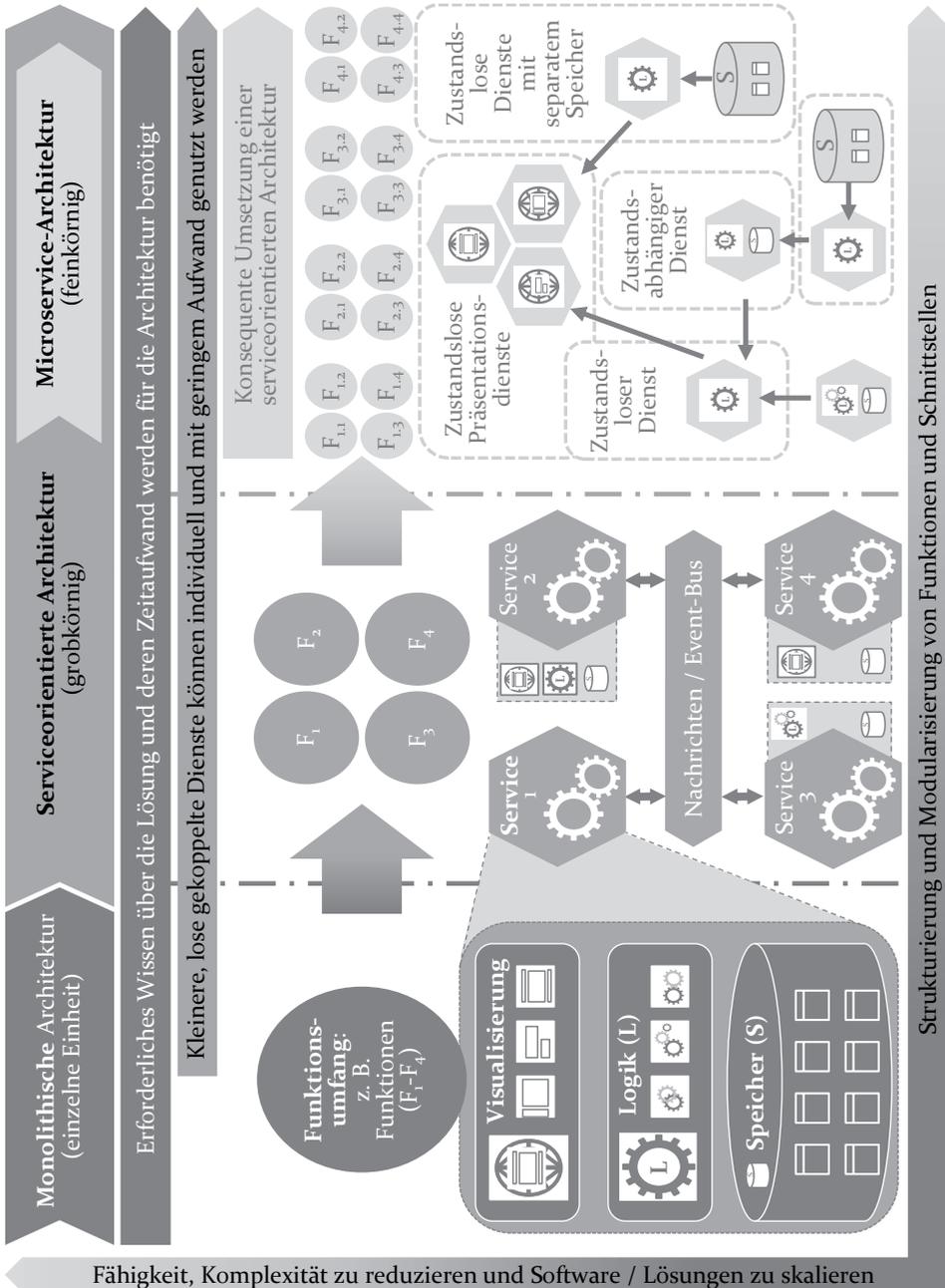


Bild 28: Exemplarische Darstellung verschiedener Softwarearchitekturen von einer monolithischen bis hin zu einer MSA; eigene Darstellung nach [P9, 92]

Durch den Modularisierungsansatz von MSA kann jeder MS unabhängig skaliert und optimiert werden. Dies vereinfacht nicht nur das System, sondern kann auch einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil mit sich bringen. Denn performance- und speicherintensive MS können separat skaliert und optimiert werden. Im Gegensatz zu Monolithen gibt es bei MSA eine technologische Freiheit für jeden einzelnen Dienst. Hieraus ergeben sich zwei wesentliche Vorteile: Zum einen können neue Technologien getestet werden, ohne andere Dienste zu beeinträchtigen. Im Einsatz kann das Potential der neuen Technologie optimal ermittelt werden, da MS individuell ausgetauscht werden können. Gerade bei konventioneller monolithischer Software stellt eine unkontrollierbare Fehlerkaskade neuer Technologien ein Innovationshemmnis dar. Der zweite große Vorteil der technologischen Freiheit ist die Möglichkeit, für jede Aufgabe das am besten geeignete Werkzeug einzusetzen. Ein gutes Beispiel für Werkzeuge sind Datenbanken, da die Verwendung von unterschiedlichen Datenbanktypen bei verschiedenen Zielstellungen sinnvoll ist. Beispielsweise ist eine dokumentenbasierte Datenbank der beste Typ, um Textnachrichten zu speichern. Diese ist jedoch für die Vernetzung von Personen im Sinne einer sozialen Medienplattform nur bedingt geeignet. Hierbei sind Graphdatenbanken von Vorteil. Mehrere Datenbanktypen bzw. generell Werkzeuge sind dabei für den Aufbau von anspruchsvolleren Softwarelösungen wie einer Webplattform, erforderlich. [90, 92, P9]

Die MSA setzt die Konzepte verteilter Systeme und der SOA konsequent um. Da diese explizit vorgegeben sind, kann das Potential von modularen Diensten nachhaltiger und besser genutzt werden, bei vollständiger technologischer Freiheit. Hierdurch ist es auch möglich, verschiedene Lösungen der künstlichen Intelligenz gezielt und wiederverwendbar über einzelne MS einzusetzen. Eine detaillierte Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile von Microservice-Architekturen anhand der strategischen, organisatorischen und technologischen Perspektive ist in Bild 29 dargestellt. Um die einzelnen MS und deren Benutzeroberflächen effizient nach den Bedürfnissen der adressierten Zielgruppe zu entwickeln, bieten sich die Methoden der nutzerorientierten Gestaltung an. [90, 92, P9]

Strategische Perspektive	
Vorteile	Herausforderungen
<p>Kleine Projektumfänge</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parallele Ausarbeitung verschiedener Microservices (MS) einfach möglich • Gezielte Orientierung an spezifischen Anforderungen <p>Hohe Kundenorientierung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Starke Einbindung des Kunden mittels unmittelbarer Feedbackmechanismen 	<p>Keine Erfolgsgarantie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierbarkeit von MS-Architekturen stark abhängig von individuellen Teamkompetenzen <p>Strategische Entschlossenheit muss vorhanden sein</p> <ul style="list-style-type: none"> • Notwendige Bereitschaft zur Umsetzung organisatorischer Anpassungen
	
Organisatorische Perspektive	
Vorteile	Herausforderungen
<p>Hohe Agilität</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schnelle, nutzerorientierte Prozesse • Kurze, agile Entwicklungszyklen <p>Hohe Autonomie der Teams</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Gestaltungs- und Entscheidungsfreiheit auf Teamebene • Gut abgegrenzte Verantwortungsbereiche • Geringerer Abstimmungsbedarf zwischen den einzelnen MS-Teams 	<p>Restrukturierung notwendig</p> <ul style="list-style-type: none"> • Strenge Hierarchien und starre Strukturen behindern MS-Architektur • Architektonische und Infrastrukturelle Anpassungen sind notwendig <p>Hohe Verantwortungslast</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teams übernehmen Verantwortung für die MS über den gesamten Lebenszyklus • Skalierung führt zu höherem Verwaltungsaufwand der MS-Datenbanken
	
Technologische Perspektive	
Vorteile	Herausforderungen
<p>Evolutionärer Entwicklungsansatz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Effektive Altsystem Modularisierung • Robustheit der Entwicklung, durch Continuous-Delivery-Pipeline <p>Fehlertolerantes Design</p> <ul style="list-style-type: none"> • Isolierte Entwicklung und Optimierung in emulierten Systemumgebungen <p>Hohe Interoperabilität</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definierte Kommunikation mittels APIs • Elastisches Hosting auf Cloud-Plattformen <p>Unabhängigkeit von Technologien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ersetzbarkeit der MS und Technologien, da geringe Abhängigkeiten bestehen • Nachhaltige Skalierbarkeit der MS 	<p>Komplexe Dekompositionsprozesse</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufwendige Lokalisierung von inneren Designgrenzen der Altsysteme • Starke Orientierung an Monolith-Konzept kann Skalierung limitieren <p>Anspruchsvolle Integrationsprozesse</p> <ul style="list-style-type: none"> • Notwendigkeit automatisierter Testverfahren • Standardisierung notwendig, da Dateninkonsistenz zu Serviceausfällen führt <p>Dezentrales Systemkonzept</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mehr Protokollierungs- und Überwachungsaufwand • Höherer Verwaltungsaufwand der einzelnen Datenbanken

Bild 29: Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile von MS-Architekturen anhand der strategischen, organisatorischen und technologischen Perspektive [90, 93–98]

3.2.3 Nutzerorientierte Gestaltung als agile Entwicklungsmethode für innovative Softwarelösungen

Steve Jobs, ehemaliger CEO von *Apple Computer*, wurde 2003 in einem Interview gefragt, worin der Schlüssel des *iPod* Erfolgs besteht [99]. Hierbei spielt ein ganzheitliches Konzept und eine nutzerorientierte Gestaltung bzw. ein nutzerorientiertes Design (UCD) eine wesentliche Rolle. Dabei beschränkt sich das Design nach Steve Jobs nicht nur das Aussehen und die Haptik. Design spiegelt sich in der ganzheitlichen Funktionsweise wider. Ein ganzheitliches, nutzerorientiertes Design lässt sich somit nicht am Ende des Entwicklungsprozesses über ein Produkt überstülpen, sondern sollte integraler Bestandteil des Entwicklungsprozesses sein. Hierzu ist vorab die effektive und systematische Identifikation von Leitnutzern notwendig, für deren Online-Identifikation sich folgende sechs Merkmale als primär herausgestellt haben: Vorsprung vor einem Markttrend, hoher erwarteter Kundennutzen, Kompetenz und Motivation der Nutzer, höchste Nutzerbedürfnisse sowie Meinungsführerschaft und Online-Engagement [100]. Dabei ist Benutzerfreundlichkeit das Ausmaß, in dem eine Lösung von einer bestimmten Nutzergruppe und einem Nutzerkontext verwendet werden kann, um ein definiertes Ziel zu erreichen. Der Erfüllungsgrad von Nutzbarkeit lässt sich in drei Stufen einteilen: Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit bei der Benutzung, siehe Bild 30. [99, 101–103]

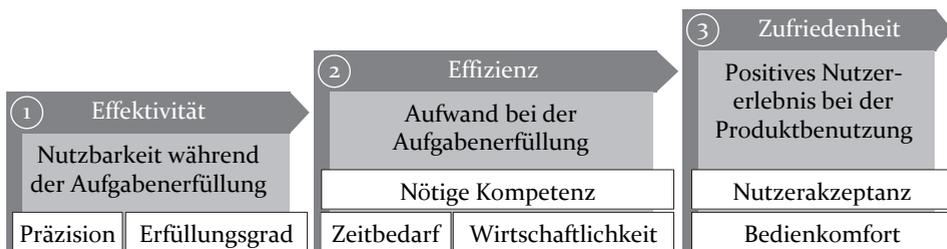


Bild 30: Die drei Stufen des Erfüllungsgrads von Nutzbarkeit; von der Effektivität zur Kundenzufriedenheit bei der Benutzung [P10, 102, 103]

Bei großen Unternehmen kann sich eine höhere Kundenorientierung besonders positiv auf die Unternehmensleistung auswirken und somit als Wettbewerbsvorteil dienen [104]. Das Beratungshaus *McKinsey & Company* sieht den Kunden als Inspiration für agile Entwicklung erfolgreicher Software und Services. Agile Teams sind kundenorientiert, arbeiten mit den Kunden eng zusammen und analysieren kontinuierlich deren Bedürfnisse. Kundenorientierung ermöglicht es, drei wichtige Ziele zu erreichen: Erstens wird die wirtschaftlichste Lösung gefunden. Denn wenn das Entwicklungsteam eng mit den Kunden zusammenarbeitet und einen agilen

Ansatz verfolgt, neigt es dazu, dem Kunden häufiger inkrementelle Zwischenergebnisse sowie einen Mehrwert zu liefern. Zweitens wird die Verantwortung für eine optimale Lösung auf das ganze Team aufgeteilt. Drittens sind die Teams motiviert, weil sie wissen, wem sie helfen. Der Bedarf wird klar verstanden und bezieht sich direkt auf den Nutzer. Eine der zentralen Lektionen aus dem UCD nach NIELSEN [101] ist, dass der Entwickler nicht der typische Nutzer ist. Denn wer in einem Entwicklungsprojekt arbeitet, ist der Definition nach untypisch. Daher ist es wichtig, reale Nutzer zu beobachten und in den Entwicklungsprozess im Rahmen häufiger und regelmäßiger Feedbackzyklen miteinzubeziehen. Dies kann z. B. in Form eines Mockups – also eines maßstabsgerechten Modells zu Präsentationszwecken des Gesamteindrucks – oder eines Klickprototypen – also eines zum Teil interaktionsfähigen Demonstrators einer Bedienoberfläche, welche bestimmte Interaktionen simuliert – erfolgen. Konzeptentscheidungen sollten aufgrund statistischer Daten getroffen werden. Konzepte und Prototypen werden als Hilfsmittel zur Validierung von Hypothesen verwendet. Bild 31 zeigt einen ersten Ansatz, wie die Scrum-Methode und eine nutzerzentrierte Entwicklung gekoppelt werden können. Hierbei ist die erste Entwicklungsphase die Konzeptentwicklung (3), auf deren Ergebnissen die eigentliche Entwicklung (4) erfolgt. Je Phase werden mehrere Sprints durchlaufen. [101–103, 105–107]

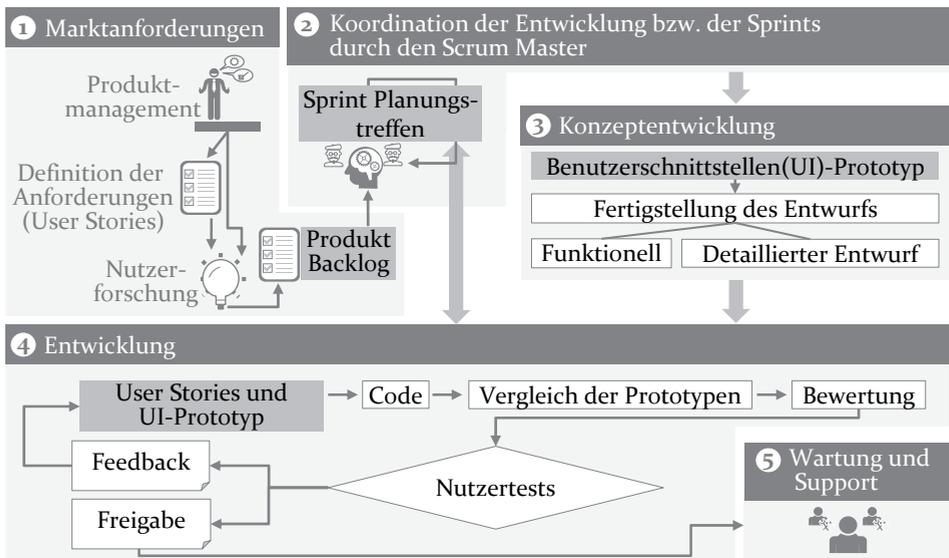


Bild 31: Entwicklungsmethode nutzerzentrierter Software in Kombination mit der Scrum-Methode [106, 107]

Die am häufigsten zitierten Messgrößen zum Nachweis der Wirksamkeit von UCD sind: Steigerung der Kundenzufriedenheit (33 Prozent), eine verbesserte Benutzerfreundlichkeit (20 Prozent), eine Umsatzsteigerung (19 Prozent) und geringerer Aufwand für Kundensupport Software (18 Prozent) [63]. UCD hat branchenübergreifend eine wichtige Rolle eingenommen. Aus dem Ansatz des UCD ergibt sich ein hohes Nutzen- und Kosteneinsparpotential, daher sollte dieses auch auf die Entwicklung von Konfiguratoren übertragen und für diese angepasst werden. [101, 108]

Nach aktuellen Schätzungen werden 50 Prozent aller Softwarefunktionen nicht oder selten genutzt. Komplexität entsteht nicht nur als "Creator-" Problem, sondern auch als "User-and-Consumer-" Problem. Durch die Einbeziehung des Kunden in den Entwicklungsprozess ergibt sich ein enormes Potential für eine Komplexitätsreduktion sowohl für die Entwicklung als auch für den Kunden. [105]

4 Wissensautomatisierung, künstliche Intelligenz und wissensbasierte Konfiguration

Die Industrialisierung ermöglicht es Produkte wirtschaftlicher, leistungsfähiger und qualitativ hochwertiger herzustellen, allerdings fordern immer mehr Branchen und Kunden individuelle Lösungen. Hersteller versuchen, diese durch einen festen Satz von Produktvarianten mit vordefinierten Funktionen zu bedienen. Der Vertrieb führt den Kunden im Verkaufsgespräch über die Gewichtung der Präferenz zu einer der vorhandenen Lösungen. Diese Strategie bietet bei sehr inhomogenen Kundenanforderungen aber kaum eine adäquate Übereinstimmung zu den vorhandenen Produktvarianten um die individuellen Kundenbedürfnisse kosteneffizient zu erfüllen. Beim Wechsel von einer reinen Massenproduktion hin zu kundenindividuellen Massenprodukten stellen Konfiguratoren das digitale Unterstützungswerkzeug dar. Moderne Konfigurationssysteme sollten die Wartbarkeit der Wissensbasis und ein nutzerorientiertes Konfigurationserlebnis unterstützen. Eine schnelle Analyse und Berechnung eines zielkriterienoptimalen Ergebnis aus sehr großen Lösungsräumen in kürzester Zeit wird vorausgesetzt. Die constraintbasierte Konfiguration ist dabei dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) zuzuordnen und unterstützt insbesondere die Wissensautomatisierung. [11, 34]

4.1 Wissen und Informationen

Der Mehrwert und die Leistungsfähigkeit von Produkten oder Services stützen sich auf einen gelungenen Kundenfokus, die richtige Kombination an Technologien sowie deren Interaktion, schlanke Prozesse, das optimale Timing, die richtige Qualität und eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Teillösungen [4]. Strukturiertes und vernetztes Wissen sowie eine nachhaltige Lernfähigkeit sind hierfür essenziell. Informationen und Wissen gelten in der heutigen Wissensgesellschaft als wesentlicher Rohstoff für zukünftigen Erfolg [4]. Die drei größten Vorteile von wissensbasierter Systeme bzw. Expertensystemen sind nach [109]:

1. Schnellere Entscheidungsfindung
2. Steigerung der Produktivität
3. Erhöhung der Qualität der Entscheidungsfindung

Zum besseren Verständnis für die Nutzbarmachung von Wissen, folgt ein stark vereinfachtes Beispiel: Wer einen Freund besuchen möchte (Problem), kann das Telefonbuch seines Smartphones verwenden, um dessen Adresse nachzuschlagen (Information). Eine konkrete Adresse kann zur Routenplanung verwendet werden, beispielsweise für „Google Maps“, um die exakte Wegbeschreibung zu erhalten (Wissen). Die Route (Lösung) kann unterschiedlich sein, je nachdem, mit welchem Verkehrsmittel zu der gewünschten Adresse gelangt werden soll; also zu Fuß, mit dem Fahrrad, den öffentlichen Nahverkehrsmitteln oder dem Automobil. Informationen sind demnach eine erkennbare Differenz bzw. Veränderung zwischen zwei Zuständen [110]. Die Bedeutung und Relevanz von Informationen steht hierbei in engem Zusammenhang für die Veränderung von anderen Informationen [110]. Wohingegen Wissen die Summe von Informationen ist, mit deren Hilfe ein spezifisches Problem effizient gelöst werden kann. Der Nutzen des Wissens zur Bewältigung einer Aufgabe ist dabei umso höher, je gezielter dieses die spezifische Struktur des Problemclusters ausnutzt. [4]

4.1.1 Wissen im Kontext des Menschen

Wissen ist ein vielfältig interpretiertes Forschungsgebiet. Die Nutzung durch den Menschen, basierend auf etablierten Modellen, gibt die Möglichkeit einer pragmatisch nutzbaren Einordnung des Themas. Der Vergleich der wissensbasierten Fähigkeiten des menschlichen Denkens mit IT-Lösungen zeigt die Vorteile und Nachteile hinsichtlich der Kriterien Komplexität, Genauigkeit und Schnelligkeit, siehe Bild 32.

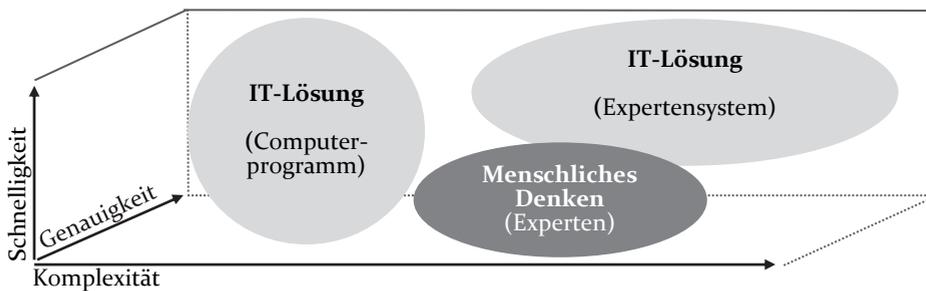


Bild 32: Qualitative Gegenüberstellung der wissensbasierten Fähigkeiten vom menschlichen Denken und IT-Lösungen, wie Expertensysteme und Computerprogramme zueinander [111]

Die Wissensklassen bzw. -ebenen aus der psychologischen Perspektive vereinfachen eine weitere Abgrenzung. Denn für die Wissensmodellierung von Expertensystemen dient das menschliche Fachwissen als primäre Grundlage. Entlang des menschlichen Lernprozesses können Ansätze für

das Wissensengineering abgeleitet werden. Generell kann zwischen situativem, deklarativem, sensomotorischem/ prozeduralem und imperativem Wissen unterschieden werden. Situatives Wissen kann eine Ausbildung für einen eingeschränkten Kontext, eine Bauanleitung oder ein Kochrezept sein. Deklaratives Wissen dient zur expliziten Erstellung eines Plans, eines Kochrezeptes oder einer Arbeitsanweisung und ist somit zur Kommunikation erforderlich. Sensomotorisches und prozedurales Wissen wird durch Übung, mittels Imitation, nach Anleitung oder durch Ausprobieren erworben und für die konkrete körperliche Ausführung einer Aufgabe benötigt. Imperatives Wissen ist z. B. eine gesetzliche Vorgabe, die einen Handlungsrahmen einschränkt oder eine gewisse Maßnahme fordert. Die Taxonomie der nachfolgenden sechs Wissensebenen und Lernziele nach BLOOM wird in der Wissens- und Lern-Pädagogik häufig eingesetzt. Fakten stellen dabei die Grundlage für die nachfolgenden Ebenen dar: [112, 113]

1. **Fakten-, Tatsachen-Wissen** [„das“]
Ziel: Speichern und wiedergeben; (engl. knowledge)
2. **Taxonomie-, Klassifikations-, Beziehungs-Wissen** [„was“]
Ziel: Verstehen bzw. explizite, präzise Einordnung und Kommunikation; erforderlich für deklaratives, sprachlich formulier- und kommunizierbares Wissen; (engl. comprehension [112], understanding [113])
3. **Situativ, prozedurales, sensomotorisches Wissen** [„wie“]
Ziel: Fertigkeiten, Anwenden, Zielzustand erreichen; (engl. knowhow)
4. **Dekompositions-, Modularisierungs-Wissen** [„woraus“]
Ziel: Analyse, in Teilprobleme zerlegen
5. **Kondensations-, Aggregations-Wissen** [„womit“]
Ziel: Synthese, auf das Wesentliche reduzieren
6. **Bewertungs-, Schöpfungs-Wissen** [„warum“ / „weshalb“]
Ziel: Beste Option bzw. Kombination auswählen, Neues schaffen, Erlangen neuer Möglichkeiten; (engl. evaluation [112], creation [113])

Menschen durchlaufen nach DREYFUS et al. fünf Wissensstufen vom Anfänger zum Experten, siehe Tabelle 3. Zu Beginn des Lernprozesses werden einfache Regeln befolgt, um erste Erfahrungen zu sammeln. Mit steigender Erfahrung können immer holistischere Problemstellungen bearbeitet und gelöst werden. Ab dem Kompetenzniveau sind bereits so viele Regeln für gewisse Situationen bekannt, dass diese gezielt kontextabhängig ignoriert werden, um ein primäres Ziel zu erreichen. Das Verständnis der Situation nimmt dabei zu, kann situationsspezifischer eingesetzt werden und wird für die Wahrnehmung immer bewusster, wobei die Entscheidungsfindung

bei Experten letztlich intuitiv abläuft. Dieses sogenannte „kompilierte“, unterbewusste Wissen von Experten ist eine primäre Herausforderung bei der Wissensextraktion für Expertensysteme. [114]

Tabelle 3: Das 5-Stufen-Modell nach DREYFUS et al. vom Anfänger zum Experten [114]

Wissensstufen	Wissensnutzung	Verständnis der Situation	Art der Entscheidungsfindung	Innere Einstellung
Anfänger	Kontextfrei	Keines	Analytisch	Distanziert
Fortgeschrittener Anfänger	Kontextfrei und situationsbezogen	Keines	Analytisch	Distanziert
Kompetenter	Kontextfrei und situationsbezogen	Analytisch, bewusst gewählt	Analytisch	Distanziertes Verstehen und Entscheiden, involviert im Ergebnis
Meister	Kontextfrei und situationsbezogen	Aus Erfahrung	Analytisch	Distanziert im Entscheiden, involviert im Verstehen
Experte	Kontextfrei und situationsbezogen	Aus Erfahrung	Intuitiv	Involviert

4.1.2 Herausforderungen bei der Wissensakquise

Das Beschaffen und Aufbereiten von Expertenwissen ist eine der anspruchsvollsten Aufgaben, was nicht nur an der unbeständigen, unvollständigen, unsicheren, unpräzisen und vagen Natur des Wissens liegt, siehe Kapitel 4.1.5. Diese These unterstützen HEINSOHN et al.: „Der Wissenserwerb ist eine der schwierigsten Aufgaben bei der Entwicklung eines Expertensystems.“ [4, S. 9] Expertenwissen liegt häufig implizit, also in Form einer Verflechtung von „Können“ und „Wissen“ vor, auch stillschweigendes Wissen genannt. [4] „Wir alle beherrschen beispielsweise die Grammatik der deutschen Sprache, sind aber meist nicht in der Lage, die Regeln der deutschen Grammatik explizit zu machen. Es handelt sich hier also um das Problem des Wissenserwerbs.“ [4, S. 11] Nach SCHREIBER sollten zwei Fragen vor der Wissensakquise beantwortet werden: [43, 109]

1. **Identifikation von Experten und deren Kompetenz:** Wie bestimmen Wissensingenieure, wer die Experten sind und was deren Problembewältigungskompetenz begründet?
2. **Bereitschaft zur Weitergabe von Wissen:** Wie werden Experten überzeugt, ihr Wissen weiterzugeben, also Wissensingenieuren zu sagen und zu zeigen, was und wie sie etwas tun?

Herausforderungen im Kontext von Experten: Experten verwenden häufig unterbewusstes Alltagswissen, welches sie selbstverständlich in den Lösungsprozess mit einbeziehen, wobei komplexe Zusammenhänge bestehen können. Zusätzlich wollen Experten das Wissen aus persönlichen, strategischen Gründen, verursacht durch eine fehlende nachhaltige Wissenskultur nicht weitergeben, da sie sich ersetzlich machen bzw. hieraus in klassischen Unternehmenskulturen mehr Nachteile und wenige bis keine Vorteile entstehen. [4, 43, 109, 115]

Herausforderungen im Kontext von Laien: Laien können Lösungsalternativen bewerten, aber nur indirekt zum Lösungsprozess beitragen [116]. Daraus lässt sich eine Schlussfolgerung für die Wissensaufbereitung ziehen. Es ist effizienter die Nutzer zu beobachten, anstatt ihnen Fragen zu stellen, die sie aufgrund ihres Wissensstands nicht lösungsorientiert beantworten können. Auch gibt es häufig einen großen Unterschied zwischen dem, was Personen sagen und wie sie sich tatsächlich verhalten. [43, 117]

4.1.3 Einsatzgebiete von Wissen

Die Einsatzgebiete von Wissen unterscheiden sich primär anhand der Wissensinhalte und der Problemlösungsmethoden. Somit ergeben sich zwei Oberklassen für die Wissensarbeit, siehe Bild 33. [4, 43]

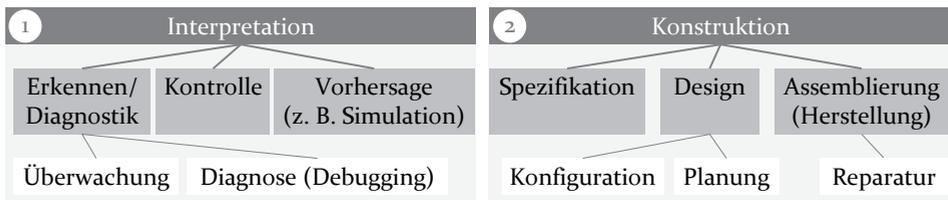


Bild 33: Kategorisierung von Problemlösetypen nach Interpretation und Konstruktion [43]

Interpretation/ Analyse: Auffinden, Bewerten, Klassifikation und Selektion der erforderlichen, nutzbringenden Informationen und des Wissens für eine Problemlösung aus einer vorhandenen Menge verschiedener Alternativen, z. B. Diagnose, Überwachen, Analysieren, Selektieren, Beraten oder Vorhersage von Werten oder Verhalten. [4, 43]

Konstruktion/ Synthese: Kombination, Konkretisierung, Anpassung und Umwandlung von mehreren Teilinformationen in Wissen und somit in eine korrekte Zusammenstellung von Teilkomponenten oder einer zielführenden, sequenziellen Kombination von Aktionen bis zum Erreichen der gewünschten Gesamtlösung, z. B. Designtätigkeiten, wie Konfiguration

oder Planen. Je nach Ausprägung der Aufgabenstellung kann es sich um ein Suchproblem oder Routenproblem handeln, siehe Kapitel 4.2.4. [4, 43]

4.1.4 Wissen im Kontext der Informationstechnologie

Einer der primären Einflussfaktoren, welcher zur effizienten Lösung einer wissensbasierten Aufgabenstellung beiträgt, ist die geschickte Wahl einer für das Problem adäquaten Wissensrepräsentation sowie deren Darstellung für den Computer. Bei der Formalisierung, ausgehend von dem Wissensgebiet und der Zielstellung, werden „unwichtige“ Teile oder Eigenschaften weggelassen und „wichtige“ Teile dargestellt. Dieser Vorgang wird als Wissensabstraktion bezeichnet. Anhand von fünf generellen Kriterien können die Qualität und Reife der Repräsentation beurteilt werden, wobei je nach Zielstellung der Wissensaufgabe die Kriterien zueinander in Widerspruch stehen können. [4, 43]

- **Vollständigkeit:** Repräsentation aller erforderlichen Mittel bzw. Zusammenhänge, die zur Problemlösung gebraucht werden.
- **Abstraktion:** Verallgemeinern bzw. Entfernen von unwichtigen und für die Problemlösung irrelevanten Details. Ausschließlich die aufgabenrelevanten Informationen werden dargestellt.
- **Ökonomie:** Kompakte, kondensierte Darstellung der Ausdrucksmittel in Form von mathematischen Gleichungen, Formeln oder Funktionen.
- **Freiheit von Redundanz:** Vermeidung doppelter Darstellung von Informationen auf verschiedene Weise. Hieraus können sich insbesondere bei Änderungen Widersprüche ergeben, wenn nicht alle Informationsdarstellungen konsistent geändert werden.
- **Transparenz:** Verständlichkeit der Darstellungen von Informationen; Zum Teil ist es notwendig, irrelevant erscheinende Informationen zu modellieren, um den Problemlösungsprozess zu vereinfachen. Insbesondere die Prinzipien der Transparenz und Ökonomie können somit häufiger in einem Widerspruch zueinanderstehen.

Bei der Wissensrepräsentation für Computer kann in deklaratives und prozedurales Wissen unterschieden werden, siehe Bild 34 und Tabelle 4.

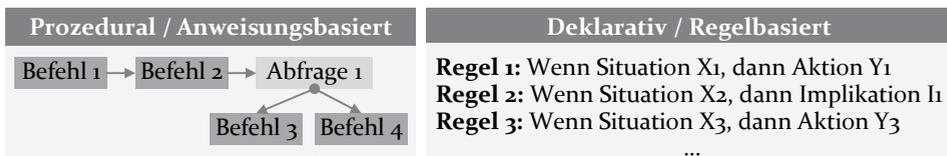


Bild 34: Gegenüberstellung von anweisungs- und regelbasierter Programmierung [43]

Beim prozeduralen Programmierstil wird die Ausführungsreihenfolge der primitiven Operatoren vom Programmierer festgelegt, bei der deklarativen Programmierung vom (Regel-)Interpreten. Regeln bestehen aus Kernaussage, Kontext, Ausnahmen und Implikation oder Handlung. [4, 43]

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Wissensarten im Computer nach prozeduralem (quasi implizit) und deklarativem (explizitem) Wissen [4, 43]

Wissensart	Prozedurales Wissen	Deklaratives Wissen
Vergleichsfaktor		
Art des Wissens	Konkrete Anweisungen bestehend aus Befehlen die in einer vorgegebenen Reihenfolge auszuführen sind.	Gibt den Rahmen vor , aber keinen konkreten Lösungsweg ; die Reihenfolge der Regelausführung wird von der Problemlösungskomponente übernommen.
Art der Darstellung	Algorithmen und Datenstrukturen	Daten, Tabellen, Datenbanken, Regeln, Constraints
Erweiterbarkeit für andere Problembereiche	Viele Abhängigkeiten, aufwändig zu ändern	Flexibel, einfach zu ändern
Wissen über Unwissenheit und Grenzen der Lösung	Gering, da quasi implizit	Hoch, da explizit
Lösungskomplexität für den Compiler	Gering, lineare Ausführung	Hoch, einzuordnen im „generate-and-test“ Schema
Laufzeit	Deterministisches Programm (lineare Laufzeit)	Nichtdeterministisches Programm, also Laufzeit im schlechtesten Fall $O(n^2)$ bzw. $(\rightarrow \infty)$ bei großen Verarbeitungsmengen
Programmierparadigma	Imperativ	Deklarativ/ Logisch
Programmiersprache	C, Java, C++	Prolog
Programmierung	Strukturiert, prozedural, modular	Funktional, logisch, regel-, und constraintbasiert

4.1.5 Unbeständiges, unvollständiges, unsicheres, unpräzises und vages Wissen

Bei der Lösung von komplexen, dynamischen Aufgaben durch Menschen, autonome Roboter oder selbstständig agierende Softwareprogramme, sogenannte Agenten, ist das Wissen naturgemäß unbeständig, unvollständig, unsicher, unpräzise und vage. [4, 18]

Unbeständiges Wissen über die Zeit bedeutet, dass sich aufgrund eines andauernden Kondensations- und Lernprozesses wie bei der parallelen Entwicklung von Produkten und Konfiguratoren, Strukturen, Merkmale, Herstellprozesse und andere Eigenschaften verändern können. [18]

Unvollständiges Wissen bedeutet, dass für einen plausiblen Handlungsplan oder eine Schlussfolgerung notwendige Informationen fehlen. Die Unvollständigkeit des Wissens liegt darin begründet, dass durch die Sinne bzw. Sensoren nur ein beschränkter Ausschnitt der Umwelt erfasst werden kann. Auch gespeichertes Wissen kann unvollständig sein, welches aus dem Kontext oder zu dem Zeitpunkt nicht mehr aufgenommen werden kann. Um Handlungspläne und Schlussfolgerungen erstellen zu können, kann über Annahmen fehlendes Wissen ergänzt werden. Eine Begründung zu dokumentieren ist vorteilhaft, um fälschlich getroffene Annahmen im Nachhinein revidieren und optimieren zu können. [4]

Unsicheres Wissen bedeutet, dass keine hundertprozentige Gewissheit über die Korrektheit oder Wahrheit des vorhandenen Wissens sowie der damit verbundenen Daten besteht. Dies kann durch fehlerhafte, durch unbekannte Umwelteinflüsse verfälschte und unzuverlässige sowie ungenaue Sensoren hervorgerufen werden. Auch das modellierte Wissen auf Basis von Expertenaussagen kann durch fälschlich getroffene Annahmen, Generalisierungen, fehlerhafte Wissensquellen oder noch unbekannte aber relevante Zusammenhänge unsicher sein. Das Wissen über die vorhandene Unsicherheit ist nicht oder nur bedingt durch ausreichende Untersuchungen oder Tests ermittelbar bzw. bekannt. [4, 118]

Unpräzises und vages Wissen bedeutet, dass aufgrund der Art der Wissensrepräsentation kein exakter Wert bekannt ist. Unpräzises Wissen enthält Bereichsgrenzen, wie „der Roboter hat eine Reichweite zwischen 1,4 Metern (m) und 2 m“. Vages Wissen ist eine relative, nicht eindeutige, kontextabhängige Aussage wie „der Roboter hat eine große Reichweite“. Präzises Wissen wäre hingegen, „der Roboter hat eine Reichweite von 1,6 m“. Zur Modellierung von vagem Wissen auf Basis einer nicht exakten Semantik stellt die Fuzzy-Logik nach ZADEH einen Ansatz dar. [4, 118]

4.2 Künstliche Intelligenz, Expertensysteme und wissensbasierte Konfiguratoren

Die Forschung zur Künstlichen Intelligenz (KI) wurde 1950 durch die Herstellung des ersten Computers initiiert und erlebte 1970 (Lernfähige Systeme, Expertensysteme), 1990 (Software-Agenten), 2010 (semantisches Web) und 2015 (Neuronale Netze) weitere Phasen des Aufschwungs. Generell ist das Ziel der künstlichen Intelligenz, menschliche Intelligenz und Fähigkeiten zu imitieren, sowie gleiche oder bessere Resultate zu erreichen. [111, 110] Hierbei unterscheidet BACH drei Arten der menschlichen Fähigkeiten: Die Fähigkeit, Modelle zu erschaffen (engl. intelligent), die Fähigkeit, Ziele zu erreichen (engl. smart), und die Fähigkeit, die richtigen Ziele auszuwählen (engl. wise). [110]

Definition Künstliche Intelligenz sowie drei Arten der menschlichen Fähigkeiten
<p>Künstliche Intelligenz (KI): "Wissenschaftliche, technische Disziplin, die sich bemüht um das Verstehen und Modellieren menschlicher Intelligenzleistungen anhand informationstechnischer Modelle (Rechnerprogramme als Prozessmodelle), die qualitative Leistungssteigerung und Erschließung neuer Anwendungsgebiete von Computern, Programmier- und Informationstechniken." [111, S. 7]</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Intelligent (engl. intelligent): Intelligenz ist die Fähigkeit, Modelle zu erschaffen. („Intelligence is the ability to make models“ [110]) 2. Schlau (engl. smart): Schlau ist die Fähigkeit, die eigenen Ziele zu erreichen. („Smart is the ability to reach your goals“ [110]) 3. Weise (engl. wise): Weise ist die Fähigkeit, die richtigen Ziele auswählen. („Wise is the ability to pick the right goals“ [110])

4.2.1 Einordnung von Expertensystemen und Konfiguratoren im Bereich der künstlichen Intelligenz

Die KI unterteilt sich in mehrere Spezialverfahren: Wissensrepräsentation, automatisches Beweisen, maschinelles Lernen, Kognition, neuronale Netze, Bildverarbeitung (auch Mustererkennung), Sprachverarbeitung und Expertensysteme, siehe Bild 35. Konfiguratoren sind eine Teilmenge von Expertensystemen und werden häufig mit der Konstruktion in Verbindung gebracht. Unter dem Begriff Konstruktion werden aber auch die einzelnen, veränderten Stadien eines Konstruktionsprozesses verstanden, auch (Produkt-)Konfigurationen genannt. Der Konstruktionsprozess fasst dabei die Summe der einzelnen Konstruktionsschritte zusammen. Wobei im Kontext dieser Arbeit Konfigurationen als mögliche finale Lösungsalternativen verstanden werden. [1, 111, 119]

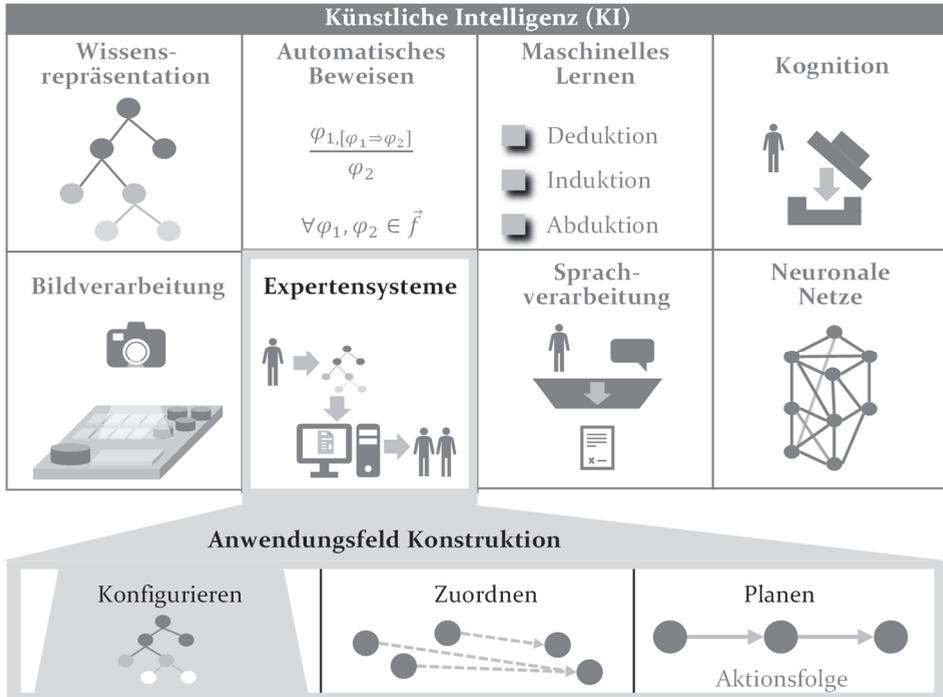


Bild 35: Einordnung von Konfiguration innerhalb von Expertensystemen als Teilbereich der künstlichen Intelligenz (KI) [engl. Artificial Intelligence (AI)] [1, 111, 119–121]

Expertensysteme bündeln die verschiedenen intelligenten Techniken zu einer nutzbaren Gesamtlösung [111].

Definition Expertensystem
<p>Nach HARTMANN: "Expertensysteme sollte man sich vorerst einmal als Programmsysteme vorstellen, mit denen die Fachkompetenz von Experten - die sich auf einem eng umgrenzten Bereich hervorragend auskennen - in einer Wissensbank gebündelt und EDV-gerecht zur Lösung von Problemen bereitgestellt wird. Da das Wissen eine zentrale Rolle spielt, werden Expertensysteme auch als wissensbasierte Systeme (Knowledge based systems) und die Datenverarbeitung mit wissensbasierten Systemen als Wissensverarbeitung bezeichnet." [120, S. 2]</p> <p>Nach STYCZYNSKI: „Wissensbasiertes System mit Schlussfolgerungs- oder Problemlösefähigkeit und teilweise hochentwickelter Interaktionsfähigkeit zum Einsatz in einem sehr eng begrenzten Spezialgebiet. Expertensysteme können im Einzelnen sehr unterschiedlich gestaltet sein (autonom, interaktiv).“ [111, S. 9]</p>

Im Kontext von Expertensystemen wird die Konfiguration als Teilmenge der Konstruktion von anderen wichtigen Problemlösungsmethoden abgegrenzt, siehe Tabelle 5. Dabei unterscheidet sich die Simulation durch eine Bestimmung des zeitlichen Verhaltens von Konstruktionsobjekten von der Konfiguration [122]. [1, 37]

Tabelle 5: Abgrenzung der wichtigsten Problemlösungsmethoden von Expertensystemen im Kontext der Konfiguration, Zitate aus [43, S. 10] und Primärquellen [121, 115]

Methode	Beschreibung der Problemlösungsmethoden
Konstruktion	„Die Lösung wird aus kleinen Bausteinen zusammengesetzt.“
Design	Konfigurierung von Objekten unter Berücksichtigung besonderer Anforderungen. (z. B. für Konfiguration und Planung) [115]
Zuordnen/ Diagnostik	„Die Lösung wird aus einer Menge vorgegebener Alternativen ausgewählt.“
Planung	„Entwurf einer Folge von Aktionen zum Erreichen eines Zieles.“
Vorhersage	„Ableitung von möglichen Konsequenzen gegebener Situationen.“
Simulation	„Aus dem Ausgangszustand werden Folgezustände hergeleitet.“

Im Bereich der Konstruktion wird zwischen dem Planen, Konfigurieren und Zuordnen unterschieden, siehe Bild 36.

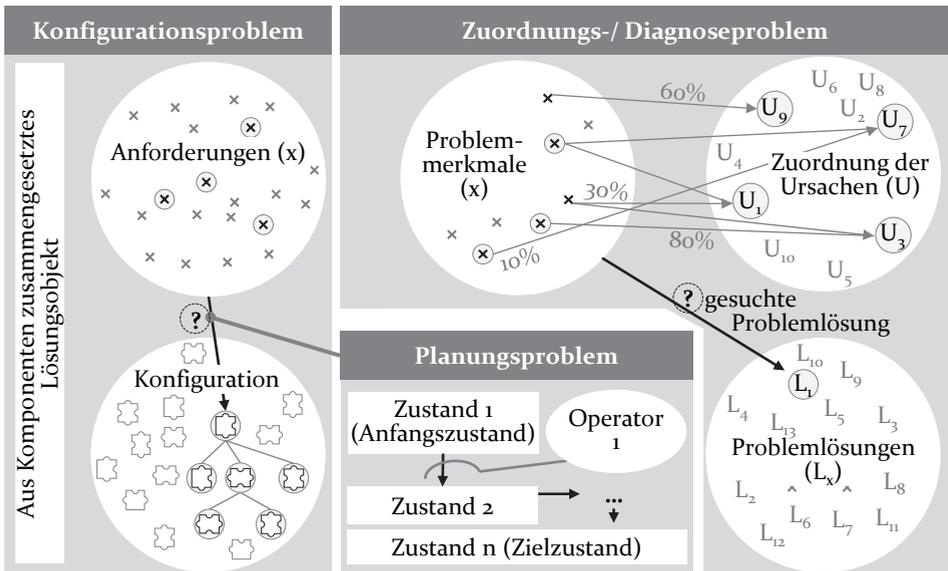


Bild 36: Gegenüberstellung der Grundstrukturen von Konfigurations-, Zuordnungs-, Diagnose- und Planungsproblemen [43]

Im Zuge der Konfiguration wird eine Anordnung von Elementen erstellt, die den vorgegebenen Rahmenbedingungen entspricht. Beim Zuordnen wird eine gegebene Menge von Objekten unter Beachtung von Restriktionen auf eine Zielmenge von Objekten abgebildet. Planen ist die Erarbeitung einer Aktionsstruktur, deren Durchführung eine vorgegebene Auf-

gabe löst. Planen als nicht monotoner Prozess berücksichtigt im Unterschied zum Konfigurieren den zeitlichen Aspekt. Durch aufeinander aufbauende Entscheidungen können Änderungen an früheren Zuständen entweder nicht durchgeführt werden oder nachfolgende Situationen müssen adaptiert werden. [1, 37, 119, 121]

4.2.2 Anforderungen an Experten(-systeme) und somit an Konfiguratoren

Für ein grundlegendes Verständnis werden zunächst Experten(-systeme) betrachtet, bevor auf die Konfiguratoren als spezielle Teilmenge von diesen eingegangen wird. Generell werden von Kunden an Experten(-systeme) bzw. Konfiguratoren mehrere Erwartungen gestellt, welche verschiedene Aspekte des Umgangs mit Wissen abdecken. [4, 43, 121]

Fachwissen und bereichsspezifisches Wissen: Der Experte besitzt spezifisches Fachwissen. Das Wissen liegt in Form von Fakten, Statistiken, Formeln, Regeln und Constraints vor. Ein Experte ist jemand, der in einem sehr begrenzten Fachbereich bereits einige der größten Fehler gemacht hat und somit diese zu vermeiden versteht (nach BOHR) [123]. Nach dem Ausschlussprinzip bleiben nur funktionsfähige Lösungen übrig.

Interview und Dialog: Der Experte ist in der Lage mit dem Kunden einen für den technischen Laien verständlichen Dialog zu führen, um das fall-, kontext- und kundenspezifische Wissen über das konkrete Problem und den Bedarf aufzunehmen. Dies erfolgt meist in Form von Fakten und wird auch direktes oder Objektwissen genannt.

Problemlösungsstrategie: Der Experte oder das System kann ein konkretes Problem in seinem Fachgebiet (methodisch) lösen, welches aus dem Kundeninterview bzw. -dialog ermittelt wurde. Zusätzlich besitzt ein Experte häufig Meta-, Strategie- und Steuerungswissen, d. h. dieser weiß, welche Maßnahmen in welcher Reihenfolge anzuwenden sind, um am effizientesten zu einer Lösung zu gelangen. Dieses Vorgehen basiert auf Erfahrung und kann in Form von Heuristiken nachgebildet werden.

Erklärung bzw. Lösungstransparenz: Der Experte kann die Problemlösungsstrategie und den -weg nachvollziehbar begründen oder falls vorhanden alternative Lösungswege sowie deren Vor- und Nachteile aufzeigen.

4.2.3 Wissensbasierte Konfiguratoren als Anwendungsbereich der künstlichen Intelligenz

Die Konfiguration ist einer der erfolgreichsten Anwendungsbereiche der künstlichen Intelligenz für Expertensysteme, die sich mit der Zusammenstellung komplexer Systeme aus einer Reihe einfacherer Module bzw. Komponenten beschäftigt. Konfiguratoren schaffen Mehrwert durch Arbeitszeit- bzw. Kosteneinsparung sowie durch eine beschleunigte, kosteneffiziente Erstellung von technischen und Angebotsdokumenten. Kundenspezifische Angebote ermöglichen einen besseren Preis im Vergleich zum Wettbewerb. Zusätzlich optimieren Konfiguratoren die Prozesse durch eine höhere Angebotsqualität, eine automatisierte Fehlervermeidung, standardisierte Lösungen und Transparenz. [1, 11, 120, 124]

Definition Konfiguration und Konfigurator

Konfiguration: Konfiguration ist ein Sonderfall der Entwurfstätigkeit, bei dem das zu konfigurierende Artefakt aus Instanzen eines festen Satzes von wohldefinierten Komponententypen zusammengesetzt ist. Diese werden entsprechend einer Reihe von Randbedingungen zusammengestellt. [11]

Konfigurator: „Ein Produktkonfigurator bzw. Variantenkonfigurator ist ein Werkzeug (Vertriebssoftware oder Angebotssoftware), welches den Anwender bei der Auslegung (Selektion und Kombination) eines nach Eigenschaften (Anwendungsmerkmale und Ausprägungen) zusammensetzbaren Produktes wissensbasiert (Auswahl- und Beziehungswissen) unterstützt. Ein Produkt oder eine Dienstleistung wird schrittweise nach Eigenschaften (Kundensicht, Anwendungssicht) und Regeln (Baubarkeit) automatisiert konfiguriert bzw. zusammengestellt und die Prozesse zwischen Kunden, Vertrieb, Technik und ERP effektiv und effizient unterstützt. Die Anwendungsbereiche sind zu unterscheiden nach Angebotskonfiguration (z. B. CPQ), Entwicklung/Konstruktion (z. B. Design Automation) und ERP (z. B. Stücklistengenerierung).“ [125]

Konfigurationssysteme wurden für eine Reihe von Bereichen entwickelt und erfolgreich angewendet, wie z. B. in der Elektronik-, Computer- und Telekommunikationsindustrie, im Vertrieb, im chemischen Design und im Industrieanlagenbau. [1, 11, 120, 124] „Primärer Nutzen dieses integrierten Systems ist die Möglichkeit, auf verteilte Informationen lokal zuzugreifen, bei komplexen Problemen der Angebotsbearbeitung eine Entscheidungsunterstützung zu erhalten und Teile des Angebotserstellungsprozesses zu automatisieren.“ [1, S. 1–2] Hierbei werden sowohl implizite als auch explizite Kundenanforderungen berücksichtigt. Entscheidungen können bei konkurrierenden Zielen und Anforderungen unter Berücksichtigung der Präferenz der Interessensgruppen gezielt adaptiert werden. Auch aufwendig bzw. nur bedingt abbildbare Wissensressourcen können durch interak-

tive Problemlösungsmechanismen, wie Konfiguratoren als intelligente Assistenten, zur Anwendung gebracht werden. Hierbei kann zwischen einer Neu- und einer Anpassungskonfiguration unterschieden werden. Letztere verändert eine bestehende Lösung und reduziert somit den initialen Dateneingabeaufwand. [1]

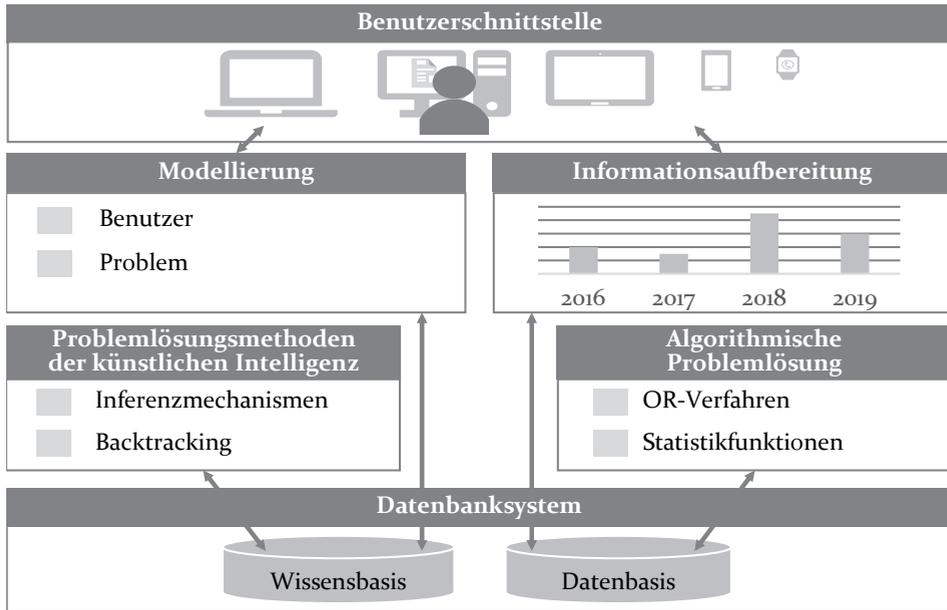


Bild 37: Generelle Bestandteile eines wissensbasierten Konfigurators [1, 4, 11, 111]

Die Konfiguration ist ein Sonderfall der Entwurfstätigkeit, bei dem das zu konfigurierende Artefakt aus Instanzen eines festen Satzes von wohldefinierten Komponententypen zusammengesetzt wird, die entsprechend einer Reihe von Randbedingungen zusammengestellt werden können. Komponententypen werden ferner durch Attribute, wie z. B. „Gewicht“ oder „Preis“, charakterisiert und repräsentieren Mengen alternativer Komponenten (Instanzen). Komponenten sind über Teilbeziehungen, auch als Aggregationen bezeichnet, miteinander verbunden, z. B. ist ein Endeffektor Teil einer Roboterzelle. Daneben existierende Generalisierungsbeziehungen werden auch als Taxonomien bezeichnet, z. B. ist der KR500 ein Roboter. Konfiguration ist typischerweise wissensbasiert, da diese auf Produktdomänen und Problemlösungswissen aufbaut. Den verschiedenen Problemlösetypen, wie der Konfiguration, lassen sich Basistechniken der Wissensverarbeitung und Repräsentation zuordnen. Die wichtigsten sind Regeln, eine objektorientierte Darstellung und Constraints, siehe Bild 38. [11, 18, 43, 124]

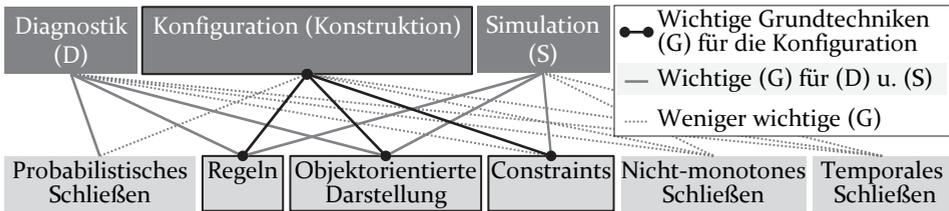


Bild 38: Zuordnung der Problemlösungstypen Konfiguration, Diagnostik und Simulation zu Basistechniken der Wissensverarbeitung und -repräsentation. [43]

4.2.4 Generelle Phasen bei der Entwicklung von Produktkonfiguratoren von Maschinen und Anlagen

Die Phasen bei der Entwicklung von Produktkonfiguratoren für Maschinen und Anlagen als technische Produkte sind: (1) Strukturieren, (2) Standardisieren des Produktportfolios, (3) Wiederverwenden und (4) Generieren von Planungselementen, siehe Bild 39. Aufbauend auf diesen Phasen kann ein (5) Produktkonfigurator entwickelt werden, der vollautomatisch kundenindividuelle Produkte inklusive benötigter Dokumente konfiguriert. [126]

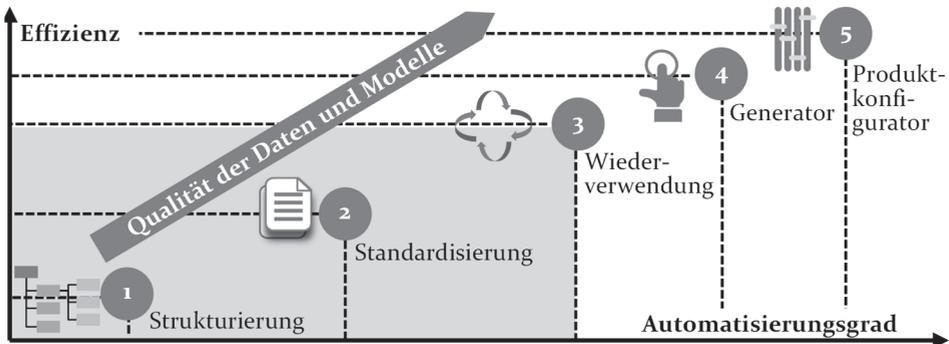


Bild 39: Vier Phasen wissensaufbereitender Maßnahmen hin zur Konfiguration [126]

(1) Strukturierung: Eine Strukturierung von Maschinen und technischen Anlagen mittels Strukturvorschriften beschleunigt und erleichtert den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess. [126]

(2) Standardisierung des Produktportfolios: Das Ziel der Standardisierung des Produktportfolios ist es, aus wiederverwendbaren Baugruppen ein kundenindividuelles Produktangebot zu erstellen. Dafür werden Produktstrukturen und Projektvorlagen erstellt, die gängige Standards und Normen des Marktumfeldes abdecken und das Unternehmenswissen in kondensierter Form für die Entwickler zugänglich machen. [126]

(3) **Wiederverwendung:** Vielfach auftretende Teilpläne, -konstruktionen und -schaltungen werden in Makroform angelegt. Durch die Verwendung von Variablen kann die Makrobibliothek effizient gewartet werden. [126]

(4) **Generator:** Der nächste Schritt besteht in der Kopplung von einzelnen kleineren Makros, um häufig auftretende Teillösungen aus Sub-Elementen basierend auf zuvor eingegebenen Parametern zu generieren. Hierbei kann bereits ein Teil der Engineeringprozesse und -dokumente basierend auf Templates automatisiert generiert bzw. befüllt werden. [126]

(5) **Produktkonfigurator:** Die zuvor generierten modularen Teillösungen, Engineeringschritte in Form von Makros und Templates sind die Grundlage, um einen automatisierten Produktkonfigurator zu entwickeln. [126]

4.2.5 Vorhandene Methoden zum Wissenserwerb und zur Wissensaufbereitung für wissensbasierte Systeme

Einen groben Rahmen zum Wissenserwerb von der Identifikation, der Formalisierung und Implementierung bis hin zum Testen des Wissens sowie zur iterativen Optimierung stellt BUCHANAN vor, siehe Bild 40. Mit einem zunehmenden Wissensstand ist es notwendig, iterativ die dahinterliegenden Konzepte zu optimieren, das Wissen aufzubereiten und neu zu formalisieren, um weitere Potentiale und Lösungen zu ermöglichen. [127]

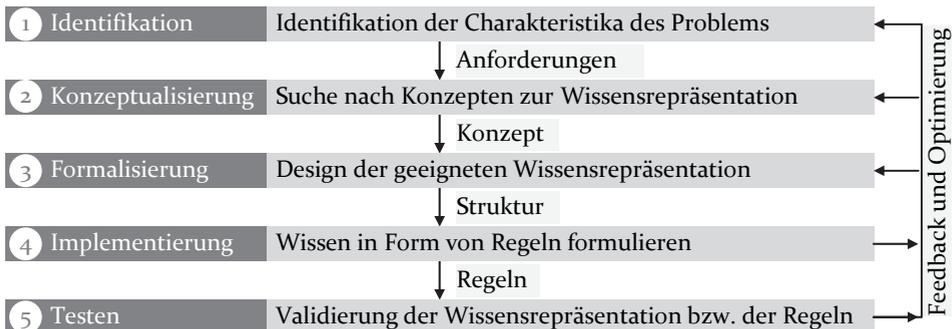


Bild 40: Abstrakter, genereller Ablauf und Stufen des Wissenserwerbs [127]

Für den Wissenserwerb sind aus den verschiedenen Fachdomänen, wie der Wissensverarbeitung [4, 109, 128], des Anforderungsmanagements [129, 130] sowie des UCD [106, 117], unterschiedliche Grundtechniken entstanden. Die Synthese der Techniken wird in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Methoden zur Wissensakquise zusammengestellt aus den Bereichen Wissensverarbeitung, Anforderungsmanagement und UCD [4, 43, 109, 128–130]

Methoden	Beschreibung
Befragungs- und Aufbereitungstechniken	
Spontane Interaktion	Dokumentation von spontan diskutiertem Wissen und Ideen
Workshop	Workshop mit Beteiligten zur Kondensation des Wissens
Introspektion, Abläufe durchdenken	Abläufe schrittweise (laut) durchdenken und dokumentieren, z. B. in einer Prozesssprache wie BPMN
(Experten-)Interview	Strukturierte Befragung von Experten und Interessensgruppen
Kartentechnik	Vorgedruckte aufgabenspezifische Karten als Inspiration
Fragebogen	Vorbereiteter Fragebogen als strukturierende Maßnahme
Expertenmodellierung	Formalisierung des Wissens in einer formalen Sprache
Kreativitätstechniken für offene Aufgabenstellungen	
Brainstorming	Offene, spontane Ideensammlung durch mehrere Personen
Mind-Mapping	Grafische Darstellung von Elementen, Strukturen und Abhängigkeiten
Perspektivenwechsel	Annehmen unterschiedlicher Rollen entlang der Besprechung
Beobachtungstechniken	
Lehrlingsmethode/ Feldbeobachtung	Laie beobachtet Experten bei der Arbeit, dokumentiert alle Prozessschritte und versucht, diese direkt zu reproduzieren
Versuch und Irrtum	Ausprobieren und Dokumentation praktikabler Lösungswege
Vergangenheitsorientierte Techniken	
Systemarchäologie	Analyse bestehender Systeme und der Erfahrungen hieraus
Wiederverwendung	Wiederverwendung von Elementen historischer Projekte
Dokumentenanalyse	Auswertung von Kunden- bzw. internen Dokumenten
Literaturauswertung	Verwendung von Modellen, Formeln, Falldaten, Statistiken oder weiterem Wissen aus der öffentlich verfügbaren Literatur
Prozess Mining	Extraktion von Prozessen und Abläufen aus IT-Systemen
Feedback durch Prototypen und anwendungsorientierte Techniken	
Prototypenbau	Prototypen (Simulation, real) anhand von Basisfunktionen
Interessensgruppentests über Prototypen	Erstellung eines Teilprototypen z. B. mittels Excel Worksheets oder Klickprototyp für einen partiellen Interessensgruppentest
Produkttest	Beobachtung und Feedback zur Produktinteraktion

Insbesondere das Experteninterview ist für den Wissenserwerb und dessen Identifikation von Bedeutung. Hierbei werden Experten befragt. Die Lösung ist jedoch teils unvollständig, da Experten häufig für sie einfache Details nicht explizit kommunizieren und erklären. Nach dem 7-stufigen Ansatz von KVALE kann ein Experteninterview aus (1) Thematisierung, (2) Entwurf, (3) Interview, (4) Übertrag, (5) Analyse, (6) Verifizierung und (7) Bericht aufgebaut werden [128]. Ein weiterer Ansatz zur Entwicklung von wissensbasierten Systemen wird von PUPPE vorgeschlagen, siehe Bild 41. Die Reproduzierbarkeit, Skalierbarkeit und Arbeitsteilung bei der Entwicklung werden nicht adressiert. [43]

Phasen	Beschreibung	Durchführung	Hilfsmittel
1 Problemcharakterisierung	Identifikation der Problemlösungsstrategie und der Wissensrepräsentation	Wissensingenieur befragt Experten	Interviewtechniken und Protokolle
2 Shell-Entwicklung	Bereitstellung eines Expertensystem-Shells mit komfortabler Wissenserwerbskomponente	Auswahl oder Neuentwicklung durch den Wissensingenieur	Allgemeines Expertensystemwerkzeug
3 Aufbau der Wissensbasis	Formalisierung des Expertenwissens z. B. in Form von Regeln oder Constraints	Experte, eventuell unterstützt durch Wissensingenieur	Shell, Eingabemaske
4 Wartung der Wissensbasis	Tuning und Weiterentwicklung, Anpassung an neue oder geänderte Anforderungen	Experte, eventuell unterstützt durch automatische Analysetechniken	Falldatenbank

Bild 41: Allgemeine Methode zum Aufbau eines wissensbasierten Systems [43]

4.3 Wissensrepräsentation für informationstechnische Systeme und Konfiguratoren

Für ein besseres Verständnis einer generellen Architektur und der dahinterliegenden Mechanismen bei wissensbasierten Konfiguratoren wird im Folgenden die Wissenstrennung in die Kategorien Zustände, Testprädikate, Zustandsoperatoren und Gewinnstrategie im Detail erläutert.

4.3.1 Wissenstrennung

Ein strukturierter und nachhaltiger Umgang mit Wissen wird nur in wenigen Bereichen konsequent umgesetzt. Wissensbasierte Systeme stellen einen Ansatz dar, explizit mit Wissen umzugehen. Der primäre Unterschied zwischen konventionellen und wissensbasierten Softwaresystemen ist, dass ein Großteil des Wissens in einzelnen Kategorien bzw. Sub-

modellen aufbereitet wird. In einem wissensbasierten System werden die Problemlösungsstrategie sowie der Lösungsalgorithmus und das Expertenwissen, z. B. in Form von Regeln oder Constraints, explizit getrennt. In einem konventionellen Softwaresystem sind diese meist in einer Methode und den darin enthaltenen Algorithmen und Datenstrukturen quasi implizit eingebettet, siehe Bild 42. [4, 43]

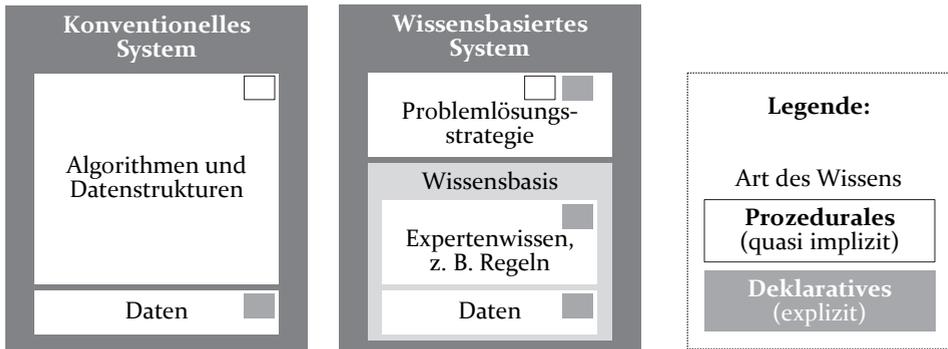


Bild 42: Gegenüberstellung wissensbasierter und konventioneller Softwaresysteme [4, 43]

Die Wissensarten können noch detaillierter in Zustände, Testprädikate, Zustandsoperatoren und Gewinnstrategie eingeteilt werden. Bei Problemstellungen bzw. Spielen wie dem Schach wird das statische Problem mit einem Ausgangszustand (Startaufstellung), den Spielregeln (Zielzustand, indirekt beschrieben durch die Siegesbedingungen bzw. „Mattbedingungen“) und der zulässigen Operationen (Bewegungsoperationen der einzelnen Figuren), beschrieben. Die Gewinnstrategie ist in der Beschreibung von Spielen oder technischen Problemen selten enthalten. Die statische Repräsentation des Problems sollte von den strategischen Überlegungen, „wie“ zu spielen oder ein Problem zu lösen ist, freigehalten werden. Eine klare Trennung in die Wissensarten wird empfohlen, da hierdurch eine arbeitsteilige Entwicklung und eine skalierbare Wiederverwendung von Wissensenselementen ermöglicht wird. Nachfolgend eine Übersicht; die weiteren Details und Repräsentationen werden in den jeweiligen Unterkapiteln behandelt. [4, 43, 121]

- **Zustände/ Strukturwissen:** Statisches Wissen, Zustand $Z(t)$ zu einem Zeitpunkt, unterteilbar in Start-, Zwischen- und Zielzustand.
- **Testprädikate/ Kontrollwissen:** Kontrolle bestehender Lösungen; diese können auch im „Generate-And-Test“-Verfahren vom Solver zur Lösungsfindung verwendet werden.

- **Zustandsoperatoren/ Prozesswissen:** Dynamisches Wissen, explizite Darstellung der verfügbaren Operatoren und deren Kombination, um von einem Startzustand zu einem Zielzustand zu gelangen; dies repräsentiert die Veränderung über die Zeit.
- **Gewinnstrategie/ Lösungswissen:** Explizite Repräsentation des Lösungsprozesses z. B. in Form eines Algorithmus oder eines Solvers aus der logischen Programmierung

4.3.2 Zustände als statische Wissensrepräsentation

Zustände $Z(t)$ sind eine Form der statischen Wissensrepräsentation und stellen eine Momentaufnahme zu einem gewählten Zeitpunkt dar. Im Rahmen einer lösungsorientierten Problemrepräsentation kann in Startzustand, Zwischenzustand und Zielzustand unterschieden werden. Die Form der Beschreibung des Zielzustandes in impliziter oder expliziter Darstellung führt zur Unterscheidung in Such- oder Routenprobleme. [4, 131]

- (1) **Startzustand $Z_s(t)$, Anzahl (1-n):** Eine explizite Beschreibung ist in den meisten Fällen durch das Modellieren der Ausgangslage möglich.
- (2) **Zwischenzustand $Z_w(t)$, Anzahl (0-n):** Explizit geforderte Zwischenlösung, z. B. bei der Routenplanung über ein Zwischenziel.
- (3) **Zielzustand $Z_z(t)$, Anzahl (1-n):** Die Form der Beschreibung ist von der Art des Problems abhängig, also Such- oder Routenproblem.

Am Beispiel des Routen-/ Planungsproblems wird die Relevanz von explizit repräsentierten Zuständen $Z(t)$ veranschaulicht. Ist der Zielzustand explizit beschrieben, fokussiert sich die Aufgabenstellung auf die Generierung einer Prozesskette und Maßnahmen zur Zustandsänderung aus zulässigen Operationen, z. B. Bewegungen, die von der Startkoordinate $Z_s(t_1)$ zu der Zielkoordinate $Z_z(t_2)$ führen. Dies ist relevant bei der Bahnplanung von autonomen Robotern oder der Kombination von Fertigungsprozessschritten zur Herstellung eines Produktes, siehe Bild 43.[4, 131]

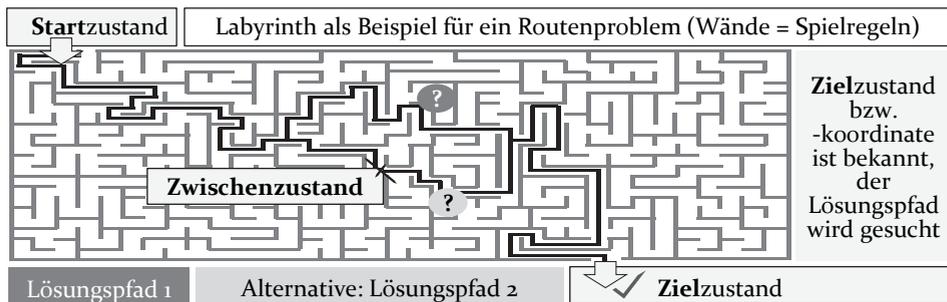


Bild 43: Ein Labyrinth als Beispiel für ein Routenproblem, bei dem der Zielzustand bekannt ist und der Lösungspfad gesucht wird. [4, 43]

4.3.3 Testprädikate als Validierungswissen

Ein Testprädikat kann sowohl im Lösungsprozess zum Generieren, zur Kontrolle der Qualität einer Lösung oder zum Festlegen eines gewissen Zustands, wie „Spiel ist gewonnen“, verwendet werden. Ein Testprädikat, z. B. in Form einer Regel, beschreibt „was“ zusammen funktioniert, zulässig oder zum Erreichen eines Zustands gefordert ist. Durch Constraints wird im Gegensatz zu Regeln eher beschrieben, „wie“ und „weshalb“ etwas zusammen funktioniert. [4] Beispielsweise wird die Darstellung der Korrektheit und der Veränderung einer gesprochenen oder einer Programmiersprache durch Regeln festgelegt. Allgemein legt eine Sprache die Regeln für die Darstellung und Veränderung von Modellen fest. Eine Übersicht der Testprädikate befindet sich in Tabelle 7. Auf das im Rahmen der wissensbasierten Konfiguration wichtige Constraint-Satisfaction-Problem wird in Kapitel 4.4.2 im Detail eingegangen. [110, 111]

Tabelle 7: Übersicht implementierbarer Testprädikate [43, 49, 111, 122, 132]

Darstellung	Beschreibung
Regel	(1) Geordnetes Paar aus Bedingung(en) und Aktion(en) (Entscheidungen). „Eine Regel „trifft zu“, wenn alle angegebenen Voraussetzungen eingetreten sind.“ [132, S. 2] Häufig in der Sequenz von Prämisse (WENN / If) und Schlussfolgerung (DANN / Then) oder Bedingung (WENN) und Aktion (DANN). [111] (2) Definierte Ableitungsrichtung vorgegeben
Regeltabelle auch Entscheidungstabelle	(3) Tabellarische Strukturierung von Regeln bzw. Aktionen für konkrete Anwendungsfälle. „Die Entscheidungstabelle ist ein tabellarisches Beschreibungsmittel für formalisierbare Entscheidungsprozesse.“ [132, S. 2]
Constraint auch Bedingung, Einschränkung	(4) Mengenlehre: Aussage über nichtzulässige und zulässige Verbindungen bzw. die zu erfüllenden Ungleichungen oder Gleichungen (5) Keine definierte Ableitungsrichtung und daher nicht lineare Lösungsprozesse

4.3.4 Zustandsoperatoren als Veränderungswissen

Zustandsoperatoren (ZO) sind eine Form der dynamischen Wissensrepräsentation, welche das Transformationswissen von einem Zustand zu einem anderen Zustand abbilden und welche die Gesamtheit der zulässigen Operationen beschreiben, $Z(t_1) \text{-(ZO)-> } Z(t_2)$, siehe Bild 44. In der Regel

werden die Operatoren indirekt angegeben, d. h. mittels Funktionen, die aus vorgegebenen Startzuständen Nachfolgezustände ermittelt. [4, 43, 110]



Bild 44: Zustände und Zustandsoperatoren [43]

Funktionen, Algorithmen oder Methoden sind Repräsentationsformen von zustandsverändernden Operatoren. Bei Funktionen kann zwischen Determinismus und Indeterminismus unterschieden werden. Determinismus bedeutet, dass die Übergangsfunktion zeitunabhängig ist. Im Fall von Indeterminismus ist die Übergangsfunktion veränderlich und diese kann im Extremfall bei jedem Durchlauf unterschiedlich sein. [4, 110]

4.4 Suchverfahren und -probleme

Suchverfahren sind Lösungskonzepte für wissensbasierte Systeme. „Viele Aufgaben, die von intelligenten Systemen zu lösen sind, lassen sich auf eine Suche in einem Zustandsraum zurückführen. Daher spielen effiziente Suchverfahren eine bedeutende Rolle als grundlegende Methode der künstlichen Intelligenz.“ [4, S. 14] Zur Problemlösung sind mehrere Wissensarten relevant: Das Steuerungs-, das Kontroll- und das strategische Wissen. Mit diesen wird ein Zielzustand oder ein Pfad berechnet, ausgehend von einem Start- und optional über einen Zwischenzustand, siehe Kapitel 4.3.1 und 4.3.3. Die Pfadplanung für mobile Roboter ist ein Beispiel für ein Suchproblem. Anhand eines vorgegebenen Optimierungskriteriums wie „schnellste“ oder „kürzeste Route“, soll der Solver einen gültigen Pfad berechnen. Ein Konfigurationsproblem kommt einem Labyrinth mit beweglichen Wänden gleich. Die Wände repräsentieren die gesetzten Konfigurationsparameter bzw. Anforderung, welche die möglichen Pfade bzw. Lösungen einschränken. Der Zielzustand ist kein eindeutiger Zustand, sondern nur anhand von Zielkriterien definiert wie „der Zustand muss außerhalb des Labyrinths sein“. Somit muss der Solver je nach Verschieben der Wände (Veränderung der Anforderungen) eine neue geeignete Route zum Zielzustand (gültige Konfiguration) berechnen. Hierbei können null bis unendlich viele alternative Lösungsmöglichkeiten formal korrekt sein. [131]

4.4.1 Kategorien von Suchverfahren

Die Suche spielt eine zentrale Rolle im Rahmen der künstlichen Intelligenz, da sich die meisten Probleme als Suchproblem formulieren lassen. Hierfür

ist eine Zustandsraumrepräsentation des Problems notwendig, welche aus Problemlösezuständen und Zustandsoperatoren besteht. So lassen sich auch die Aufgaben der Konfiguration und des Planes als Suchproblem beschreiben. Hierbei kann zwischen informierter und uninformierter Suche, z. B. Tiefen- und Breitensuche, unterschieden werden. [131] „Einfache Suchverfahren wie die klassische Tiefen- oder Breitensuche, die kein zusätzliches Wissen aus dem Anwendungsbereich nutzen, scheitern im Allgemeinen aufgrund der exponentiellen Größe des Suchraums. Oftmals lässt sich jedoch Wissen über die konkrete Anwendung dazu verwenden, um Schätzungen über die Erfolgsaussichten eines Lösungskandidaten abzugeben und auf diese Weise die Suche deutlich zu beschleunigen. Diese Art von Wissen, die auch heuristisches Wissen genannt wird, ist von grundlegender Bedeutung für intelligente Systeme.“ [4, S. 15]

Suchproblem, Z_z ist implizit repräsentiert: Bei der Suche des Zielzustands wird dieser nur implizit durch Testprädikate z. B. in Form von Regeln oder Constraints beschrieben, siehe Bild 45. Die Aufgabenstellung fokussiert das Finden einer zulässigen Lösung wie bei der Konfiguration einer technisch funktionsfähigen Automatisierungslösung, welche zusätzlich die geforderten Kundenanforderungen erfüllt. [4, 131]

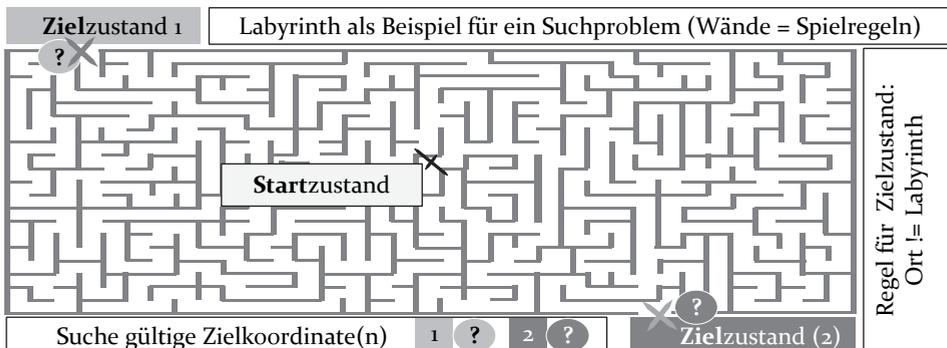


Bild 45: Labyrinth als Suchproblem, bei dem Zielzustände gesucht werden und die Regeln definieren, wann der Zielzustand erreicht ist [4, 43]

4.4.2 Constraint Satisfaction Probleme

Beim Engineering von mechatronischen Systemen treten eine Vielzahl von Wechselwirkungen sowie Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Modulen auf. Vor allem zirkuläre Interdependenzen sind eine häufige Herausforderung, was in der Praxis zyklische bzw. iterative Entwicklungsansätze erfordert. Häufig werden verschiedene Planungsgrößen bereits zu Projektbeginn benötigt, auch wenn diese erst nach dem Abschluss des Engineerings

final zur Verfügung stehen. Diese Wechselwirkungszyklen beeinflussen den gesamten Konfigurationsprozess. Constraints können zu Deutsch mit Abhängigkeiten, Einschränkungen oder Restriktionen übersetzt werden. Aufgrund der Verbreitung des Begriffs Constraint in der Fachliteratur, wird dieser im Folgenden verwendet. [122]

Dabei sind Constraint Satisfaction Probleme eine wichtige Unterklasse von Suchproblemen. Die Constraint Programmierung ist um 1980 als eigenständiges Forschungsgebiet im Bereich der künstlichen Intelligenz entstanden und erlangte 1990 erstmals eine besondere Relevanz in Wissenschaft und Praxis sowie im Bereich der Konfiguration. Die Grundidee wird von einigen als der „Heilige Gral“ der Programmierung bezeichnet. Der Mensch gibt deklarativ das Problem vor, welches der Computer löst. Constraints beschreiben „weshalb“ und „unter welchen Bedingungen“ eine Lösung zulässig ist. Mit Constraints wird somit weder ein direkter Lösungsweg noch eine konkrete Maßnahme vorgeschrieben, sondern lediglich ein möglicher Lösungsraum eingeschränkt. Mithilfe von Constraints können Suchprobleme beschrieben werden. Eine andere Möglichkeit ein Constraint Problem zu erklären, ist mathematisch mithilfe der Mengenlehre als Kombination von Schnittmengen (Constraints), welche den möglichen Lösungsraum auf die funktional zulässigen Lösungen einschränken. [34, 49, 122]

Definition Constraint
„Der Begriff Constraint bezeichnet ein sprachliches Konzept zur deklarativen Beschreibung von Bedingungen und Relationen zwischen Variablen oder Objekten mit dem Ziel einer effizienten Modellierung und Lösung von Problemen, über die nur unvollständige Information vorhanden ist.“ [34, S. 205]

Ein einfaches Beispiel für ein Constraint-Problem ist das pythagoreische Tripel zur Berechnung der Seitenlängen für ein rechtwinkliges Dreieck (2) oder das Ohmsche Gesetz (3). Für einen Definitionsbereich der Variablen von 1 bis 100 sind mögliche Lösungen für das Tripel für (2) z. B. $(x_1, y_1, z_1) = (3, 4, 5)$ oder $(x_2, y_2, z_2) = (5, 12, 13)$ möglich. [34, 49]

Constraint 1:	$x^2 + y^2 = z^2 \wedge x, y, z \in \{1, \dots, 100\}$	(2)
Constraint 2:	$U = R \cdot I$	(3)

Eine andere Möglichkeit Constraints zu repräsentieren die graphische Darstellung über Schnittmengen. Dabei wird der mögliche Lösungsraum auf die zulässigen und korrekten Lösungen eingeschränkt, siehe Bild 46. Der gesamte Lösungsraum schließt dabei alle innerhalb der gegebenen Systemgrenzen potentiellen Konfigurationen ein. [1, 49]

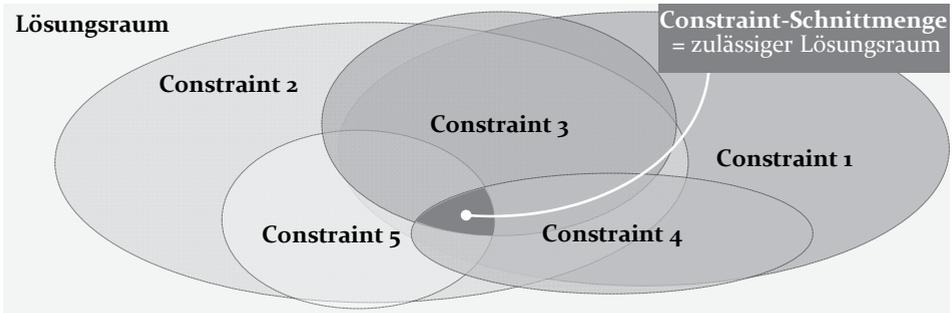


Bild 46: Beschreiben eines Suchproblems am Beispiel der Mengenlehre, wobei Constraints den Lösungsraum auf die zulässigen Lösungen einschränken [34, 122]

Neben einer reinen formelbasierten Darstellung stellen Abhängigkeits- bzw. Constraintnetze eine graphische Repräsentationsmöglichkeit von Constraints und deren Wechselwirkung dar. Durch ein Abhängigkeitsnetz können die Verbindungen aller Variablen und Attribute visualisiert werden. Einfach verständlich ist die Darstellung für wenige Eingangsparameter auf einen Ausgangsparameter, theoretisch können die Gleichungen beliebig viele Parameter enthalten. Durch gerichtete Vektoren und eine dementsprechende Umstellung der Constraintgleichungen kann eine auf empirischem Wissen basierende, sinnvolle Berechnungsreihenfolge für den Leser und Interpretier mit angegeben werden. Durch die zu bestimmenden Constraints werden die aus logischer Perspektive erforderlichen Variablen festgelegt. [34, 49, 122]

Für einen einfachen Roboterkonfigurator wurde ein Beispiel für ein Abhängigkeitsnetz in Bild 47 erstellt.

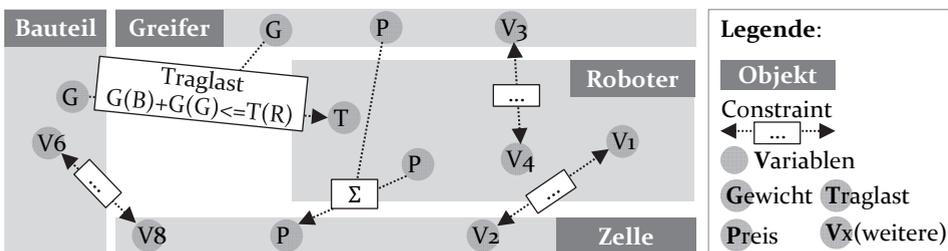


Bild 47: Constraint- bzw. Abhängigkeitsnetz mit eigenem Beispiel sowie Erweiterung im Kontext der Robotik mit der Grunddarstellung nach [34, 122]

Trotz der umfangreichen Literatur zum Thema wissensbasierte Konfiguratoren scheitern immer noch viele Konfiguratorenentwicklungsprojekte. Gründe hierfür sind unter anderem [133], dass

- der Lösungsumfang unzugängliches Wissen beinhaltet,

- die Entwicklungskosten des Konfigurators die Budgets übersteigen,
- eine fehlende Eignung des zu konfigurierenden Produktes basierend auf den verfügbaren Methoden vorliegt,
- eine ungeeignete Softwareumgebung verwendet wird,
- der Konfigurator nicht den Wünschen und Bedürfnissen der Organisation entspricht,
- die Konfiguratorarchitektur die Wartung erschwert sowie
- Konfiguratoren aufgrund mangelnder Benutzerakzeptanz nicht ausreichend genutzt werden.

Eine Ursache ist, dass eine Wiederverwendung von Komponenten über mehrere Konfiguratoren hinweg kaum adressiert bzw. nur schwer möglich ist [134]. Daher sind sowohl ein strategisch ganzheitlicher Ansatz sowie eine Entwicklungsmethode notwendig, welche in Kapitel 5 und Kapitel 6 vorgestellt werden. [133]

5 Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen

Roboterzentrierte Automatisierungslösungen (RA) versprechen mehr Effizienz und Qualität in der Produktion sowie die Entlastung der Arbeitnehmer von körperlich anstrengenden und gefährlichen Tätigkeiten. Roboter können beispielsweise Be- und Entladevorgänge von Maschinen wie Fräszentren oder Prüfautomaten vollautomatisch durchführen. Dies ermöglicht eine höhere Auslastung der vorhandenen Maschinen und führt damit zu einer schnelleren Amortisation sowie zu wirtschaftlichen Vorteilen. Dennoch werden RA aufgrund ihrer hohen Komplexität und Kosten nur bedingt bei kleineren und mittleren produzierenden Unternehmen eingesetzt. In der Regel entstehen die hohen Kosten von RA durch ein individuelles Engineering, das bis zu 70 Prozent der Anschaffungskosten einnimmt. Aus diesem Grund ist eine Optimierung des Engineerings von RA notwendig. [P9, 33]

Folgende Forschungsfrage soll daher beantwortet werden:

- 1) Kann das Engineering von roboterzentrierten Automatisierungslösungen skalierbar optimiert und vereinfacht werden?

Bislang werden Konfiguratoren allerdings primär für die Individualisierung von Produkten, wie z. B. Automobile oder Kleidung auf Basis der vom Hersteller vordefinierten Varianten und weniger für das Engineering von Automatisierungslösungen eingesetzt [135]. Anhand eines web- und wissensbasierten Engineering-Konfigurators wird das Potential für eine Effizienzsteigerung im Engineering für roboterzentrierte Automatisierungslösungen geprüft.

Einzelne Aspekte der Ausführungen der Kapitel 5.1 bis 5.4, welche die Umsetzung und Evaluierung beschreiben, sind an die am Lehrstuhl FAPS entstandenen und vom Autor kobetreuten studentischen Arbeiten [S1–S17] angelehnt. Bestandteile und Vorarbeiten der dargestellten Methoden und Erkenntnisse wurden der internationalen Fachwelt auch in den vom Autor erstellten Veröffentlichungen [P1, P3, P5–P7, P9, P11–P17] zugänglich gemacht, die Abschnitte und Abbildungen sind entsprechend gekennzeichnet.

5.1 Inhaltliche und wissenschaftliche Abgrenzung

Aufgrund der Komplexität und Interdisziplinarität eines Engineering-Projekts ist dessen Realisierung bisher nur durch die Kompetenz verschiedener Spezialistengruppen oder eines Systemintegrators möglich. Anhand der im Kapitel 2, 3 und 4 beschriebenen Literatur wird ersichtlich, dass durch wissensbasierte Systeme und Webtechnologien das Potential besteht die, Grobplanung (siehe Bild 48) von RA zu optimieren. [13, 31, 33]

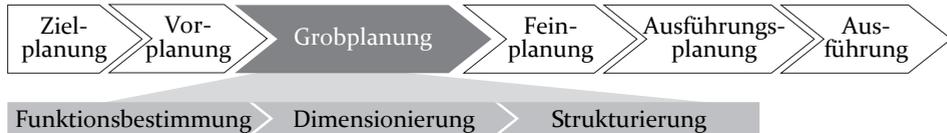


Bild 48: Genereller Bedarf an Methoden zur Entwicklung von Engineering-Konfiguratoren für die Grobplanung von roboterzentrierten Automatisierungslösungen [31]

Darüber hinaus bietet die Bereitstellung wissensbasierter Engineering-Konfiguratoren über eine Webplattform ein großes Potential. Mittels Webplattformen ist es möglich, mehrere Zielgruppen, wie z. B. Kunde, Hersteller und Systemintegrator, gleichzeitig zu bedienen. Durch Vernetzungs- und Vermittlungsdienstleistungen werden neue Wertschöpfungsnetzwerke geschaffen und der Marktzugang für kleine Spezialanbieter erleichtert. Die Webplattform wird wie folgt definiert: [11, 20, 136]

Definition Webplattform
Die Idee der Webplattform setzt sich aus den Begriffen Website und Internetplattform zusammen. Hierbei kombiniert die Webplattform verschiedene Funktionen, Services bzw. Microservices zu einer ganzheitlichen, auf eine oder mehrere Zielgruppe(n) spezialisierten Lösung. Der Zugriff auf dieses Lösungspaket kann über eine Website oder Webschnittstellen erfolgen.

5.1.1 Wissensbasierter Produktkonfigurator (PK) versus wissensbasierter Engineering-Konfigurator (EK)

Aufgrund der verschiedenen iterativen Planungsphasen von Automatisierungslösungen ist der Funktionsumfang von wissensbasierten Engineering-Konfiguratoren (EK) weniger offensichtlich und vordefiniert, im Vergleich zu Produktkonfiguratoren (PK). PK können ebenfalls auf wissensbasierte Ansätze zurückgreifen, siehe Bild 49. In der Literatur wird häufig der Begriff Engineering-Konfigurator verwendet, der jedoch in den meisten Fällen tatsächlich einen PK impliziert, wie u. a. in [1], [11] oder [137]. Im Allgemeinen bietet ein PK automatischen Zugriff auf verschiedene bestehende Produktvarianten [135]. Bei PK ist das Hauptwertversprechen des Produkts in

der Regel klar und ändert sich durch die Konfiguration nicht wesentlich, es sei denn, die Leistung oder zusätzliche Funktionalitäten werden geändert. Dementsprechend wurden die meisten vorhandenen Konfigurationswerkzeuge und -methoden für PKs entwickelt [133] und bieten eine modulare, austauschbare Produktstruktur [134]. Bei der Planung von RA werden die einzelnen Komponenten jedoch von verschiedenen Herstellern geliefert, meist ohne umfassende Standardisierung. Dies führt dazu, dass EK durch eine unbestimmte Anzahl von Herstellern mit unterschiedlichen Standards und Produktvarianten sehr komplex werden [11, 134], da diese zu einer konsistenten Automatisierungslösung konfiguriert werden müssen. [P1]



Bild 49: Differenzierung von Produktkonfiguratoren und des von SCHÄFFER et al eingeführten Konzepts der wissensbasierten Engineering-Konfiguratoren gemäß der Synthese aus [1, 11, 23, 24, 115, 135, 138], erstmals veröffentlicht in [P1]

Wie in Bild 49 zu sehen ist, können mit einem EK neue Lösungen erstellt und validiert werden, während ein PK, wie in [11] oder [135], vorhandenes Produktwissen zur Verfügung stellt. Daher wird in dieser Dissertation die Idee eines wissensbasierten Engineering-Konfigurators mit dem Ziel des Engineerings verfolgt. Dieser wird im Folgenden als Engineering-Konfigurator oder als EK bezeichnet, und von PK unterschieden. [P1]

5.1.2 Abgrenzung vom Stand der Forschung

Die Abgrenzung zum Stand der Forschung ist in Tabelle 8 dargestellt. Hierbei wurden diejenigen Forschungsarbeiten ausgewählt, die direkt oder indirekt die Zielsetzung der Digitalisierung und Optimierung des Engineerings von Automatisierungslösungen verfolgen.

Tabelle 8: Abgrenzung der eigenen Forschungstätigkeit (SCHÄFFER) hinsichtlich der Zielsetzung der Digitalisierung und Optimierung des Engineerings von Automatisierungslösungen anhand der Kategorien des Fokus und der Werkzeuge [1, 3, 29, 49, 53, 137, 139–146]

		Zielsetzung		Fokus			Werkzeug	
		Digitalisierung und Optimierung des Engineerings von Automatisierungslösungen		Industrielle Robotik	Systemintegration	Grobplanung	Wissensbasierte Ansätze	Bottom-up-Werkzeuge und Lösungen z. B. CAD
				Wiss. Produktkonfigurator Engineering-Konfigurator (Top-down Lösung)			Wiss.= wissensbasierte	
Autor	Jahr	Bewertung						
GEYER	1991	☐	☐	☐	☐	☐	○	○
KOCH	1995	○	●	●	☐	☐	☐	○
RUDOLF	2007	☐	☐	☐	●	☐	○	○
LUTZ	2011	○	☐	☐	●	☐	☐	○
LANDHERR	2014	○	☐	☐	☐	☐	☐	○
WEIDNER	2014	☐	☐	☐	●	☐	○	○
FRANK	2015	○	●	☐	☐	●	○	○
GÖTZ	2015	☐	☐	☐	●	☐	○	○
HEES	2017	○	☐	☐	○	●	○	○
HELBIG	2017	☐	●	☐	☐	●	○	○
KRISTJANS DOTTIR	2017	○	○	○	●	☐	●	○
SHAFIEE	2017	○	○	○	●	☐	●	○
VOET	2018	○	☐	☐	☐	●	○	○
MICHNIEWICZ	2019	☐	●	☐	☐	●	○	○
SCHÄFFER	2021	●	●	●	●	☐	☐	●

Betrachtung und Berücksichtigung innerhalb der Konzepte und Methoden

○ keine ☐ erwähnt ☐ teilweise ☐ größtenteils ● vollständig

Die Kategorisierung erfolgt anhand des Fokus der Forschungstätigkeit, also Industrielle Robotik, Systemintegration, Grobplanung und wissensbasierte Ansätze, sowie der eingesetzten Werkzeuge zur Lösung der Zielsetzung,

also Bottom-up-Werkzeuge, wissensbasierte PK und Top-down EK. Diese Einteilung ist insofern notwendig, da viele Lösungsansätze vorhanden sind, aber die Schwerpunkte und Herangehensweisen sehr unterschiedlich gewählt werden. Tabelle 8 zeigt, dass die meisten Ansätze eine Bottom-up Optimierung fokussieren. Hierbei wird meist entweder die Domäne der Fabrikplanung oder der wissensbasierten Konfiguration adressiert. Auch die Interpretation sowie Verwendung von wissensbasierten Ansätzen erfolgt auf vielfältige Weise. Das Expertenwissen wird hierbei in Form von Simulationsmodellen, Baukastensystemen bis hin zu einer Constraint-basierten Logik aufbereitet.

5.2 Wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen

Um die Automatisierung in den (Maschinenbau-)Unternehmen des Mittelstands mithilfe von RA voranzutreiben, fehlen geeignete Werkzeuge, um die damit verbundene Komplexität und den Entwicklungsaufwand zu reduzieren. Hierfür wird das Konzept der wissensbasierten Engineering-Konfiguratoren (EK) eingeführt. EK lassen sich im Rahmen der generellen Aufgaben von Wissensanwendungen als spezifische Konstruktionstätigkeit innerhalb der Teilaufgabe des Designs einordnen. Der EK nimmt eine hybride Stellung zwischen den Tätigkeiten der Planung und Konfiguration ein, siehe Bild 50. [4, 43, 49]

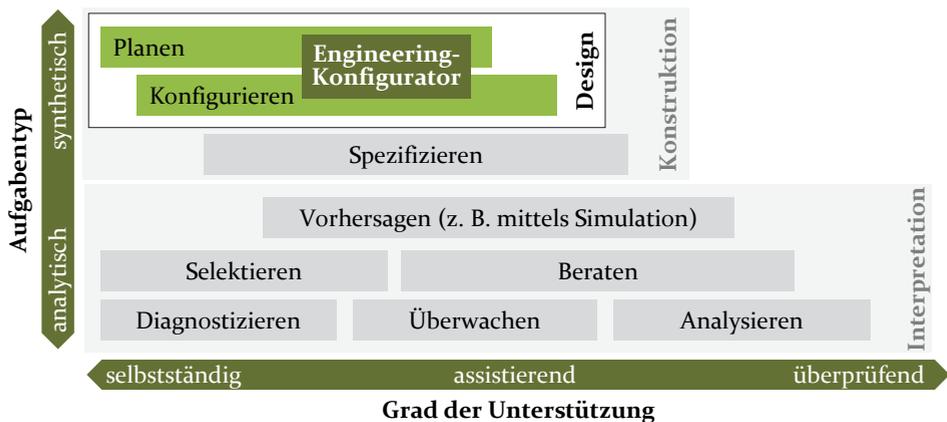


Bild 50: Generelle Aufgaben von Wissensanwendungen; eigene Darstellung, kondensiert aus [4, 43, 49] mit ergänzender Einordnung von Engineering-Konfiguratoren

Die Engineering-Konfiguration gliedert sich in zwei generelle Phasen. Als erstes erfolgt die Einordnung des Bedarfs über eine Vorfilterung bzw. Auswahl einer bereits realisierten Automatisierungslösung (Best Practice) als

initialen Parametersatz für die EK. Gefolgt wird diese von der Individualisierung der Best Practice mittels wissensbasierter Konfigurationsfunktionalitäten (Anpassungskonfiguration), siehe Bild 51. [P9, P14]

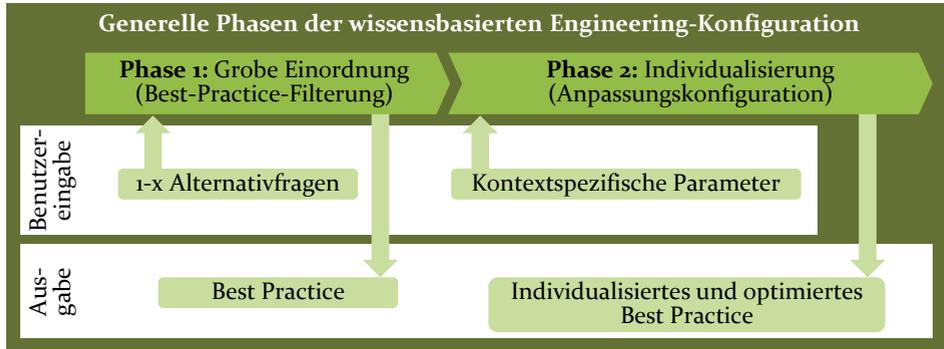


Bild 51: Die Engineering-Konfiguration unterteilt sich in zwei Phasen: grobe Einordnung der Aufgabenstellung und Individualisierung (Anpassungskonfiguration) [P9, P14]

Aus dem vorgestellten Konzept der EK sowie den zwei Phasen ergibt sich folgende Definition von wissensbasierten Engineering-Konfiguratoren:

Definition Engineering-Konfigurator
Ein wissensbasierter Engineering-Konfigurator ermöglicht ein generisches systemintegratorneutrales sowie -unabhängiges Top-down Engineering von Automatisierungslösungen auf Basis von digitalisiertem Expertenwissen. Als Startparameter für die Lösungsfindung werden fallspezifische, bereits realisierte Automatisierungslösungen (Best Practices) verwendet. Anschließend wird die ausgewählte Best Practice auf Basis von generischem Engineering-Wissen (z. B. in Form von Constraints) auf die situativen Anforderungen optimiert bzw. über eine Anpassungskonfiguration individualisiert.

Da wissensbasierte Engineering-Konfiguratoren inhärent wissensbasierte Funktionalitäten voraussetzen, werden diese zur einfacheren Lesbarkeit im Folgenden als Engineering-Konfiguratoren bezeichnet.

5.2.1 Einordnung von Engineering-Konfiguratoren innerhalb des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0

Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) ermöglicht eine mehrdimensionale Betrachtung, um Produktionsanlagen entlang des gesamten Produktlebenszyklus (siehe Kapitel 2.1) zu beschreiben sowie Informationen über und mit diesen auszutauschen, siehe Bild 52. RAMI 4.0 basiert auf dem Ansatz einer serviceorientierten Architektur. Die drei Achsen von RAMI 4.0 sind die Architekturebenen (engl. Layers), der Lebenszyklus

bzw. die Wertschöpfungskette (engl. Life Cycle and Value Stream) und die Automatisierungshierarchie (engl. Hierarchy Levels). [147, 148]

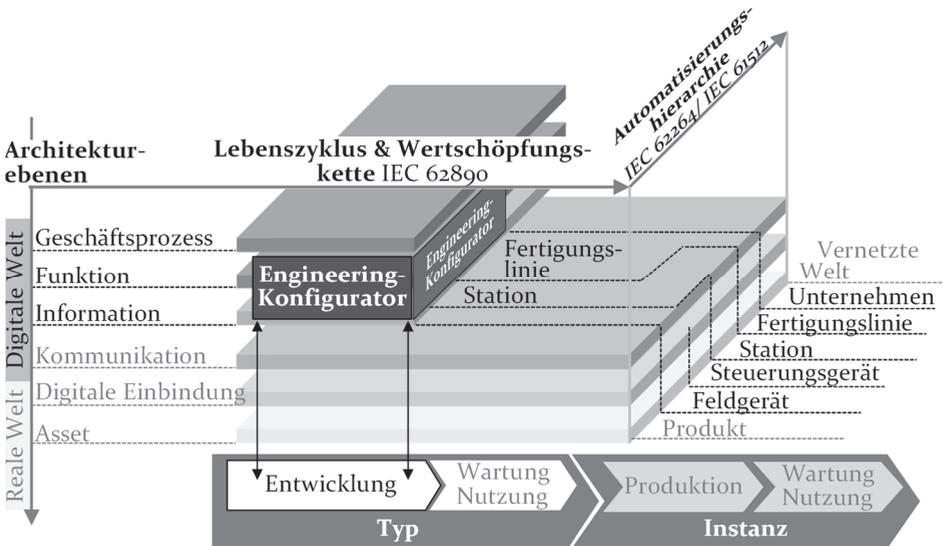


Bild 52: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) nach [147, 148] zur qualitativen Einordnung von EK innerhalb von Industrie 4.0

Die Architekturebene beschreibt die Art, das Aggregationslevel sowie die Einbindung von physischen Gegenständen hin zur kondensierten digitalen Repräsentation. Der Lebenszyklus bzw. die Wertschöpfungskette beschreiben Objekte von deren Entstehung, über den wertschöpfenden Nutzen, bis hin zur Entsorgung sowohl als genereller Typ sowie auch als reale Instanz. Die Automatisierungshierarchie beschreibt verschiedene Aggregationsstufen vom herzustellenden Produkt, über die Systeme zu deren Herstellung bis hin zur Einbindung in eine vernetzte Welt. Ein EK, als ein Werkzeug zur Grobplanung von Automatisierungslösungen, lässt sich einem hohen Aggregationslevel auf der Architekturebene sowie der Entwicklung von Stationen bzw. Fertigungslinien zuordnen, siehe Bild 52. [147, 148]

5.2.2 Modulare Best-Practice-Architektur von roboterzentrierten Automatisierungslösungen für EK

Die Entwicklung des Top-down EK erfordert eine modulare, generische Architektur von Best Practices von RA als wesentliche Datengrundlage. Eine Modularisierung von Best Practices kann auf Basis von Prozessmodulen, Komponenten, Layout- und visuellen Gestaltungs- sowie Informationsobjekten erfolgen, siehe Bild 53. Die Best Practice kann in Kombination mit

generischem Engineering-Wissen (z. B. in Form von Constraints) anschließend für die jeweilige Situation im Rahmen einer Anpassungskonfiguration individualisiert werden. Die 3-Ebenen Architektur von Best Practices ist in Bild 53 dargestellt.

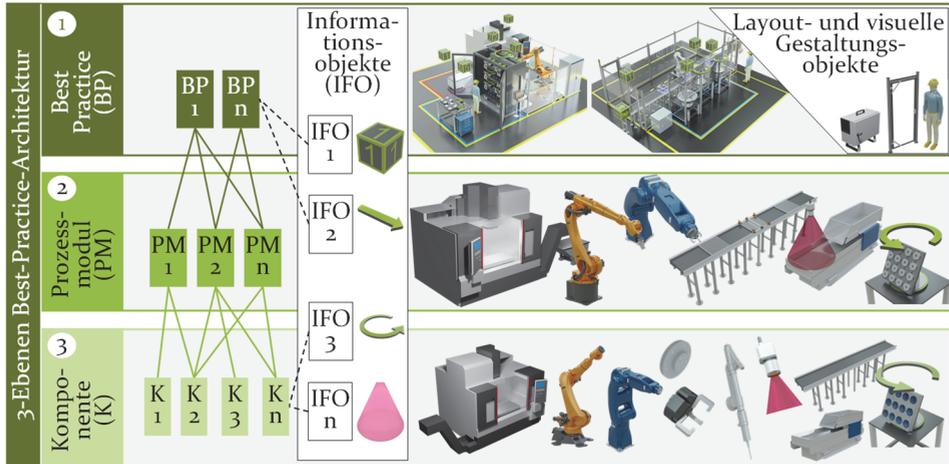


Bild 53: Modularer Aufbau von Best Practices mittels der 3-Ebenen Architektur inklusive der ergänzenden Layout- und visuelle Gestaltungs- sowie Informationsobjekte

Im Kontext von Engineering-Konfiguratoren und dieser Dissertation wird die Best Practice (BP) wie folgt definiert:

Definition Best Practice
<p>Eine Best Practice ist ein überdurchschnittlich effizientes, ausreichend validiertes und digitalisiertes Anlagenkonzept einer fallspezifischen Automatisierungslösung.</p> <p>Die Best Practice dient als zentrales Wissenselement zum Aufbau wissensbasierter Engineering-Konfiguratoren sowie für wissensbasierte Softwareanwendungen zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung des Engineerings von Automatisierungslösungen.</p>

Die BP berücksichtigt damit die verwendeten Komponenten, wie z. B. Endeffektor, Adapter und Roboter sowie deren Anordnung. Zusätzlich werden die prozessrelevanten Positionen der Werkstücke, z. B. über Informationsobjekte (siehe in Bild 53, IFO 1), berücksichtigt. Somit werden der Materialfluss sowie der Prozessablauf der Automatisierungsaufgabe ebenfalls integriert. Eine detaillierte Beschreibung der BP und deren Entwicklungsmethode sowie die Definition der Prozessmodule und Komponenten erfolgt in Kapitel 6.3.

5.2.3 Phase 1 des EK: Einordnung des Lösungsbedarfs

Bei dem Engineering von Sondermaschinen sind viel implizites Fachwissen sowie situationspezifische Kompromisse notwendig. Um die Komplexität zu reduzieren und um keine neuen Lösungen konzeptionieren bzw. danach absichern zu müssen, wird ein Top-down Ansatz gewählt, siehe Bild 54 .

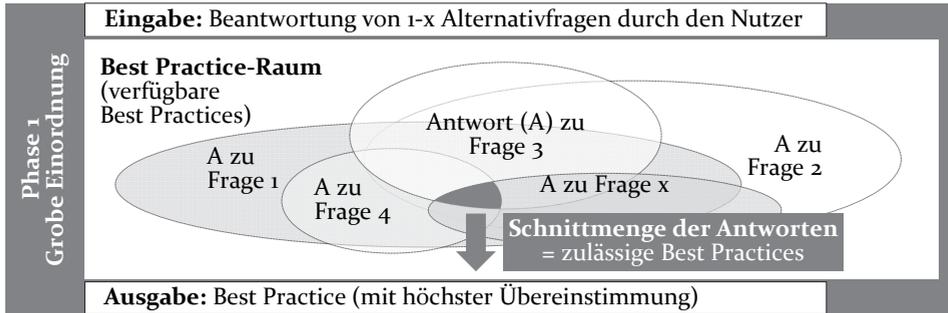


Bild 54: Die Phase 1 des EK ist die grobe Einordnung des Lösungsbedarfs über Filterfragen zur Auswahl der am besten geeigneten Best Practice aus dem Lösungsraum [P9, P14]

Hierzu werden bereits erfolgreich umgesetzte und strukturiert dokumentierte Automatisierungslösungen in Form von BP verwendet. Diese bilden ein in sich konsistentes Gesamtkonzept, da die BP vorab getestet wurden, z. B. über den Realbetrieb oder eine virtuelle Absicherung. Somit besitzen BP ein hohes Qualitäts- bzw. Absicherungsniveau. Die erste Phase in der EK ist die Auswahl einer für die Aufgabenstellung am besten passenden und zur Verfügung stehenden BP. Dies geschieht über mehrere Fragen, welche als Filterkriterien für die Auswahl der optimalen BP aus dem gesamten BP-Raum verwendet werden, siehe Bild 54. [P9, P14]

5.2.4 Phase 2 der EK: Anpassungskonfiguration

Die Vorauswahl der optimalen BP besitzt den Vorteil, dass hierdurch die initialen Parameter für die Individualisierung bzw. Anpassungskonfiguration in Phase 2 zur Verfügung stehen, siehe Bild 55. Hierdurch ist es möglich, dem Nutzer mit nur wenigen Eingaben von Anfang an eine vollständige Lösung anzuzeigen. Die BP wird dann sukzessiv auf Basis zusätzlicher Eingaben im Rahmen der Anpassungskonfiguration optimiert. Hierbei handelt es sich um einen nicht monotonen Auslegungsprozess, der durch eine zyklische Optimierung der Parameter das gewünschte Ergebnis erreicht. Am Anfang werden durch die BP Parameter gesetzt bzw. Annahmen getroffen. Die Anforderungen können teilweise erst gegen Ende, bedingt durch die mittels des EK offensichtlich werdenden Wechselwirkungen, validiert werden. Somit erfolgt eine iterative Verfeinerung der Lösung auf

Basis kontinuierlich konkreterer Annahmen, siehe Bild 55. Die Darstellung erfolgt als Analogie zu dem Spiralmodell [149], da die Anpassungskonfiguration eine kurzzyklische Optimierung ermöglicht. [P9, P10]

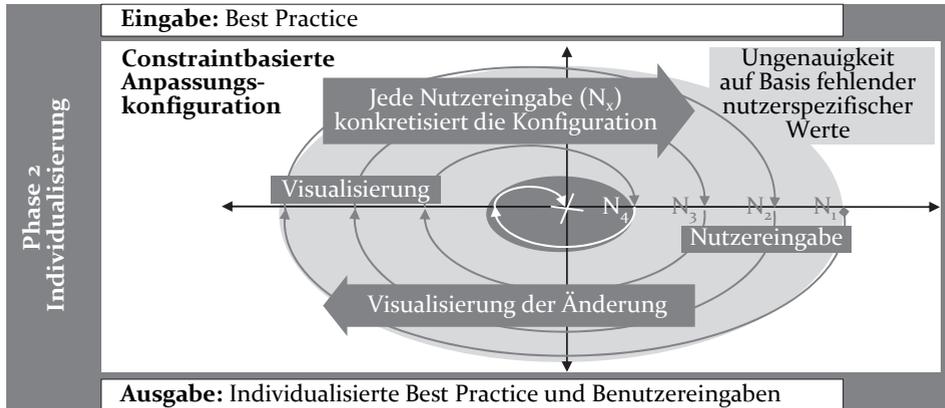


Bild 55: Die Phase 2 des EK ist die Individualisierung (Anpassungskonfiguration) des Lösungsbedarfs aufbauend auf den Startparametern der BP-Vorauswahl [P9, P10]; zyklische Darstellung in Anlehnung an das Spiralmodell [149]

Die BP-Startparameter werden durch anwenderspezifische Werte ausgetauscht. Das im Hintergrund liegende constraintbasierte Konfigurationsmodell tauscht bei Bedarf die Komponenten der Automatisierungslösung aus und visualisiert die Veränderung dem Anwender. Je nach Komplexität der Konfigurationsaufgabe können Phase 1 und Phase 2 in einem MS zusammengefasst oder in zwei separate MS aufgeteilt werden. Die hierfür erforderlichen Konzepte und Entwicklungsmethoden für EK werden in den folgenden Kapiteln im Detail behandelt. [P9, P10]

5.3 MS-basiertes Webplattformökosystem und Wertschöpfungsnetz für das Engineering

Neben dem Design von Automatisierungssystemen sind auch die zugrundeliegenden Softwarewerkzeuge zu überprüfen, um einen optimalen Engineeringprozess zu gewährleisten. Proprietäre Softwarelösungen können spezialisierte und zugleich nutzerzentrierte Lösungen für ein breites Kundenspektrum nur bedingt bereitstellen. So verwenden die drei umsatzstärksten Online-Webshops in Deutschland im Jahr 2018 aus dem Konsumgütermarkt (B2C) je eine Microservice-Architektur: 1) Amazon.de (9,3 Mrd. €), 2) Otto.de (3,2 Mrd. €) und 3) Zalando.de (1,4 Mrd. Euro) [150–153]. Daraus lässt sich die These ableiten, dass eine arbeitsteilige, hoch spezialisierte Entwicklung von Teillösungen (MS) in agilen Strukturen mit

einem intensiveren Wettbewerb erforderlich ist, um eine nachhaltige Weiterentwicklungsfähigkeit sicherzustellen. [92, 152–154]

Modularität ist ein beliebter Ansatz, um Komplexität und Kosten zu reduzieren und gleichzeitig die Reichweite und Individualität des Angebots zu erhalten [155]. Dabei müssen geeignete Standardmodule definiert werden, aus denen kundenspezifische Automatisierungssysteme abgeleitet werden können. Die Entwicklung resultiert in unternehmensspezifischen Standardmodulen und ist mit hohen Kosten verbunden, siehe Kapitel 2.3. Um im Sondermaschinenbau für roboterzentrierte Automatisierungslösungen von dem bisher vorherrschenden „Engineer-to-Order“ zu einem modularen „Configure-to-Order“ Vorgehen zu gelangen, stellen Engineering-Konfiguratoren innerhalb einer Webplattform einen alternativen, digitalen Ansatz zum klassischen Engineering dar, siehe Bild 56. [P3, P7]

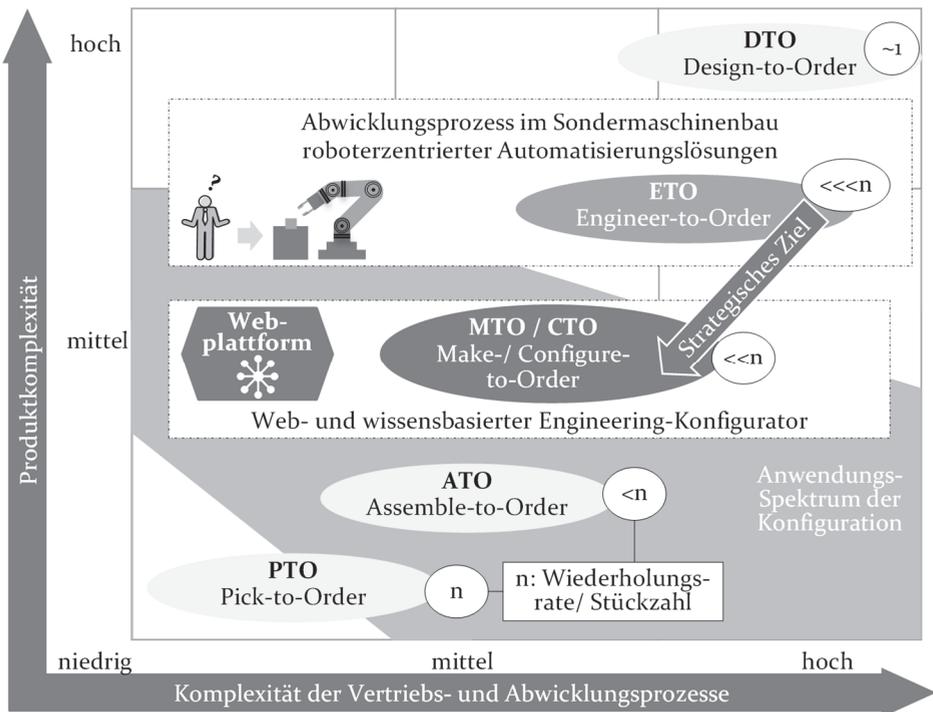


Bild 56: Webplattformökosysteme schaffen den Rahmen zur Flexibilisierung und Standardisierung im Sondermaschinenbau hin zu EK; Synthese aus [156, 157]

Bedingt durch die repetitiven, hohen Engineeringaufwände sowie die daraus resultierenden erheblichen Kosten für die Systemintegration, können bisher zahlreiche RA kaum rentabel erschlossen werden [158]. Insofern birgt die EK von RA über Webplattformen ein großes Potential, sowohl für die Anbieter von Automatisierungslösungen und -komponenten als auch

die Wettbewerbsfähigkeit des produzierenden Mittelstandes [P9]. Hierdurch können die Engineeringkosten sowie die Hardwarepreise durch Skaleneffekte auf ein nachhaltiges Preisniveau gesenkt werden. Dennoch erfolgt ein Wechsel zu einem Webplattformökosystem nur, wenn dieses die wirtschaftlichen Interessen der primären Stakeholder im Rahmen von geeigneten Geschäftsmodellen berücksichtigt. [P3, P7, P12]

5.3.1 Bedarfsfall und Geschäftsmodellbetrachtung für EK

Das Vorhandensein eines für die Marktwirtschaft relevanten Anwendungsfalls spielt im Rahmen von EK und der Webplattformökonomie eine erfolgsentscheidende Rolle. Denn die initialen Kosten für modulare Architekturen und Ansätze sind deutlich größer. Auch werden höher qualifizierte Mitarbeiter benötigt als bei nicht wissensbasierten Lösungsansätzen. Um die zusätzlichen Kosten über Skaleneffekte zu amortisieren, ist ein signifikantes Kosteneinsparungspotential bzw. eine erhöhte Zahlungsbereitschaft der Kunden notwendig. Hierbei ist eine große Nutzerbasis vorteilhaft. Um eine möglichst breite Nutzerbasis zu adressieren, bietet sich die Integration in bestehende Wertschöpfungsketten und deren Optimierung mittels digitaler Technologien an. Beispielsweise ist Amazon über die digitale Optimierung des Vertriebsprozesses des Buchhandels gestartet, bevor weitere Einsatzfelder und Kundenkreise adressiert wurden [5, 159, 160]. Zudem ist der Vertrieb einer der initialen Schritte vor bzw. in der Prozesskette des Engineerings von Produktionsanlagen. Dies führt zu geringeren Abhängigkeiten und damit zu reduzierten Markteintrittsbarrieren, siehe Bild 3 und Kapitel 2.1.1. Im Allgemeinen kann eine Webplattform durch die Digitalisierung eines am Marktumfeld etablierten Geschäftsprozesses beginnen. Amazon ist mit der Digitalisierung des Vertriebswegs bzw. -prozesses im Buchhandel gestartet. Hierbei ist ein geringeres Know-how im Vergleich zur Entwicklung und Produktion von Gütern notwendig. Auch ermöglicht die provisionsbasierte Bezahlung für Vertriebstätigkeiten hohe Skaleneffekte. [159, 161]

Bei der Vertriebsunterstützung von Systemintegratoren für bereits umgesetzte RA wird somit ein hohes Gewinnpotential erwartet. Diese Annahme beruht auf der Diskussion von SCHÄFFER mit mehreren Systemintegratoren auf der Robotik Fachmesse Automatica 2018. Nach Ansicht der Experten können hierdurch Projektrisiko, Projektdauer und Engineeringaufwand für Systemintegratoren maßgeblich reduziert werden. Zudem werden die für den Vertriebsprozess notwendigen Informationen als weniger wettbewerbskritisch bewertet, mit Ausnahme von detaillierten Preisinformationen. Der Vertrieb bzw. die Akquise von Aufträgen stellt zudem einen

der primären überlebenswichtigen Faktoren für ein gewinnorientiertes Unternehmen dar. Hierdurch ist die Sichtbarkeit des Vertriebs bei der Geschäftsführung und dem oberen Management im Allgemeinen sehr hoch. Daher besteht eine gesteigerte Bereitschaft bei Systemintegratoren zur Weitergabe von Expertenwissen über RA für vertriebsunterstützende Maßnahmen. Dies wird darin begründet, dass der erhoffte Nutzen das vermutete Risiko ausgleicht. Ansonsten wird die öffentliche Bereitstellung von Anlagen-, und Engineeringinformationen als eher kritisch gesehen, um weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben. [P13]

Basierend auf den zuvor getroffenen Überlegungen, stellt die Digitalisierung des Vertriebs von RA in höheren Stückzahlen ein vielversprechendes Potential dar. Der Vertrieb stellt ein geeignetes Umfeld hierfür sowohl aus der zu erwartenden wirtschaftlichen Perspektive als auch im Rahmen verfügbarer Informationen dar. Die Webplattform nimmt hierbei eine vernetzende und vermittelnde Rolle zwischen den Interessengruppen ein: dem Außendienst-Vertrieb des Systemintegrators sowie dem Entscheider, dem Projektmanagement und der Entwicklungsabteilung eines produzierenden Unternehmens, siehe Bild 57.

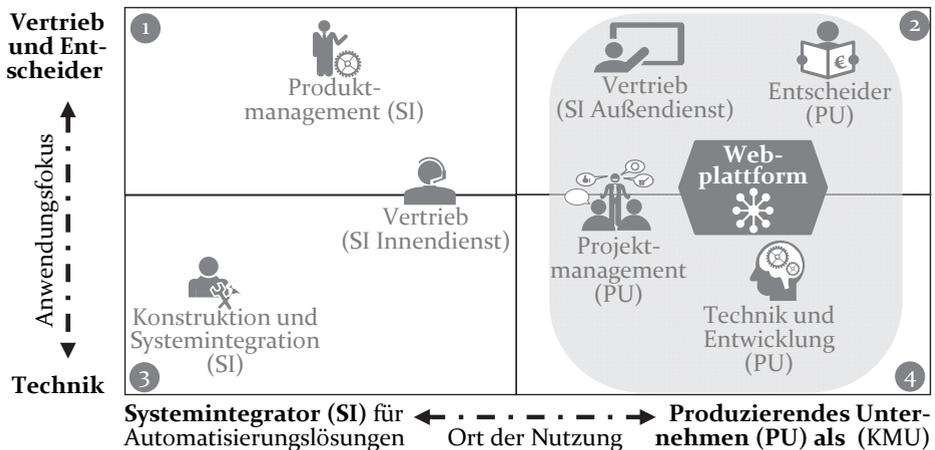


Bild 57: Einordnung von Webplattformen mit vertriebsunterstützenden Konfigurationsfunktionen als vernetzendes System für die Grobplanung in Anlehnung an [137]

Im Vergleich zu vielen PK, welche von den Außendienstmitarbeitern des Vertriebs bedient werden, adressiert der EK direkt das produzierende Unternehmen. Hierdurch wird der Kommunikationsaufwand für alle Interessengruppen gesenkt, da der EK strukturiert durch den Engineeringprozess führt. Basierend auf den BP und den Constraints übernimmt der EK für die Nutzer irrelevante Entscheidungen und vermeidet dadurch zeitaufwändige Rückfragen. Hierdurch werden schnell individualisierte Lösungskonzepte

bereitgestellt. Nach der groben Überschlagsrechnung in Tabelle 9 ergibt sich für EK ein hohes Einsparpotential in der Angebotsbearbeitung von RA. Im Rahmen der Überschlagsrechnung wurden folgende, vereinfachende Annahmen getroffen:

- 1) Jede RA besteht aus durchschnittlich vier Robotern,
- 2) alle Roboter werden im Rahmen von schlüsselfertigen RA verkauft,
- 3) Rahmenverträge legen lediglich den Preis und Hersteller des Roboters fest, welcher vom Systemintegrator zu verwenden ist,
- 4) für jede verkaufte RA muss ein Angebot durch einen Systemintegrator erstellt werden sowie
- 5) die Kosten des EK sind aufgrund der großen Nutzerbasis zu vernachlässigen.

Tabelle 9: Geschätztes jährliches, weltweites Einsparungspotential für Systemintegratoren bei dem Vertrieb von RA durch den Einsatz von EK zur Angebotsbearbeitung

Wesentliche Schätzgrößen	Werte
Zahl weltweit verkaufter Industrieroboter im Jahr 2018 [162]	421.000
Geschätzte durchschnittliche Anzahl an Robotern je Automatisierungslösung (Fertigungslinien und Einzelzellen)	4
Anzahl der Angebote je verkauftes System (Umwandlungsrate 5-20 %) bei einer vereinfachten Annahme eines Roboters je System [19]	10 %
Anzahl der zu erstellenden Angebote = $\left\{ \frac{421.000 * 10}{4} = 1.052.500 \right\}$	1.052.500
Durchschnittliche geschätzte Arbeitszeiterparnis je Angebotsbearbeitung mit Unterstützung durch eine EK [19]	4 h
Gesamte Arbeitszeiterparnis zur Angebotserstellung	4.210.000 h
Effektivitätsabzug für vernachlässigte Faktoren (wie z. B. Austausch von bestehenden Robotern, mehrfacher Verkauf derselben RA und somit Wiederverwendung der Angebotsunterlagen, usw.)	70%
Geschätzte Zeiterparnis bei der Angebotsbearbeitung	2.947.000 h
Angenommenes durchschnittliches Entgelt 2019, basierend auf Entgeltgruppe 11 A inkl. Zusatzleistungen (90.029 €) und zusätzlich Lohnnebenkosten des Arbeitgebers von 50%, bei einer Nettoarbeitszeit von 1567 Stunden pro Jahr und Mitarbeiter [163] = $\left\{ \frac{90.029 € * 1,5}{1567 h} = 86 \frac{€}{h} \right\}$	86 €/h
Weltweites, jährliches Einsparungspotential an Vertriebsmitarbeitern (Innen- und Außendienst) bei einer Nettoarbeitszeit von 1567 Stunden pro Jahr und Mitarbeiter = $\left\{ \frac{2.947.000 h}{1567 h} \approx 1881 \right\}$	~ 1881
Grob geschätztes Potential zur jährlichen Personalkostenersparnis durch die Unterstützung von EK bei der Angebotsbearbeitung	~ 253,4 Mio. €

5.3.2 Wertschöpfungsnetz einer Engineering-Webplattform

Nach LÖWEN et al. existieren sieben generische Geschäftsmodell-Muster von Business-to-Business- (B2B-)Webplattformen der produzierenden Industrie; 1) E-Shop, 2) Supply-Chain-Management- (SCM-), 3) Internet der Dinge- (IoT-) sowie 4) Vermittlungs-, 5) Infrastruktur-, 6) Kollaborations- und 7) Datenverteilungsplattformen [164]. Ein potentielles Wertschöpfungsnetzwerk der MS-basierten Webplattform zum Vertrieb und Engineering von RA ist in Bild 58 dargestellt. Die Webplattform nimmt primär das Geschäftsmodell-Muster einer Vermittlungsplattform zum Vertrieb von RA ein. Hierbei vernetzt die Webplattform kleine bzw. mittlere, produzierende Unternehmen (KMU), welche einen Automatisierungsbedarf der Produktion besitzen, mit verschiedenen Dienstleistern.

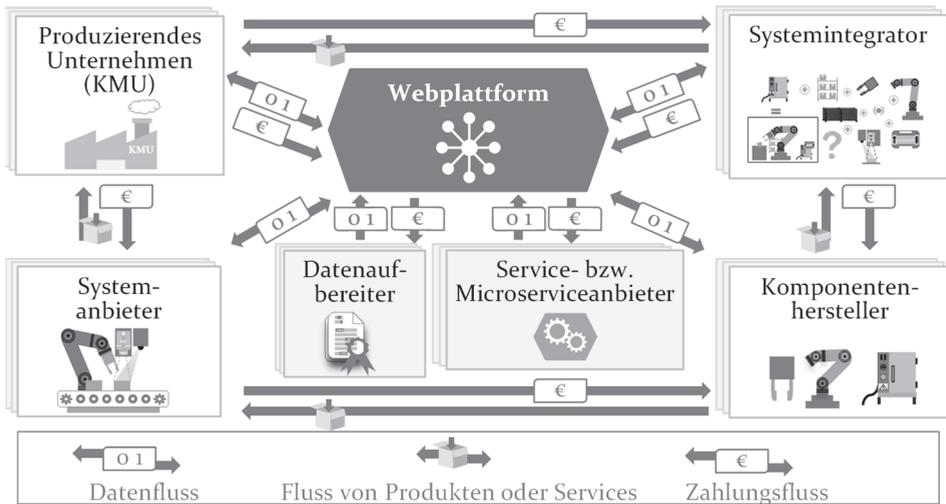


Bild 58: Potentielles Wertschöpfungsnetzwerk einer microservicebasierten Webplattform zum Vertrieb und Engineering von RA [P16, P17]

Der Systemintegrator tritt als Generaldienstleister auf, welcher schlüsselfertige RA kundenspezifisch entwickelt. Dies geschieht in der Regel auf Basis zukaufbarer Komponenten wie z. B. Roboter, Greifer und Sensoren. Der Komponentenhersteller entwickelt und vertreibt typischerweise die nachgefragten Komponenten. Der Systemanbieter nimmt eine Zwischenrolle ein, da dieser Standardlösungen bereitstellt, wie z. B. schlüsselfertige, roboterzentrierte Schutzgas-Schweißzellen [165]. Die Webplattform ermöglicht dem Systemintegrator, Komponentenhersteller sowie Systemanbieter neue und effiziente Vertriebskanäle. Dies geht einher mit der Möglichkeit zur zielgerichteten Erhöhung der Stückzahl von spezifischen Systemen und Komponenten. Um umfangreiche, nutzerzentrierte Services und

Funktionen auf der Webplattform einbinden zu können, sind verschiedene Service bzw. Microserviceanbieter notwendig. Diese stellen spezialisierte Services und Funktionen, wie Konfiguration, Simulation, Authentifizierung oder Bezahlungsfunktionalitäten, bereit. Vorteil für die Service bzw. Microserviceanbieter ist, dass diese sich auf einzelne Services spezialisieren können und trotzdem über Webplattformen eine große Kundenbasis adressieren. Um standardisierte, digitale Wissens Elemente in großem Umfang und einer hohen Qualität für die Webplattform bereitstellen zu können, sind spezialisierte Datenaufbereiter erforderlich. Webplattformen ermöglichen somit neue Geschäftsmodelle für die Datenaufbereitung. [P16, P17]

5.3.3 EK- und MS-basierte Webplattformökosysteme

Engineering Webplattformen stellen eine vielversprechende, digitale Lösungsalternative zum klassischen Engineering dar. Aufgrund der hohen Komplexität bei der Entwicklung einer solchen Webplattform ist deren Realisierung nur noch bedingt durch ein Unternehmen leistbar. Die Entwicklung der technologisch anspruchsvollen Webplattformen könnte in Anlehnung an die Fertigung der Automobilindustrie bzw. deren Zulieferpyramide (Tier-1, Tier-2, Tier-3) erfolgen, siehe Bild 59. Innerhalb der Automobilbranche existiert eine Arbeitsteilung mit hoch spezialisierten und professionalisierten Zulieferketten.

Der Webplattformbetreiber (WPB) ist im übertragenen Sinne der OEM, (Original Equipment Manufacturer) der eine branchenspezifische, schlüsselfertige IT-Gesamtlösung anbietet. Hierbei kombiniert, integriert sowie orchestriert der WPB verschiedene Module bzw. MS. Die MS können von verschiedenen MS-Anbietern bereitgestellt werden, wie z. B. MS Subkonfigurator, Simulation oder Authentifizierung, siehe Bild 59 und Bild 60.

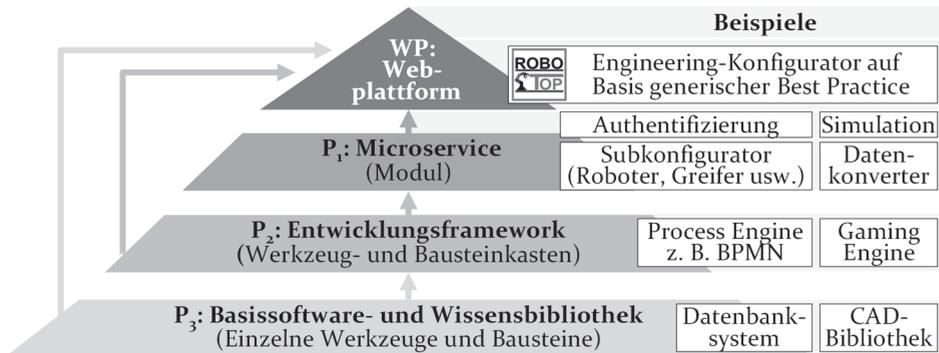


Bild 59: Mögliche Zulieferpyramide für ein Webplattformökosystem für das Engineering

Automatisierungskomponentenhersteller stellen MS wie Subkonfiguratoren (z. B. Produktkonfiguratoren) für Roboter oder Greifer bereit (P_1). Diese optimieren den kundenintegrierten Vertrieb innerhalb eines Webplattformökosystems. Diese MS stehen verschiedenen Webplattformen zur Verfügung. Innerhalb eines übergeordneten EK können ausgewählte MS für spezielle Branchen sowie Zielgruppen integriert werden, siehe Bild 60. Durch die Aufteilung einer Softwarelösung in unabhängige MS können kleine Teams mittels agiler Methoden schnell und wirtschaftlich Teillösungen generieren sowie diese iterativ optimieren. MS werden wiederum z. B. auf Basis von Entwicklungsframeworks (Werkzeug- und Bausteinkästen) konzipiert (P_2). Entwicklungsframeworks ermöglichen, dass softwarearchitektonische Basisentscheidungen, wie z. B. die Implementierung von Prozessen (Process Engine), nur einmalig getroffen werden müssen [P4]. Bausteinkästen aggregieren einzelne Bibliotheken bzw. Wissens Elemente wie z. B. CAD-Bibliotheken und deren Metadaten zu einer Plug-and-Play-Lösung. Die MS-Anbieter können sich somit auf die primär wertschöpfende und differenzierende Funktion, Intelligenz bzw. Logik der MS konzentrieren. Auf der untersten Ebene werden Basissoftwarebibliotheken, wie Datenbanksysteme, sowie Wissensbibliotheken, wie CAD-Bibliotheken, bereitgestellt (P_3). Diese können als Werkzeuge und Bausteine bei der Implementierung von Entwicklungsframeworks verwendet werden.

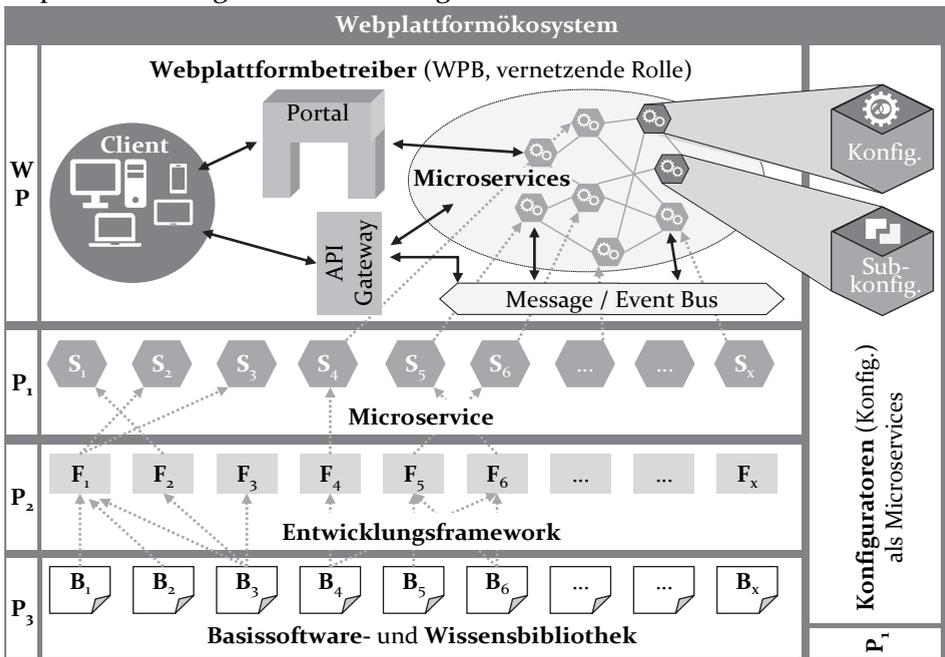


Bild 60: Ein Webplattformökosystem bietet die Voraussetzungen zur Einbindung spezialisierter, Engineering- und Produktkonfiguratoren sowie anderer MS [P9, P11]

Zusätzlich unterstützen Webplattformökosysteme und MSA den Trend bei der Entwicklung wissensbasierter Systeme vom isolierten Expertensystem zu integrierten Systemen [4]. Die Aufteilung einer Software in einzelne MS ist auch vorteilhaft für eine Geschäftsmodellinnovationsstrategie, da die geforderten Resilienz-Mechanismen Diversität, Effizienz, Anpassungsfähigkeit und Zusammenhalt unterstützt werden [166, 167].

5.4 Validierung des web- und wissensbasierten Engineering-Konfigurators entlang der MSA

Für die Validierung des web- und wissensbasierten Engineering-Konfigurators wurde zum einen ein MS-Teilprototyp implementiert, um das Potential von MSA für EK aufzuzeigen. Zum anderen erfolgte die übergreifende Validierung im Rahmen der Webplattform ROBOTOP.

5.4.1 Prototypische Teilvalidierung der MSA für web- und wissensbasierte Engineering-Konfiguratoren

Der vorgestellte Ansatz einer MSA für die Planung von RA sowie die Aufteilung in verschiedene Funktionen wurde durch eine Testimplementierung validiert. Dies erfolgte unter Berücksichtigung der EK. Um den Validierungsprototyp der MSA leicht verständlich zu gestalten, wurde ein vereinfachter Konfigurationsablauf konzeptioniert, siehe Bild 61. [P11]

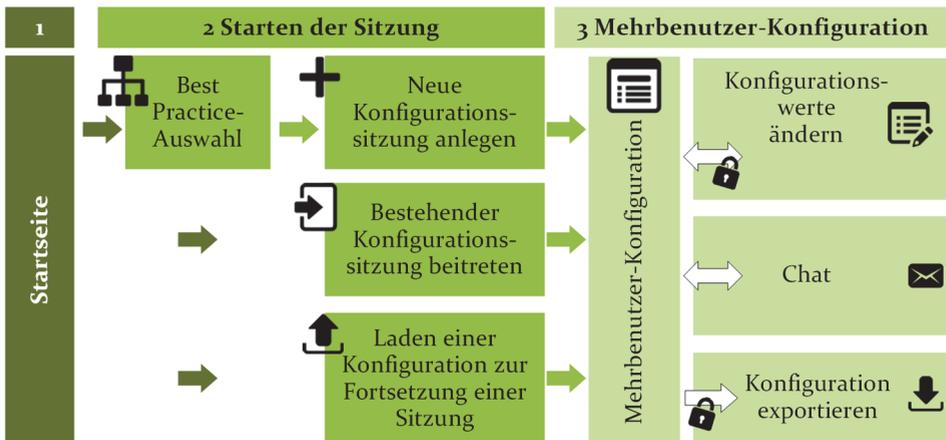


Bild 61: Vereinfachter Konfigurationsablauf zur Teilvalidierung der MSA für EK [P11]

Da auf bidirektional kommunizierende Webtechnologien gesetzt wird, können mehrere Nutzer gleichzeitig an einer Konfigurationssitzung teilnehmen. Jede EK beginnt auf der Startseite, wobei ausgewählt wird, ob eine

neue Sitzung über eine BP-Auswahl gestartet oder aus einer zuvor gespeicherten Sitzung geladen werden soll. BP werden als Ausgangsparameter für eine neue Konfiguration verwendet. Alternativ ist es möglich, an einer laufenden Sitzung teilzunehmen. Die detaillierte Beschreibung und Umsetzung kann in SCHÄFFER et al. nachgelesen werden [P11].

Der Hauptvorteil der MSA wird in Bild 62 ersichtlich. Die Website besteht aus einzelnen Fragmenten. Diese können als unabhängige MS in einzelnen Docker-Containern in einer betriebssystemunabhängigen Virtualisierungsumgebung ausgeführt werden. Die MS sind in drei Kategorien eingeteilt; (1) MS ohne visuelle Repräsentation, wie das API-Gateway und die Optik der Website bzw. Styling, sowie (2) Zusammenstellungs-MS, welche die (3) Fragment-MS in einer spezifischen Webseite kombinieren, siehe Bild 63. Letztere können wiederum in Fragment-MS mit und ohne bidirektionalem Informationsaustausch mit den Nutzern unterschieden werden, siehe Bild 64. Das API-Gateway ist das einzige MS, das von einem Client angesprochen werden kann. Dieser MS ist die Schnittstelle zu den übrigen MS sowie für die Weiterleitung der eingehenden Anfragen an den richtigen Empfänger verantwortlich. [P11]

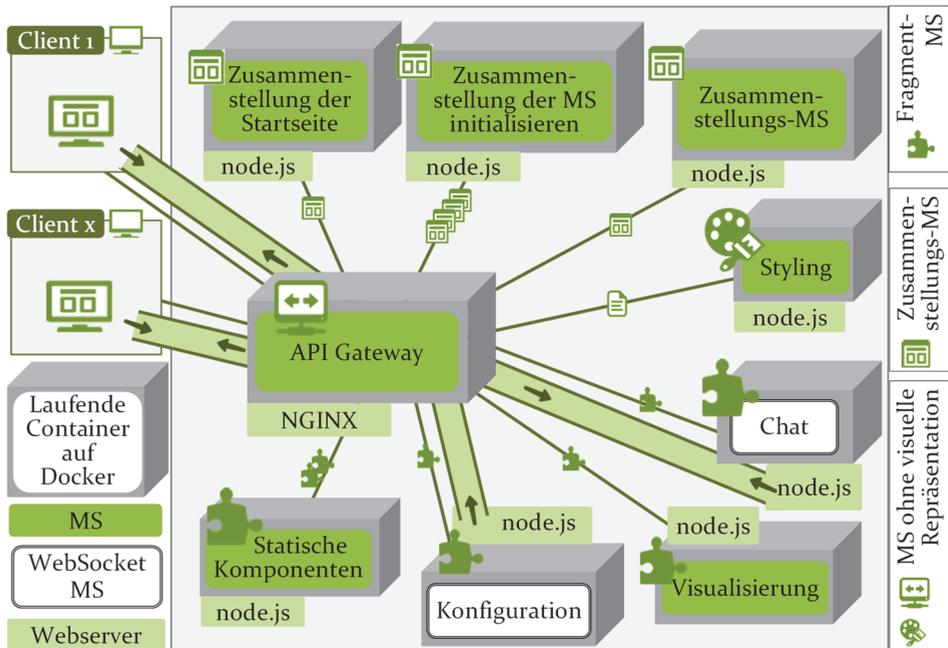


Bild 62: Überblick über die MSA sowie der einzelnen MS, kategorisiert nach MS ohne visuelle Repräsentation, Zusammenstellungs- und Fragment-MS [P11]

Der Gateway MS bzw. dessen NGINX Webserver leitet die eingehenden Anfragen auf Basis der mitgelieferten Pfadinformationen weiter. Die Anfragen können dabei sowohl von einem Client als auch von einem anderen MS stammen. Der Fragment-MS liefert HTML-Fragmente, die in eine oder mehrere Ansichten bzw. Kompositionen integriert werden. Der Konfigurations-MS verwaltet die Konfigurationsparameter und stellt das MS-Fragment zur bidirektionalen Anzeige, Veränderung und Konfiguration der Parameter bereit. Der Chat-MS ermöglicht den Echtzeit-Chat aller Sitzungsteilnehmer. Der Visualisierungs-MS lädt die Werte aus dem Konfigurations-MS, zeigt diese an und aktualisiert die Darstellung bei Änderungen automatisch. Die statischen Komponenten-MS sind dafür zuständig, Fragmente bereitzustellen, die wenig oder keinen dynamischen Inhalt besitzen. In diesem Evaluierungsprototyp liefern die MS die Kopf- und Fußzeilenfragmente, die in der Darstellung aller Kompositionen-MS integriert sind, siehe Bild 63 und Bild 64. [P11]

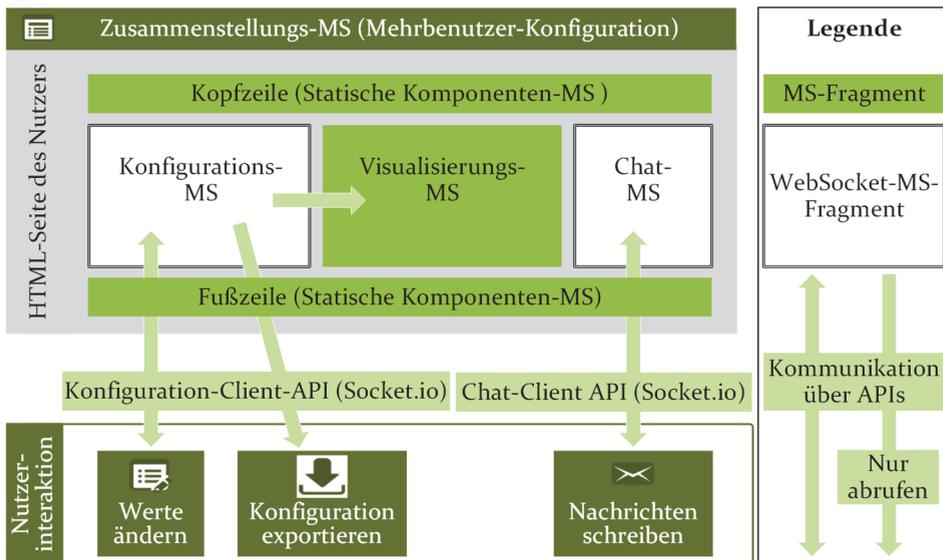


Bild 63: Der Zusammenstellungs-MS (Mehrbenutzer-Konfiguration) fügt die einzelnen MS-Fragmente zu einer HTML-Seite für den Nutzer zusammen [P11]

Dies ermöglicht ein konsistentes Ändern der gesamten Webanwendung, wie z. B. eine Anpassung der Menüpunkte in der Navigationsleiste, siehe Bild 64. Die HTML- und webbrowserbasierte Visualisierung des Zusammenstellungs-MS der Mehrbenutzer-Konfiguration aus Bild 63 ist als Screenshot des Validierungsprototypen in Bild 64 zu sehen. [P11]

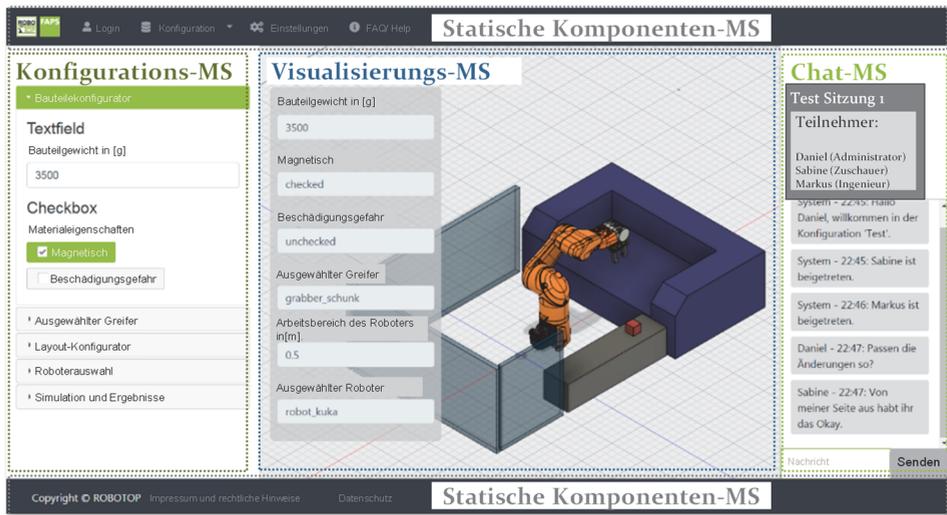


Bild 64: Webbrowserbasierte Visualisierung der Zusammenstellungs-MS (Mehrbenutzer-Konfiguration), mit den MS Konfiguration, Visualisierung, Chat und statische Komponenten [P11]

Hierbei können die verschiedenen Rollen, wie Administrator und Ingenieur im Rahmen der ihnen zugewiesenen Rechte konfigurieren. Administratoren haben die Befugnis, das Ergebnis zusätzlich zu exportieren. Die Zuschauer dürfen das Ergebnis nur mittels der Chatfunktion kommentieren. Auf Basis des Validierungsprototypen wird aufgezeigt, wie eine MSA für Engineeringwerkzeuge insbesondere für web- und wissensbasierte EK technologisch realisierbar ist. Durch den Einsatz von Webtechnologien wird eine einfache Ergänzung durch weitere MS sowie eine Konfigurations-session mit mehreren Nutzern ermöglicht. [P11]

Um den Fokus auf die wesentlichen funktionalen Engineering- und Konfigurations-MS, zu legen, werden aus der Perspektive des Engineerings weniger relevante MS, wie z. B. statische Komponenten- und Kompositions-MS, in der folgenden Architektur nicht als einzelne MS dargestellt.

5.4.2 MSA für Engineering-Konfiguratoren am Beispiel der MS-basierten Webplattform ROBOTOP

Basierend auf den Überlegungen einer MS-basierten Webplattformarchitektur und dem Anwendungsfeld des Vertriebs RA sind gewisse Engineeringfunktionen für einen EK und somit für ein Nutzerfeedback notwendig, siehe Bild 65. Die erste Entwicklungsstufe (P-MVP) konzentriert sich daher auf die Umsetzung von Grundfunktionen für das Engineering.

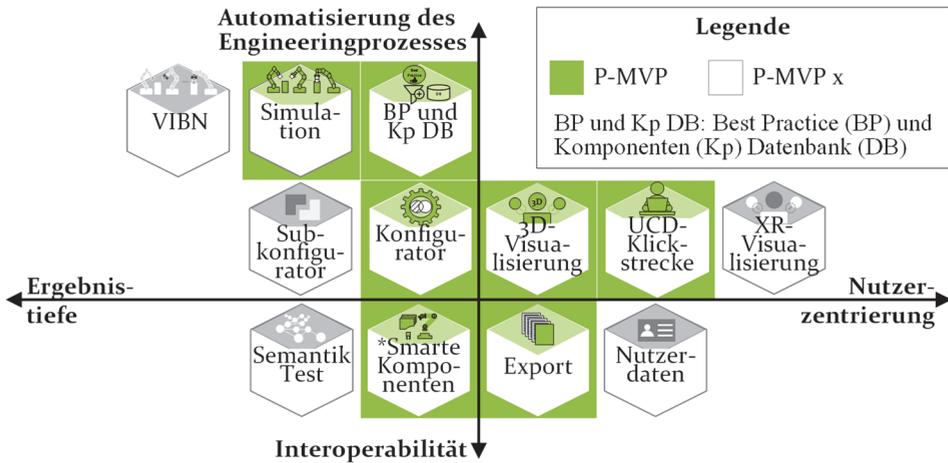


Bild 65: MS der Webplattformarchitektur, unterteilt in MS von ROBOTOP (P-MVP siehe Tabelle 10) und potentielle MS für weitere Funktionen (P-MVP x siehe Tabelle 12)

Die Grundfunktionen werden in weiteren Entwicklungsstufen (P-MVP x) ergänzt. Zur besseren Übersicht werden die MS in vier Dimensionen gegliedert: Nutzerzentrierung, Interoperabilität, Ergebnistiefe und Automatisierung des Engineeringprozesses. In Bild 66 ist die MSA für EK am Beispiel der microservicebasierten Webplattform ROBOTOP (P-MVP) dargestellt. Die MSA ist nach den Phasen der Engineering-Konfiguration aus Kapitel 5.2 strukturiert. Der Nutzer von ROBOTOP ist ein Planer eines produzierenden Unternehmens, der sich über eine geeignete RA informieren bzw. diese konfigurieren möchte. Der MS *UCD-Klickstrecke* stellt zielgruppenspezifische, nutzerzentrierte Klickstrecken zur BP-Auswahl und Anpassungskonfiguration bereit, siehe Kapitel 6.2. [P9]

Ausgehend von der Auswahl einer geeigneten BP, wird deren Stückliste inklusive der 3D-Koordinaten von der MS *Best Practice und Komponenten DB* an den MS *Konfigurator* übergeben. Dieser löst die 3D-Visualisierung der gesamten Szene aus. Der MS *3D-Visualisierung* und *Simulation* fordert die 3D-Geometrien vom MS **Smarte Komponenten* an. Da für eine 3D-Visualisierung und -Simulation viele Funktionen ähnlich sind, werden diese in einem MS kombiniert. Jede Änderung im Konfigurator löst ein Update der Visualisierung aus.

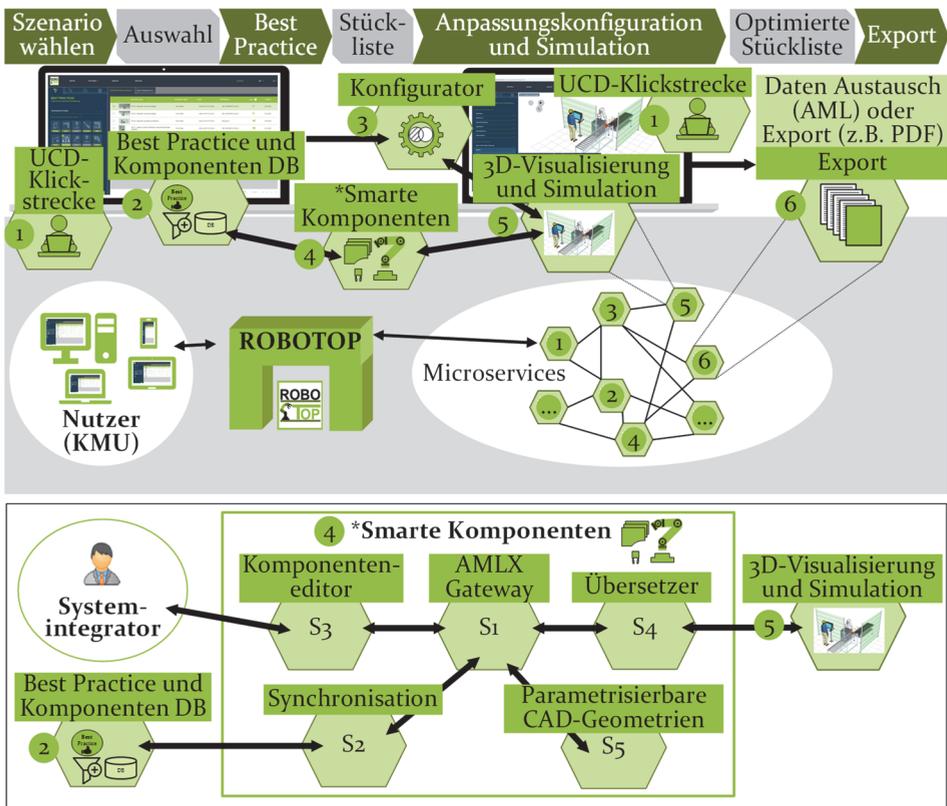


Bild 66: MSA und integrierte Funktionen der ROBOTOP Webplattform als Weiterentwicklung von [P9]

Die detaillierten Funktionen der einzelnen MS sind in Tabelle 10 beschrieben. Für eine einfache Erklärung und Darstellung sind mehrere MS unter dem MS *Smarte Komponenten zusammengefasst, siehe Tabelle 11. Dieser ist für die Bereitstellung der 3D-Geometrien in verschiedenen Zielformaten verantwortlich. Die Architektur und Implementierung des MS *Smarte Komponenten erfolgte durch den ROBOTOP Projektpartner LPS insbesondere durch PENCZEK und BARTEL.

Tabelle 10: Wesentliche MS bzw. Funktionen für EK am Beispiel der MSA-basierten Webplattform ROBOTOP. Die Ausgabe der MS erfolgt in Form von Daten oder einer Webseite (Seite).

Nr.	MS	Funktion	Eingabe	Ausgabe
1	<i>UCD-Klickstrecke</i>	Klickstrecke zur Best Practice- (BP-) Auswahl oder Anpassungskonfiguration der BP	Zielgruppe und Aufgabe (BP-Auswahl, Anpassungskonfiguration)	Zielgruppen- und aufgabenindividuelle Benutzerschnittstelle (Seite)
2	<i>Best Practice und Komponenten DB</i>	BP und Komponenten Datenbank (DB) zur Bereitstellung und Speicherung von Meta-Informationen	Ausgewähltes Best Practice	Best Practice Stückliste, inklusive Parameter und Koordinaten aller Komponenten (Daten)
3	<i>Konfigurator</i>	Individualisieren des Best Practice	Best Practice, inklusive Parameter	Optimiertes Best Practice, inklusive angepasster Parameter (Daten)
4	<i>*Smarte Komponenten</i>	Anlegen, Verwalten und Bereitstellen von 3D-Geometrien in verschiedenen Datenformaten	Komponenten-ID und Datenformat	3D-Geometrie der angeforderten Komponente im gewünschten Datenformat (Daten)
5-1	<i>3D-Visualisierung</i>	Visualisierung der Konfiguration als 3D-Szene	Komponenten-IDs und Koordinaten	Visualisierung aller Komponenten der aktuellen Konfiguration in einer 3D-Szene und Manipulation (Seite)
		3D-Manipulation der aktuellen Konfiguration	Komponenten-ID, Nutzereingabe	
5-2	<i>Simulation</i>	Kinematiksimulation	Best Practice inklusive abzufahrender Positionen	Reichweiten- Kollisions-, Kinematiksimulation, Taktzeit (Daten)
6	<i>Export</i>	Bereitstellung von konfigurierten Lösungen außerhalb der Webplattform	Individualisiertes BP und gewünschtes Ausgabeformat	Export des Ergebnisses z. B. als Bild, Video, PDF oder AML (Daten)

Der *Konfigurator* MS verwaltet die aktuelle Konfiguration und stellt deren Konsistenz auf Basis von Constraints sicher. Im Anschluss an die Konfiguration der RA wird diese mittels einer Simulation abgesichert. Hierbei kann geprüft werden, ob alle erforderlichen Positionen vom Roboter erreichbar sind und ob dies kollisionsfrei möglich ist. Zusätzlich kann eine erste Taktzeit für einen Prozessdurchlauf ermittelt werden. Die Taktzeit wird z. B. für die Wirtschaftlichkeitsrechnung benötigt. Der MS *Export* konvertiert die konfigurierte Lösung in die notwendige Ausgabe- bzw. Austauschformate. Für das Engineering kann AutomationML (AML) als Datenaustauschformat zwischen Engineeringwerkzeugen verwendet werden. Der Einkauf kann Angebotsdokumente als PDF oder als Präsentation exportieren. Für ein verbessertes Nutzerverständnis können automatisiert Bilder oder Videos der RA eingebettet bzw. exportiert werden.

Tabelle 11: Beschreibung der *Smarte Komponenten MS. Hierbei wird bei der Ausgabe in Daten und die Darstellung einer Webseite (Seite) unterschieden

Nr.	MS	Funktion	Eingabe	Ausgabe
S ₁	AMLX Gateway	Systemneutrale Komponentenbeschreibung	Komponententyp	Komponentenbeschreibung (Daten)
		API zur automatischen Erstellung neuer Komponenten	3D-Geometrie und Komponentenparameter	Neue Komponente in standardkonformem Datenformat (Daten)
S ₂	Synchronisation	Synchronisation mit der Best Practice und Komponenten DB	Komponenten-ID und Datenformat	3D-Geometrien der angeforderten Komponente (Daten)
S ₃	Komponenteneditor	Klickstrecke zur 3D-Geometrie Erstellung und Bearbeitung	Zielgruppe	2D-Benutzerschnittstelle zur API des AMLX Gateway (Seite)
S ₄	Übersetzer	Konvertieren der 3D-Geometrie in unterschiedliche Datenformate	Komponenten-ID und Datenformat	3D-Geometrie der angeforderten Komponente im gewählten Datenformat (Daten)
S ₅	Parametrisierbare CAD-Geometrien	Bereitstellen von parametrisierbaren CAD-Geometrien wie z. B. Würfel, Zylinder usw.	Geometriertyp und Parameter	3D-Geometrie der angeforderten Komponente (Daten)

Um aufzuzeigen, wie vielfältig das Weiterentwicklungspotential von EK auf Basis einer MSA ist (P-MVP x), werden exemplarisch weitere MS genannt. Zur Optimierung der Konfiguration können Sub- bzw. Produktkonfiguratoren eingebunden werden. Diese enthalten z. B. das Expertenwissen der Komponentenhersteller, was eine detailliertere Auslegung der Komponenten ermöglicht, wie von werkstückindividuellen Endeffektoren. Als Beispiel wäre die Firma Schunk zu nennen, die mit dem Tool *yCalc* auf Basis von Grund-, Werkstückdaten und der Greifsituation einen individuellen Greifer berechnet, auslegt und vorschlägt [168]. Mit dem Tool *eGRIP* werden die passenden Greiferbacken auf Basis der CAD-Geometrien des Werkstücks generiert [169].

Als weitere Entwicklungsstufe ist ein MS *XR-Visualisierung* sinnvoll. Dieser ermöglicht die Darstellung und Konfiguration der RA über VR- oder AR-Geräte. Zwei Beispiele zur Umsetzung von VR- und AR-Nutzerschnittstellen werden in Kapitel 6.2.4 vorgestellt.

Tabelle 12: Übersicht über die P-MVP x MS, die Funktion sowie Eingabe und Ausgabe. Hierbei wird bei der Ausgabe in Daten und die Darstellung einer Webseite (Seite) unterschieden [Pg]

Nr.	MS	Funktion	Eingabe	Ausgabe
x.1	Sub-konfigurator	Optimierung bzw. Anpassung der Komponente z. B. über einen Produktkonfigurator	Komponente (z. B. Endeffektor) und weitere Nutzereingaben	Optimierte Komponente (Daten)
x.2	XR-Visualisierung	Visualisierung der Informationen für VR-, AR- oder weitere Benutzerschnittstellen	Komponenten-IDs und Koordinaten	XR-Darstellung (VR, AR) aller Komponenten in einer Szene (Seite)
x.3	VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme zur steuerungsseitigen Absicherung	Individualisiertes Best Practice	Abgesicherte und getestete Lösung (Daten)
x.4	Nutzerdaten	Speicherung und Bereitstellung von getätigten Nutzereingaben, für eine bessere Nutzbarkeit des Konfigurators	Nutzer-ID	Nutzereingaben wie z. B. Branche, Rolle der Person, bisherige Entscheidungen (Daten)
x.5	Semantik Test	Konsistenzprüfung der Datenmodelle der einzelnen MS	Datenmodell	Hinweis über inkonsistente Bestandteile (Daten)
x.6	Chat	Chat zwischen mehreren Nutzern	Texteingabe der einzelnen Nutzer	Textverlauf aller Nutzer (Seite)
x.x	Weitere	...	...	...

Darüber hinaus können die konfigurierten RA mittels des MS *virtuellen Inbetriebnahme (VIBN)* steuerungsseitig abgesichert und getestet werden. Über den MS *Nutzerdaten* können dargestellte Inhalte personalisiert und eine wiederholte Eingabe derselben Daten über verschiedene Planungssessions vermieden werden. Hierzu gehören z. B. Nutzerprofildaten wie die Kontaktdaten, die Branche, oder gespeicherte Konfigurationen. Der MS *Semantik Test* prüft die Konsistenz der Datenmodelle sowie Eingaben und Ausgaben der übrigen MS. Ein *Chat* MS ermöglicht die Einbringung einer Chatfunktion bei Mehrbenutzeranwendungen. Die genannten MS sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Daneben sind noch zahlreiche weitere MS möglich, welche je nach Entwicklung des Geschäftsmodells und der Zielgruppe ergänzt werden können. Da der Schwerpunkt der eigenen Forschungstätigkeit auf dem web- und wissensbasierten EK (Kapitel 5) und der Methode zur Entwicklung von EK (Kapitel 6) liegt, werden diese Aspekte im Folgenden detaillierter betrachtet.

5.4.3 Validierung der MSA des Engineering-Konfigurators entlang der Implementierung von ROBOTOP

Unter den genannten Rahmenbedingungen wird der Konfigurationsprototyp des EK und dessen Logik entworfen. Durch den constraintbasierten Konfigurationsansatz ist eine sukzessive Optimierung und Verfeinerung der Logik und somit der Konfigurationsergebnisse möglich. Für den Prototyp der ROBOTOP Webplattform wird die Grobkonzeptplanung von RA auf die wesentlichen Schritte sowie Kernparameter reduziert. Das sind diejenigen Schritte, die den größten Einfluss auf die nachfolgende Planung haben und richtungsweisende Entscheidungen vorgeben, siehe Kapitel 2.2.1.

Um die BP-Kategorie und damit den Prozess einzugrenzen, werden die BP auf Basis einer generischen Aufgabenbeschreibung gefiltert, siehe Bild 67. Diese BP-Kategorien sind z. B. Montage, Pick & Place (Kommissionieren), Fräsen, Schleifen, Bohren, Beschichten, Prüfen oder Maschinenbeladen.

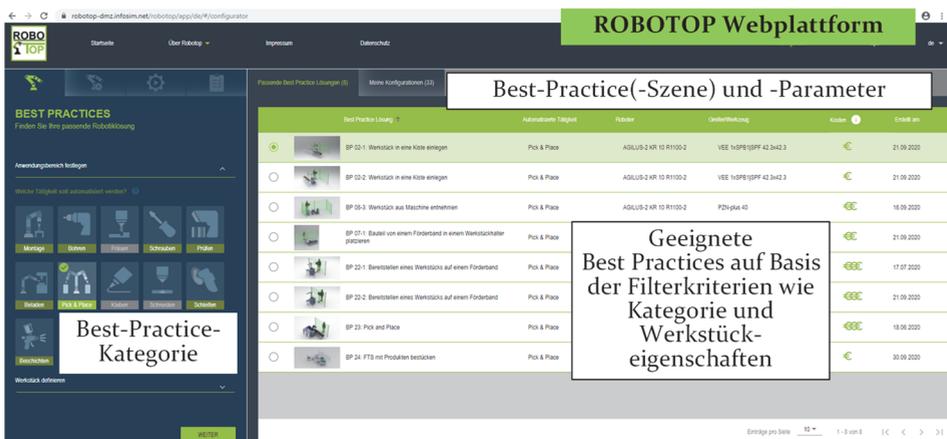


Bild 67: ROBOTOP Webplattform, BP-Filterung auf Basis der BP- bzw. Tätigkeitskategorie sowie Werkstück- bzw. Produktparameter (Phase 1 - grobe Einordnung)

Die Werkstückeigenschaften, wie z. B. Grundgeometrie, Abmaße und Gewicht, werden für eine zusätzliche Filterung der BP verwendet. Die gewählte BP wird im nächsten Schritt als Ausgangsparametersatz für die Anpassungskonfiguration verwendet. Im Rahmen von ROBOTOP wurden insgesamt 34 initiale BP-Szenen akquiriert und aufbereitet. Diese dienen als Datengrundlage für die Durchführung der webbasierten EK. Die 3-Ebenen Architektur sowie die Methode zur modularen Aufbereitung der BP wird in Kapitel 6.3 eingeführt. Hierdurch wird der Aufbereitungsprozess der BP optimiert sowie eine noch effizientere EK auf Basis von Prozessmodulen ermöglicht.

Für die Anpassungskonfiguration der BP verfügt die Webplattform ROBOTOP über den MS *Konfigurator*. Hierbei können die Komponenten, wie z. B. Roboter und Greifer, konfiguriert werden. Die im Hintergrund liegenden Constraints stellen die Konsistenz bei der Konfiguration sicher. Die detaillierte Aufbereitung und Entwicklungsmethode von logischem Expertenwissen, wie z. B. Constraints, wird in Kapitel 6.4 adressiert. Die BP wird über den MS *3D-Visualisierung* und *Simulation* angezeigt, siehe Bild 68. Im Hintergrund stellt der MS *Smarte Komponenten* die notwendigen 3D-Geometrien für die Visualisierung und Simulation bereit. Zusätzlich ist das Einfügen weiterer Planungselemente möglich. Über eine manuelle Interaktion mit der Szene können bestehende Komponenten repositioniert oder entfernt werden. [P12]



Bild 68: Prototyp der ROBOTOP Webplattform, Anpassungskonfiguration mit 3D-Visualisierung und Simulation der BP-Szene (Phase 2 - Individualisierung)

Nach Abschluss der Anpassungskonfiguration sowie der Optimierung der BP-Szene kann diese simuliert werden. Als Basis für die Kinematiksimulation müssen vorab die Bahnpunkte des Roboters sowie die Interaktion mit dem Werkstück angelegt werden. Diese werden dann im Rahmen der Simulation der Reihe nach abgearbeitet. Über die Exportfunktion kann die angepasste BP in Form einer Grafik oder als AML-Datei weitergegeben werden. Durch die vorgestellten Funktionen steht somit eine effiziente Top-down Alternative für die Bottom-up Planung von RA zur Verfügung. Zusammenfassend wurde damit der webbasierte EK und dessen MSA entlang der Implementierung der ROBOTOP Webplattform zur Planung von RA ganzheitlich implementiert und validiert.

Somit kann die erste Forschungsfrage, die im Rahmen dieser Dissertation adressiert ist, mit ja beantwortet werden:

- 1) **Forschungsfrage:** Kann das Engineering von RA vereinfacht und skalierbar optimiert werden?

In Kapitel 5 wird aufgezeigt, wie mithilfe des EK über einen Top-down Ansatz auf Basis von BP die Grobplanung von RA optimiert und vereinfacht wird. Die wesentlichen Schritte der EK sind die BP-Auswahl und die Individualisierung der BP (Anpassungskonfiguration) auf Basis von logischem Expertenwissen (Constraints). Die Skalierbarkeit der EK wird im Rahmen einer microservicebasierten Webplattform erreicht. Die Validierung erfolgt über die Implementierung eines Teilprototypen für die MSA sowie über die Webplattform ROBOTOP.

5.4.4 Herausforderungen bei der Entwicklung web- und wissensbasierter Engineering-Konfiguratoren

Im Allgemeinen wird die Informationsbeschaffung als der erste kritische Schritt im Lebenszyklus des Wissens betrachtet [170]. Da EK eine explizite Darstellung von Wissen benötigen, müssen Domänenexperten und Wissensingenieure viel Zeit in den Erwerb und die Aktualisierung von Wissen investieren. Dies wird auch als Flaschenhals der Wissensakquisition (engl. knowledge acquisition bottleneck) bezeichnet [171]. Dennoch fehlt es nach wie vor an Methoden, die eine strukturierte Arbeitsteilung in der Wissensakquisition auf Basis vordefinierter Ergebnisse ermöglichen [124]. Auch wurden die meisten Methoden für den Wissenserwerb für PK entwickelt, wobei deren Funktionsumfang und Fokus inhärent gegeben sind [P1].

Insbesondere da web- und wissensbasierte EK einen neuen Ansatz darstellen, gibt es für diese somit noch keine Methode zur strukturierten, agilen Entwicklung und Wissensakquise. Bei der Entwicklung von EK besteht eine hohe Unsicherheit aufgrund des nur bedingt vorab definierbaren Funktionsumfangs, siehe Kapitel 5.1.1. Bedingt durch die Komplexität der Aufgabenstellung war das Vorgehen bei der Entwicklung von ROBOTOP agil und zyklisch. Das SECI-Modell [172] eignet sich zur Strukturierung und Vermittlung der Zyklen, siehe Bild 69.



Bild 69: Zyklen bei der Entstehung von ROBOTOP, strukturiert anhand der Phasen des SECI-Modells [172], mit eigenen Beispielen sowie Konkretisierung für ROBOTOP

Ausgehend von der (1) Externalisierung bzw. digitalen Dokumentation des Engineeringwissens sowie erster Teilprototypen, erfolgte dessen modulare, kondensierte Aufbereitung entlang der (2) Kombination. Auch werden im Rahmen der Kombination die Prototypen des EK entwickelt. Die Prototypen werden in der Phase der (3) Internalisierung als Feedbackgrundlage für die agile Weiterentwicklung eingesetzt. Unter Internalisierung wird hierbei z. B. die Vermittlung von Engineeringwissen bei den Nutzern verstanden. Zusätzlich können weiteren relevanten Stakeholder, wie z. B. Systemintegratoren, auf Basis der Prototypen ein strukturiertes Feedback geben. Ergänzend besteht der Vorteil der Prototypen darin, dass diese die (4) Sozialisation unterstützen. Ein VR-EK bzw. -Demonstrator kann als Diskussionsgrundlage verwendet sowie für die praktische Wissensvermittlung in der Lehre eingesetzt werden. Ausgehend von dem Feedback der wichtigsten Stakeholder werden wiederum die Anwendungsszenarien und Anforderungen zyklisch verfeinert (1). Dann werden wieder die BP, Constraints, Konfigurationsmodelle und Prototypen ergänzt und optimiert (2). Hierdurch wird der nächste Zyklus eingeleitet.

Für die zyklische und agile Entwicklung von web- und wissensbasierten EK bestehen nach der Erfahrung aus dem Projekt ROBOTOP somit mehrere Herausforderungen. Einerseits besteht ein Bedarf bei der Identifikation geeigneter Anwendungsszenarien sowie der daraus abgeleiteten Anforderungen für den EK. Andererseits fehlen Konzepte und Methoden, um Produktionsanlagen generisch und reproduzierbar aufzubauen. Denn das Expertenwissen für EK wird in strukturierter Form für die Top-down Planung benötigt, z. B. in Form von BP, Prozessmodulen, Komponenten sowie Constraints. Die Bereitstellung des Engineeringwissen durch Systemintegratoren ist dabei sowohl in strukturierter als auch nicht strukturierter Form eine Herausforderung. Dies ist zum einen dadurch bedingt, dass die Systemintegratoren kein wirtschaftliches Interesse an einer Weitergabe von Expertenwissen haben. Zum anderen liegt dies darin begründet, dass die interne Dokumentation nach firmenspezifischen Qualitätsstandards erfolgt. Aufgrund der Zyklizität sowie der fehlenden Struktur für die Entwicklung von Engineering-Konfiguratoren besteht somit ein weiterer Handlungsbedarf. Hieraus ergeben sich folgende zusätzliche zu prüfende Forschungsfragen.

Folgende weitere Forschungsfragen zur Entwicklung von Engineering-Konfiguratoren sollen daher beantwortet werden:

- 2) Kann die spätere Nutzbarkeit von Engineering-Konfiguratoren für verschiedene Zielgruppen bei der Entwicklung berücksichtigt werden?
- 3) Kann die Wissensbasis von Engineering-Konfiguratoren modular und wiederverwendbar aufbereitet werden?
- 4) Können web- und wissensbasierte Engineering-Konfiguratoren agil konzeptioniert und entwickelt werden?

Diese Forschungsfragen sollen im nachfolgenden Kapitel im Detail adressiert und beantwortet werden. Daher wird aufbauend auf den Erfahrungen bei Konzeption und Entwicklung von ROBOTOP, eine Methode eingeführt und vorgestellt, um web- und wissensbasierte Engineering-Konfiguratoren zielgerichtet und agil entwickeln zu können.

6 Methode für die agile Entwicklung von Engineering-Konfiguratoren

Als Grundlage für eine agile Entwicklung von EK sind die folgenden drei Aspekte von besonderer Bedeutung: die nutzerzentrierte Perspektive auf EK, die modulare Aufbereitung der fallspezifischen RA sowie die Modellierung der Konfigurationslogik. Basierend auf diesen drei Aspekten bzw. Wissensbereichen wird eine Methode zur Entwicklung von EK eingeführt und strukturiert. Für die drei Wissensbereiche wird je eine Teilmethode bereitgestellt.

Einzelne Aspekte der Ausführungen der Folgeabschnitte 6.1 bis 6.5 sind an die am Lehrstuhl FAPS entstandenen und vom Autor kobetreuten studentischen Arbeiten [S₁, S₂, S₅, S₁₁, S₁₈, S₁₆, S₁₉–S₃₅] angelehnt. Bestandteile und Vorarbeiten der dargestellten Methoden und Erkenntnisse wurden auch der internationalen Fachwelt in den vom Autor erstellten Veröffentlichungen [P₁, P₆, P₅, P₉–P₁₁, P₁₃–P₁₆] zugänglich gemacht, die Abschnitte und Abbildungen sind dementsprechend gekennzeichnet.

6.1 Architektur und Rollen für die agile Wissensakquise

Eine der primären Herausforderungen bei der Entwicklung von wissensbasierten Konfiguratoren sowie der Wissensakquise ist es, dass meist mehrere Experten Teilaspekte des Wissens in einer inhomogenen, impliziten Form besitzen [1, 122]. Um die Arbeitsteilung entlang eines agilen Entwicklungsprozesses von EK zielgerichtet zu ermöglichen, ist eine Aufteilung entlang eines ganzheitlichen Konzepts notwendig.

6.1.1 Drei Wissensbereiche ($W_1 - W_3$) als unabhängige Bereiche für die agile Entwicklung von EK

Im Folgenden wird daher eine Methode eingeführt, um EK agil zu entwickeln und deren Wissens Elemente modular aufzubereiten, damit diese bei ähnlichen Projekten wiederverwendet werden können. Die Methode wird in drei Wissensbereiche (W) für EK unterteilt, siehe Bild 70:

- 1) das Wissen über den Anwendungsfall bzw. die Nutzer (W_1),
- 2) die Best Practices als fallspezifisches Lösungswissen (W_2) und
- 3) das generische bzw. logische Expertenwissen (W_3)

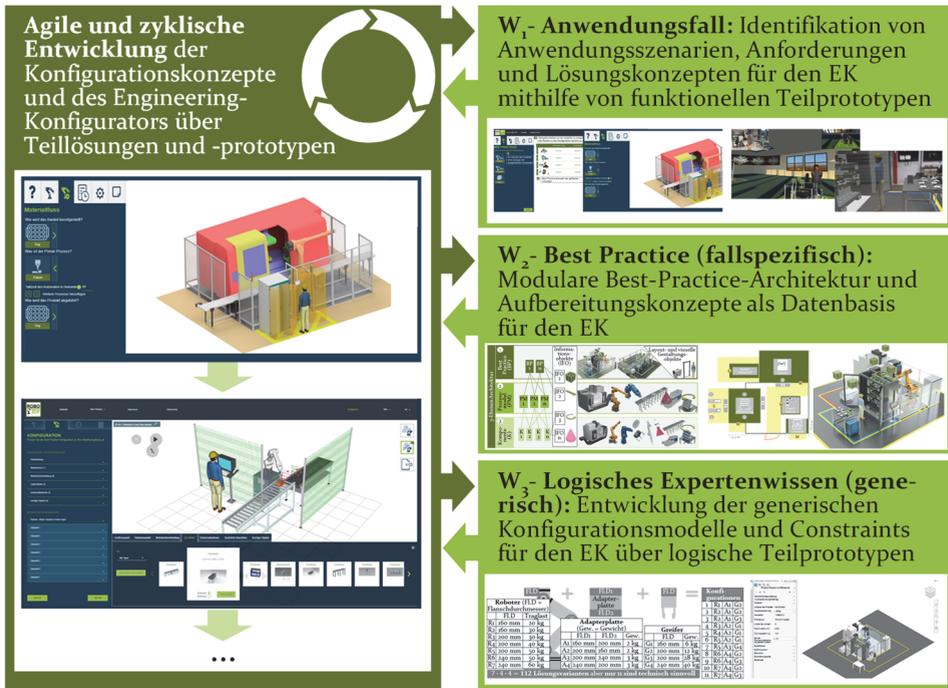


Bild 70: Drei übergeordnete Wissensbereiche (W) zur Strukturierung der agilen Entwicklung nutzerzentrierter Engineering-Konfiguratoren

Die drei Wissensbereiche (W) sind unabhängig. Dadurch kann deren Entwicklung agil auf mehrere Teams oder Firmen aufgeteilt werden. Die individuellen Vorgehensmodelle für die genannten Wissensbereiche werden in den jeweiligen Unterkapiteln 6.2 (W₁), 6.3 (W₂) und 6.4 (W₃) vorgestellt.

6.1.2 Rollen entlang der agilen Wissensarbeit

Den Wissensbereichen lassen sich verschiedene Rollen zuordnen, welche für deren Umsetzung notwendig sind. Daneben gibt es übergeordnete Rollen, welche zur Fokussierung, Strukturierung und Koordination des Gesamtprozesses erforderlich werden. Dabei erweitert ein Expertensystem die Architektur eines wissensbasierten Systems um Benutzerinteraktionsfunktionalitäten, rollenspezifische Benutzerschnittstellen sowie Interview-, Erklärungs- und Wissenserwerbskomponenten [4]. Koordiniert, methodisch angeleitet und strukturiert wird der Wissens-Entwicklungsprozess vom Wissensingenieur, siehe Bild 71. Zusätzlich werden im Rahmen dieser Arbeit die Rollen des Managements, der Strategischen IT und des UCD-Ingenieurs im Kontext von Expertensystemen eingeführt. Für die Formulierung der Vision und des strategischen Rahmens ist das Management zuständig.

Die Strategische IT bewertet den technologischen Aufwand auf Basis der am Markt verfügbaren Technologien. Der UCD-Ingenieur verantwortet die nutzerzentrierten Aspekte des Entwicklungsprozesses.

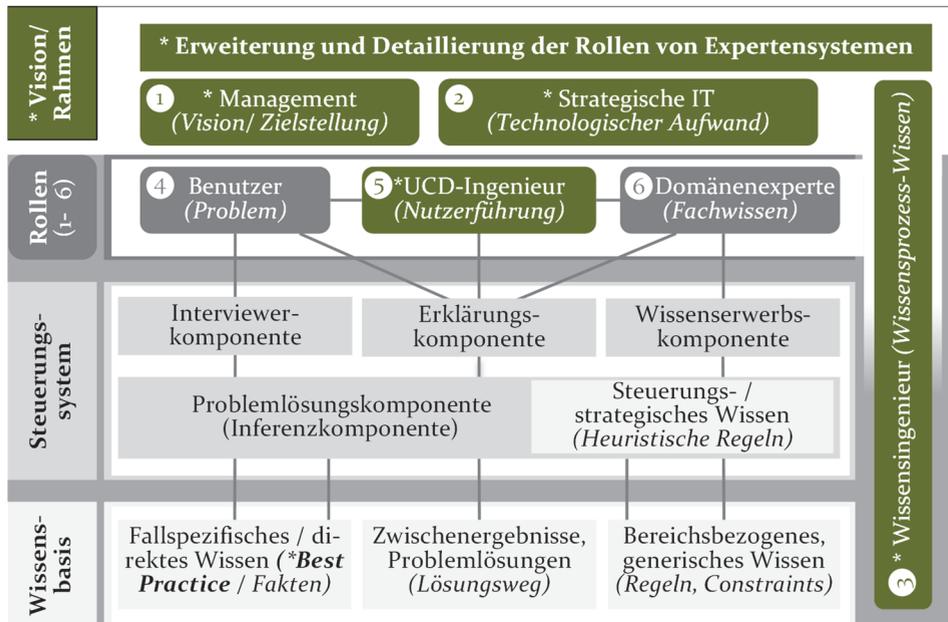


Bild 71: Erweiterung (*) der Architektur von Expertensystemen durch die Rollen 1 und 2 sowie Detaillierung des Entwicklers in die Rollen 3 und 5 – kondensiert aus [4, 11, 43, 63, 106, 117]

Bei einem arbeitsteiligen, nutzerzentrierten Engineering-Konfigurationsprojekt sind sechs Rollen vorteilhaft, wobei eine Person in kleineren Teams mehrere Rollen innehaben kann, inspiriert durch [4, 11, 43, 63, 106, 117]:

- 1) **Management:** Das Management definiert die Ziele und ermittelt den Kundenbedarf bzw. -nutzen. Die Aufgabe des Managements ist die Klärung des generellen Projektrahmens, der Bedarfsermittlung sowie der Frage, wie Kosten für die Entwicklung und den Betrieb amortisiert werden können. Auch die strategischen Entscheidungen bei der Auftragsvergabe bzw. bei der Priorisierung einzelner Teilfunktionen während der Entwicklung werden durch das Management getroffen.
- 2) **Strategische IT:** Die Strategische IT prüft die technische Machbarkeit, Implementierbarkeit und Skalierbarkeit von Softwarewerkzeugen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung des IT-technischen Aufwands für die Inbetriebnahme (einmalig) sowie den Betrieb und die Wartung (n-Mal). Bei der Auswahl der erforderlichen Entwicklungswerkzeuge und Technologien unterstützt die Strategische IT die übrigen Rollen.

- 3) **Wissensingenieur:** Der Wissensingenieur strukturiert den Wissensprozess und stellt die nachhaltige Aufbereitung sicher. Durch die zielgerichtete Auswahl der Prozesse sowie die Anforderungen an die IT-Werkzeuge unterstützt er die Harmonisierung des Gesamtprozesses und ermöglicht Skaleneffekte in der Wissensarbeit. Dabei besitzt der Wissensingenieur Fachwissen über Wissens- bzw. Konfigurationstechnologien, Wissensakquise- und Aufbereitungsprozesse und arbeitet eng mit dem Domänenexperten zusammen.
- 4) **Nutzer:** Der Nutzer ist ein operativer Mitarbeiter in einem realen Geschäftsprozess, welchen es zu optimieren gilt. Somit testet der Nutzer die Anwendung bzw. EK. Anschließend gibt der Nutzer Feedback hinsichtlich Nutzbarkeit sowie Nützlichkeit für seine operative Tätigkeit.
- 5) **UCD-Ingenieur:** Der UCD-Ingenieur leitet den Entwicklungsprozess hinsichtlich des Aspekts der Nutzerzentrierung der Anwendung. Somit ist dieser für eine höhere Kundenzentrierung sowie bessere Nutzbarkeit der Benutzerschnittstellen von Anwendungen, wie Expertensystemen bzw. EK, verantwortlich. [106]
- 6) **Domänenexperte:** Der Domänenexperte verfügt über das notwendige meist implizite Experten- bzw. Fachwissen als Datengrundlage für Expertensysteme und EK. Typische Domänenexperten sind z. B. Entwicklungsingenieur, Marketingexperte oder Vertriebsexperte. Unter Anleitung des Wissensingenieurs wird das implizite Fachwissen der einzelnen Personen formalisiert und in den EK integriert.

6.2 Methode zur Entwicklung nutzerzentrierter Engineering-Konfiguratoren (W_1)

Ziel des ersten Wissensbereichs (W_1) ist es, die Anwendungsszenarien sowie die involvierten Nutzer des EK zu identifizieren, zu konkretisieren und zu validieren. Dies geschieht auf Basis von funktionellen Teilprototypen. Dem Nutzer soll durch den Teilprototyp auf eine einfache Weise von seiner Problemstellung hin zu der bestmöglichen Lösung assistiert werden. Die Lösung (bzw. das konfigurierte Ergebnis) soll hierbei über eine möglichst kurze Entscheidungskette gefunden werden. Daneben soll die Einarbeitungszeit eines Nutzers in den Prototyp minimiert werden. Ausgehend von dem finalen Prototyp werden die Anforderungen für die jeweiligen Funktionen des EK abgeleitet, bewertet und priorisiert. Die Funktionen dienen als Entwicklungsbasis für den web- und wissensbasierten EK und werden in diesen sukzessiv integriert. [P₁, P₁₀]

Durch die funktionellen Teilprototypen entsteht zusätzlich eine Kommunikationsbasis für das Management, um die Anwendungsszenarien den involvierten Stakeholdern zu kommunizieren und mit diesen zu diskutieren. Hierdurch können die Anwendungsszenarien weiter verfeinert werden.

6.2.1 Unterscheidung zwischen Expertenkonfiguratoren und Engineering-Konfiguratoren

Im Zuge dieser Forschungsarbeit wird zwischen Expertenkonfiguratoren und Engineering-Konfiguratoren unterschieden, siehe Bild 72. Engineering-Konfiguratoren sind um anwendungs- und zielgruppenspezifische Benutzerschnittstellen erweitert, welche anhand fallspezifischer Benutzerschnittstellen durch den Konfigurationsprozess führen. [P10]

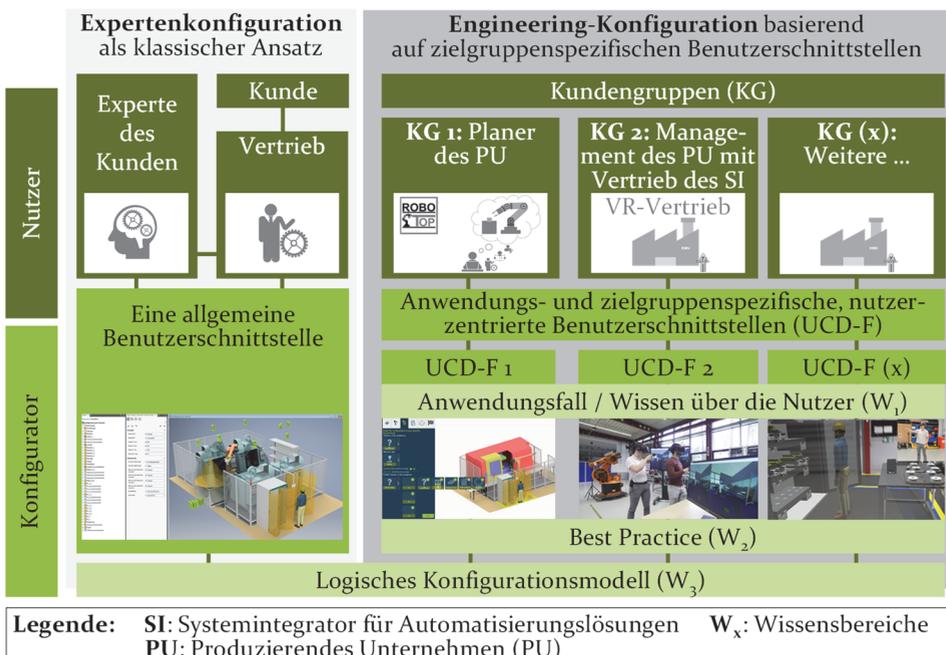


Bild 72: Gegenüberstellung von Expertenkonfiguratoren und Engineering-Konfiguratoren sowie deren Benutzerschnittstellenausprägung [P10]

Die Entwicklungsmethode wird in Kapitel 6.2.2 eingeführt. Diese wird exemplarisch an der Kundengruppe eins in Kapitel 6.2.3, dem Planer eines produzierenden Unternehmens, der eine RA für die Fertigung konzeptionieren sowie beschaffen möchte, validiert. Kundengruppe eins ist auch der initiale Anwendungsfall von ROBOTOP. Abschließend werden in Kapitel 6.2.4 weitere mögliche Anwendungsszenarien für den EK aufgezeigt.

6.2.2 Methode zur Entwicklung nutzerzentrierter Benutzerschnittstellen für Engineering-Konfiguratoren

Die Entwicklung nutzerzentrierter EK kann in sieben Phasen untergliedert werden: (1) Der Projektstart, (2) die Nutzungskontextanalyse, (3) die Erhebung der Nutzungsanforderungen, (4) die Initialisierung des Prototyps, (5) die Entwicklung, (6) die Freigabe des Prototyps und (7) der Livebetrieb des EK, siehe Bild 73.



Bild 73: Methode zur Entwicklung von Benutzerschnittstellen für EK mittels agiler Prototypenentwicklung und Optimierung

(1) Projektstart: Durch Kundengespräche und die Erfahrung aus dem Tagesgeschäft identifiziert das Management einen neuen Anwendungsfall für den EK. Basierend auf diesem Anwendungsfall wird der Projektstart als ein Entwicklungsauftrag durch das Management ausgelöst. Der Anwendungsfall bzw. Entwicklungsauftrag sowie die spezifische Nutzergruppe gibt die grundlegende Richtung für die nachfolgende Entwicklung vor.

(2) Nutzungskontextanalyse: Im nächsten Schritt werden die Interessengruppen analysiert. Dies kann im Rahmen von Gesprächen mit den Stakeholdern, durch die Beobachtung und Interviews von potentiellen Nutzern sowie durch eine zusätzliche Literaturrecherche erfolgen. Basierend auf dieser Analyse werden die spezifischen Merkmale der Nutzer, deren Arbeitsaufgaben sowie deren Ziele aufbereitet. Zusätzlich erfolgt die Konzeption von mindestens einer Proto-Persona. Diese ist ein hypothetisch archetypischer bzw. exemplarischer Nutzer der Anwendung. Die konstruierte Proto-Persona dient als Diskussionsgrundlage für die Analyse der weiteren Nutzeranforderungen.

(3) Nutzungsanforderungen: Ausgehend von der Proto-Persona werden das Navigationsdesign (Nutzerführung) und Informationsdesign (Informationsaufbereitung) in Form von Anforderungen aufbereitet.

(4) Initialisierung des Konzeptprototyps: Im Rahmen eines Workshops erfolgt die Initialisierung des Konzeptprototyps der Benutzerschnittstelle. Bei dem Workshop sollten Domänenexperten wie z. B. ein Vertriebsmitarbeiter, ein Technologieexperte, sowie ein Wissensingenieur und ein UCD-Ingenieur vertreten sein. Die Nutzungskontextanalyse und -anforderungen werden hierbei als Diskussionsgrundlage für ein erstes Brainstorming verwendet. Mittels agiler Ansätze sowie einfacher Hilfsmittel werden die Zielgruppe, Konzeptidee und der Ablauf skizziert und mittels Grafiken visualisiert. Der Vertrieb als Domänenexperte besitzt eine heuristische Wissensbasis in Form von Vertriebsleitfäden, Zielgruppenanalysen, Marktdaten und Kundenfeedback. Diese Informationen können als Ausgangsbasis verwendet werden, um die Zielgruppe zu konkretisieren. Auf Basis der Konzepte wird dann ein Konfigurationsworkflow entworfen und über eine Präsentation visualisiert.

(5) Entwicklung: Die eigentliche Entwicklung des Prototyps der Benutzerschnittstelle für einen EK unterteilt sich in Experten- und Nutzertests. Ziel der Expertentests ist es zunächst, das notwendige Fachwissen als Wissensbasis in den Prototyp zu integrieren. Anschließend wird der Prototyp im Rahmen der Nutzertests verständlich aufbereitet.

(5.1-5.2) Expertentest: Der Expertentest gliedert sich in zwei Phasen. Die ersten Expertentests (5.1) können mittels einer rein grafischen Darstellung beginnen. Hierzu kann die Präsentation des Konzeptprototyps verwendet werden, welche den Konfigurationsworkflow enthält. Hierbei zeigt der UCD-Ingenieur den Prototyp zuerst einzelnen oder mehreren Experten und arbeitet deren Feedback ein. Das Ziel ist es, das notwendige Expertenwissen in den Prototyp zu integrieren. Zusätzlich kann widersprüchliches Feedback in einer Expertengruppe diskutiert werden, um hierfür einen optimalen Konsens zu finden. Anschließend wird der optimierte Konzeptprototyp in einen interagierbaren, webbasierten Klickprototyp überführt, siehe Bild 74. Dieser wird an die einzelnen Experten verteilt. Die Experten testen den Prototyp (5.2.) und geben konkrete Verbesserungsvorschläge, z. B. über kommentierte Screenshots. Sobald vermehrt widersprüchliches Feedback gegeben wird, ist ein ausreichender Reifegrad erreicht. Dann können die Nutzertests beginnen.

(5.3- 5.4) Nutzertest: Nach der inhaltlichen und fachlichen Überarbeitung anhand der Expertenrückmeldungen wird der Ablauf dekomponiert. Zusätzlich wird dieser mit erklärenden Informationen angereichert. Das Ziel ist es hierbei, den Prototyp für die jeweilige Zielgruppe möglichst verständlich aufzubereiten. Durch iterative Nutzertests werden Konsistenzlücken aufgezeigt. Die nutzerzentrierte Optimierung erfolgt in zwei Teilschritten. Zuerst (5.3) wird der Prototyp per Live- oder Webdemonstration einer Nutzergruppe vorgeführt und mit dieser diskutiert. Währenddessen werden Verständnisprobleme und Verbesserungsvorschläge gesammelt. Diese werden in den Prototyp eingearbeitet. Im zweiten Teilschritt (5.4) erfolgt der Nutzertest des webbasierten Klickprototyps. Der Nutzertest kann über eine Trackingsoftware wie z. B. *Google Analytics* [173] aufgezeichnet werden. Hierbei können die Klickstrecke, die Abbruchrate, der Zeitverlauf und weitere Parameter automatisch gemessen und statistisch ausgewertet werden. Auf diese Weise können verschiedene Varianten der Benutzerschnittstelle bzw. des Prototyps gegenübergestellt werden. Dieses Vorgehen unterstützt einen evolutionären Entwicklungsansatz. Je Testiteration können bis zu 3-4 verschiedene Prototypvarianten getestet werden. Die beste Variante wird in der nächsten Iterationsschleife weiter optimiert. Nach Abschluss oder parallel zu der Klickprototypenentwicklung erfolgt die Dokumentation der Klickstrecke bzw. des Konfigurationsworkflows. Die Dokumentation kann in Form eines BPMN- oder UML-Diagramms erfolgen. Die kondensierte Logik vereinfacht die Implementierung des Konfigurationsworkflows innerhalb des operativ eingesetzten Systems.

(6) Freigabe des Prototyps: Der Prototyp wird in regelmäßigen Meetings durch das Management inspiziert. Wenn der Prototyp vom Management als „gut genug“ bzw. als „für erste Pilotkunden präsentierbar“ eingestuft wird, erfolgt die Freigabe. Andernfalls werden die Anforderungen zur Optimierung der Prototypen iterativ konkretisiert bis die Freigabe erfolgt.

(7) Livebetrieb des EK: Nach der Freigabe des Prototyps werden dessen Ablauf und Logik in dem Livesystem des EK implementiert. Im Anwendungsfall von ROBOTOP wurde der agil entwickelte Klickprototyp als Implementierungsgrundlage für die Benutzerschnittstelle verwendet. Beim Livebetrieb des EK steht eine größere Nutzerbasis zur Verfügung als in der Prototypenphase. Das Livesystem kann dann wieder mittels Trackingsoftware überwacht und analysiert werden. Um die Benutzerschnittstelle agil und dynamisch anpassen sowie erweitern zu können, sollte der Klickprototyp parallel weiterentwickelt werden. Hierdurch können neue Konzepte schnell, aufwands- und risikoreduziert getestet werden, ohne das Livesystem zu beeinträchtigen.

6.2.3 Validierung mittels prototypischer Implementierung anhand des Anwendungsfalls 1 für Planer des PU

Die zuvor vorgestellte Methode wurde im Rahmen einer Testimplementierung validiert. Der Anwendungsfall ist die Entwicklung einer Benutzerschnittstelle bzw. einer Konfigurationslogik für die Webplattform ROBOTOP. Die Zielgruppe bzw. Proto-Persona ist ein Planer eines produzierenden mittelständischen Unternehmens. Dieser möchte eine RA für die Fertigung konzeptionieren und beschaffen. Ziel des Klickprototyps ist eine agile Aufbereitung des Konfigurationsworkflows und damit die Anforderungserhebung für die Softwarearchitektur von ROBOTOP. Hierbei wurden mehrere Konzeptideen getestet und die besten Varianten selektiert.

Zu Beginn wurde der Konzeptprototyp bzw. grafische Konfigurationsworkflow mittels der Software Microsoft PowerPoint erstellt. Dieser wurde anschließend auf Basis der Software Axure [174] in einen Klickprototyp überführt, siehe Bild 74. Die Feedbackgespräche erfolgten im Rahmen von Webkonferenzen und persönlichen Meetings mit Systemintegratoren und Nutzern. Durch den Konzept- und Klickprototyp waren diese in der Lage, strukturiertes und konkretes Feedback zu geben. Die BP wurden auf Basis von 2D-Bildern in die Prototypen integriert. Für die Datenaufbereitung und Darstellung der BP wurde das CAD-Werkzeug *Inventor* verwendet. Aus *Inventor* wurden dann die 2D-Bilder ausgeleitet. Die Dokumentation des Konfigurationsworkflows erfolgte mittels BPMN-Darstellung.



Bild 74: Verwendete Werkzeuge entlang der Prototypenentwicklung bzw. Wissensaufbereitung für die Benutzerschnittstellen von EK

Die abschließend vorgestellten Ergebnisse zeigen den finalen Stand des Klickprototyps. Dieser wurde in zahlreichen Iterationsschleifen erarbeitet. Im Rahmen der inhaltlichen Entwicklung wurde der Konfigurationsworkflow konkretisiert, optimiert und vereinfacht. Daneben wurden das Layout bzw. Design und die Nomenklatur optimiert. Hierdurch ist ein sechsphasiger Musterkonfigurationsablauf für EK entstanden. [P10, P14]

Die sechs Phasen der nutzerzentrierten EK sind:

1. Best-Practice-Filterung
2. Best-Practice-Auswahl
3. Anpassungskonfiguration
4. Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Rahmenbedingungen
5. Abschätzen der Ausbringungsmenge als Grundlage für eine weitere Wirtschaftlichkeitsrechnung
6. Zusammenfassung der Ergebnisse und Kontaktaufnahme

Phase 1 – Best-Practice-Filterung: Ziel der ersten Phase ist es, den Nutzungskontext anhand von Prozess- und Produkteigenschaften einzuschränken, um dem Nutzer in Phase zwei das bestmögliche BP vorschlagen zu können. Im Detail werden die BP und deren Aufbereitung in Kapitel 6.3 erläutert.

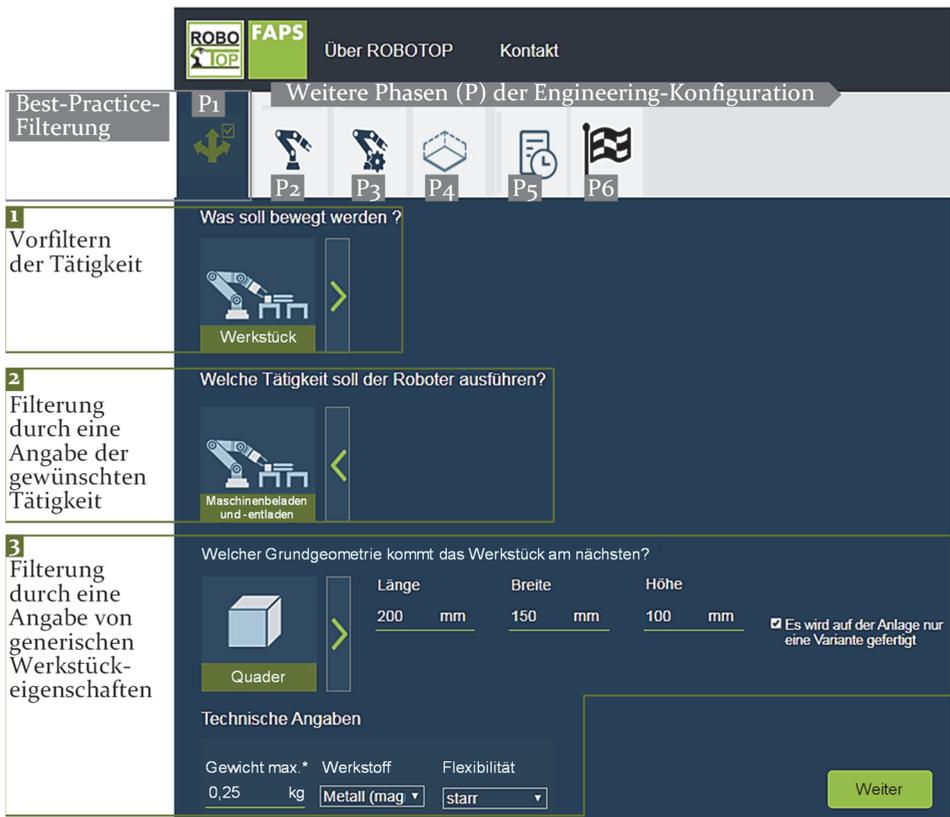


Bild 75: Phase 1 (P1) der EK - BP-Filterung über die Kenngrößen Prozess bzw. Tätigkeit und Produkt bzw. Werkstückangaben [P10, P14]

In den Schritten (1) und (2) werden die BP auf Basis des Produktionsprozesses gefiltert, siehe Bild 81. In Schritt (1) wird zuerst eine Vorfilterung der BP durchgeführt. Hierbei wird ausgewählt, ob ein Werkstück oder ein Werkzeug bewegt wird. Dies dient der Komplexitätsreduktion für den Nutzer, da die Tätigkeiten anhand der zwei Kategorien vorgefiltert werden. In Schritt (2) werden die vorgefilterten Tätigkeiten konkretisiert, wie z. B. Maschinenbeladen und -entladen, siehe Bild 75. Abschließend (3) werden die Werkstückeigenschaften eingegeben: die Grundgeometrie (Quader, Zylinder, Ellipsoid), die Abmaße zur Berechnung des Volumens der Grundgeometrie, das Gewicht in Kilogramm, der Werkstoff (Metall, Kunststoff, Glas, Keramik, Holz, Lebensmittel, weitere) und die Flexibilität (starr, flexibel). Hierdurch können die BP auf Basis der Tätigkeit sowie im Detail hinsichtlich der verwendeten Hardware, wie z. B. Traglast des Roboters und Typ des Endeffektors, gefiltert werden.

Phase 2 der EK – Best-Practice-Auswahl: Auf Basis der Filterkriterien (1) werden mehrere funktional geeignete Best Practices angezeigt (2). Anhand der Bewertungskriterien (3) wie z. B. Taktzeit, Preis, Kundenbewertung und Flexibilität wählt der Nutzer ein BP aus, siehe Bild 76.



Bild 76: Phase 2 der EK - BP-Auswahl, als initialer Parametersatz für die Anpassungskonfiguration [P10, P14]

Phase 3 der EK - Anpassungskonfiguration: Das ausgewählte BP dient als initialer Parametersatz für die weitere Konfiguration. In Phase drei können die Art der Materialbereitstellung, der Primärprozess mit dessen Taktzeit und Material- bzw. Produktabführung angegeben werden, wodurch die BP angepasst wird. Der Konfigurationsstand wird parallel als 3D-Modell angezeigt, siehe Bild 77. Die Entwicklung des logischen Konfigurationsmodells wird im Detail in Kapitel 6.4 behandelt.

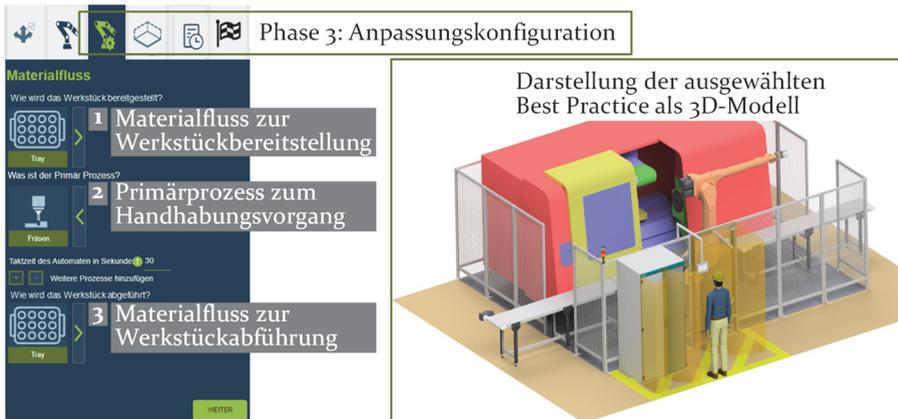


Bild 77: Phase 3 der EK - Anpassungskonfiguration [P10, P14]

Phase 4 der EK - Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Rahmenbedingungen: Zur Absicherung werden in dieser Phase schwer veränderliche Rahmenbedingungen angepasst, z. B. räumliche Gegebenheiten

oder wirtschaftliche Zielgrößen, wie die Autonomiezeit. Die Autonomiezeit ist der Zeitraum, in dem die RA ohne menschliches Eingreifen, z. B. für die Materialbereitstellung oder -abführung, autonom arbeitet. Dies ist besonders wichtig für viele Firmen, da durch eine hohe Autonomiezeit Personalkosten eingespart werden können. Die räumlichen Gegebenheiten bzw. Platzbeschränkungen werden in Form der maximal zur Verfügung stehenden Höhe, Breite und Länge in Metern abgefragt (1). Die benötigte Schutzart, wie Reinraumbedingungen oder eine direkte Interaktion mit einem Menschen, ist eine weitere wesentliche Prozessanforderung (2). Durch diese Faktoren werden die Auslegung des Layouts und der erforderliche Platzbedarf der Anlage beeinflusst. Ebenso wirkt sich eine notwendige Umorientierung des Werkstücks auf die Taktzeit der Anlage aus und wird daher abgefragt. Daneben werden weitere Anforderungen angegeben, wie eine gewünschte Werkstückbeschriftung, eine erforderliche Datenweitergabe bzw. -anbindung per CSV-Datei oder direkt an ein Manufacturing Execution System, siehe Bild 78.

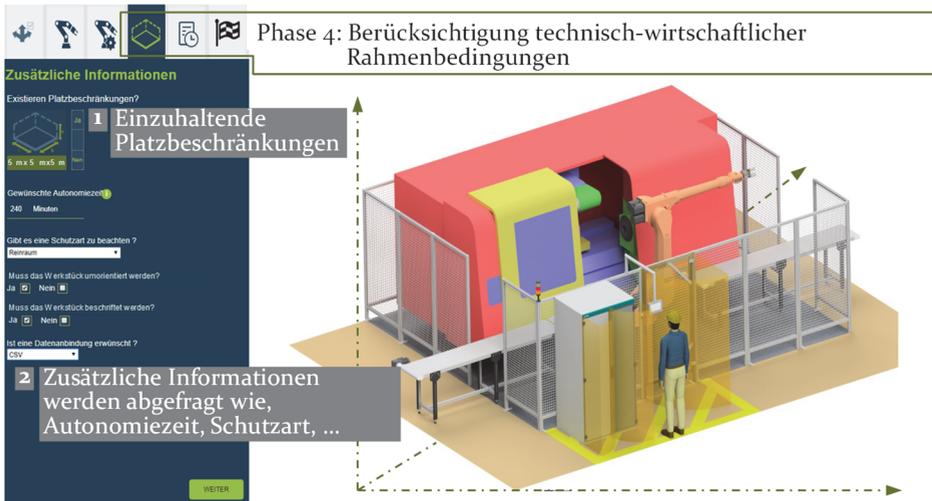


Bild 78: Phase 4 der EK - Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Rahmenbedingungen [P14]

Phase 5 der EK – Abschätzen der Ausbringungsmenge als Grundlage für eine weitere Wirtschaftlichkeitsrechnung: Um für das Management das grobe Kosteneinsparungspotential berechnen zu können, wird die Ausbringungsmenge abgeschätzt. Hierzu ist die Taktzeit die wesentliche Planungskenngröße, siehe Bild 79. Auf Basis der Anzahl der Arbeitsschichten pro Woche und deren Dauer kann die Taktzeit in die Ausbringungsmenge umgerechnet werden. Der Ausbringungsmenge der RA kann das produzierende Unternehmen dann intern die Mitarbeiterkosten für

eine manuelle Produktion gegenüberstellen. Hieraus kann die Amortisationsdauer der RA berechnet werden. Diese sollte im Idealfall bei maximal zwei bis drei Jahren liegen. [P14]



Bild 79: Phase 5 der EK - Abschätzen der Ausbringungsmenge als Grundlage für eine weitere Wirtschaftlichkeitsrechnung [P14]

Phase 6 der EK - Zusammenfassung der Ergebnisse und Kontaktaufnahme: Abschließend wird das Konfigurationsergebnis komprimiert dargestellt. Bei Bedarf kann auf Basis des Grobkonzepts eine Anfrage bei einem Systemintegrator gestellt werden, siehe Bild 80. Hierzu werden zusätzliche Rahmenbedingungen für eine Angebotserstellung ergänzt: die primäre Motivation für RA (1: Kostenoptimierung, Qualitätssteigerung, Komplexität der Aufgabe, ergonomische Verbesserung, Erprobung neuer Technologien), das Planungsstadium (2: zeitnahe Bestellung, Konzeptanfrage, Bewertung technischer Machbarkeit), ob ein Lastenheft erstellt wurde (3: Ja, Nein), die Meilensteine (bzw. Termine für 4: Angebotserstellung, Bestellung, Start der Produktion) und das verfügbare Budget (5). [P14]

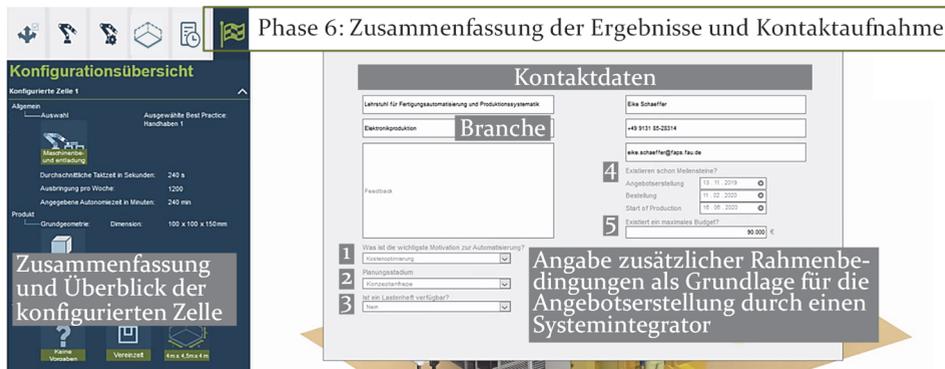


Bild 80: Phase 6 der EK - Zusammenfassung der Ergebnisse und Kontaktaufnahme [P14]

Dokumentation mittels BPMN: Die Klickstrecke des Prototyps des EK als wesentliches Ergebnis der Nutzertests wird für die weitere Entwicklung, Dokumentation und Wiederverwendung kondensiert aufbereitet. Hierzu

bietet sich die Aufbereitung des Ablaufs in Form eines BPMN-Modells an, siehe Bild 81. Hierdurch wird eine vereinfachte Implementierung des Konfigurationsworkflows in dem Produkivsystem ermöglicht, wie z. B. bei der Webplattform ROBOTOP.

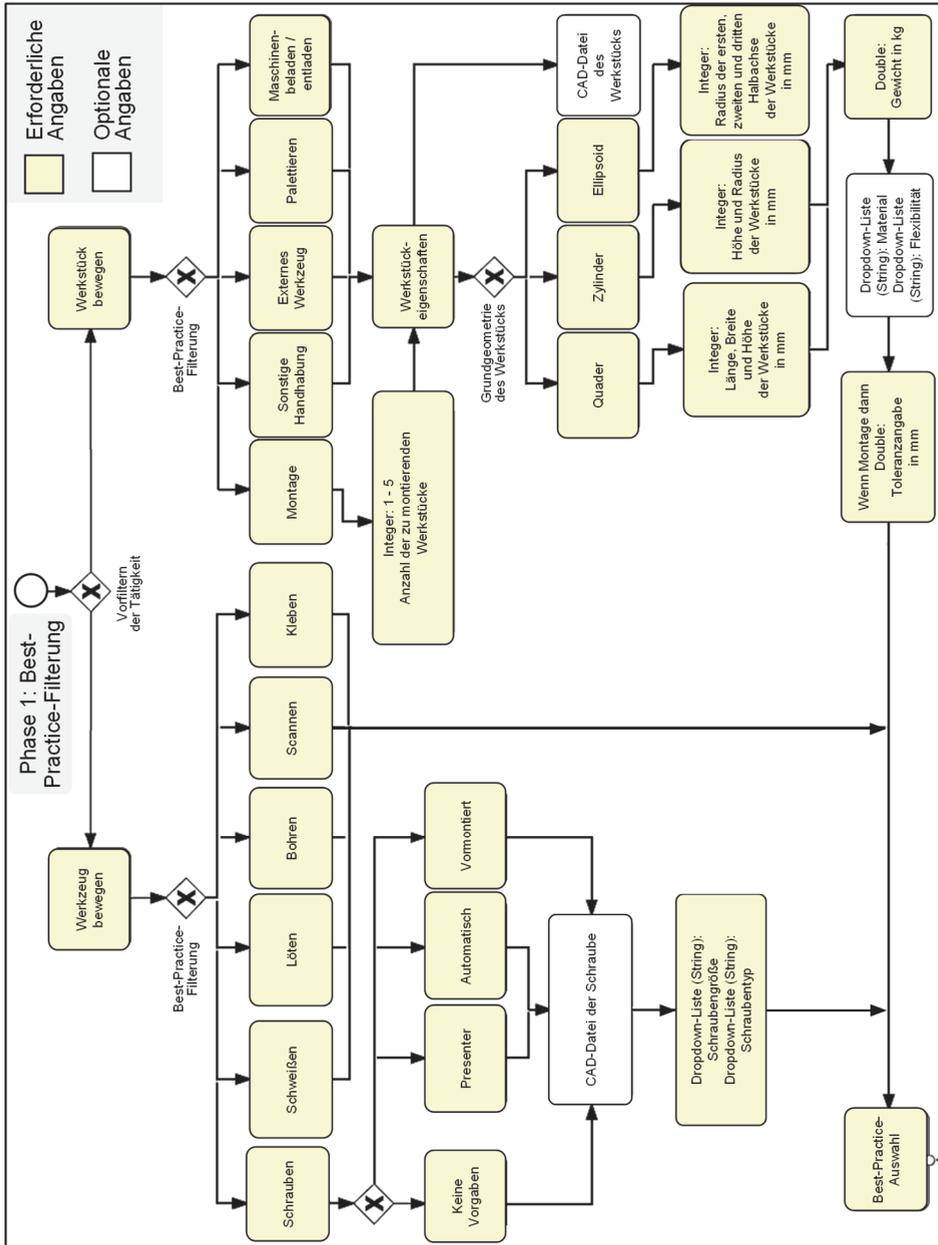


Bild 81: Beispiel BPMN-Dokumentation der Klickstrecken von der BP-Filterung des Klickprototypen zum Abschluss der Entwicklung

6.2.4 Weitere Anwendungsfälle und Benutzerschnittstellen für Engineering-Konfiguratoren

Im Rahmen der nutzerzentrierten Entwicklung werden weitere Anwendungsfälle und Benutzerschnittstellen für EK identifiziert und implementiert. Der zweite Anwendungsfall adressiert den VR-unterstützten Vertrieb von RA. Dieser wird auf Basis der Kernkonzepte der EK und einem Mehrbenutzersystem umgesetzt, siehe Bild 82. Hierdurch ist es möglich, dass sich mehrere Personen gleichzeitig in derselben Szene aufhalten und diese konfigurieren können. Das Nutzerverhalten und die jeweiligen Rollen werden mithilfe verschiedener Avatare auf Basis von 3D-Scans oder 3D-Modellen dargestellt. [P15]



Bild 82: Anwendungsfall (2), VR-Vertrieb von RA unterstützt durch den EK als Mehrbenutzersystem

Hierdurch kann der Vertrieb eines Systemintegrators mit den Managern und Technikern eines produzierenden Unternehmens verschiedene BP inspizieren und diskutieren. Die Umsetzung des EK erfolgt analog zu den zuvor vorgestellten Konzepten. Über eine BP-Auswahl werden zunächst die verfügbaren bzw. geeigneten BP angezeigt. Anschließend erfolgt die Anpassungskonfiguration. Zusätzlich ist eine manuelle VR-Erweiterung und Optimierung der Szene möglich. Hierbei wird auf die Prozessmodul- und Komponenten-Bibliothek zurückgegriffen. Durch die Integration eines 3D-Scans der Realumgebung als Hintergrundkulisse kann ein intuitives Verständnis für den Kontext geschaffen werden, siehe Bild 82 (unten). Die Aufnahme der 3D-Scans in Form einer Punktwolke kann direkt durch das produzierende Unternehmen, z. B. mit einem Smartphone mit Tiefenkamera, wie z. B. dem *ASUS ZenFone AR* oder dem *Huawei P40 Pro* als kostengünstige Hardware, erfolgen [P15]. Der freigestellte Hallenscan kann anschließend als Rahmen für eine Grobplanung zur Berücksichtigung des Layouts und bestehender Anlagen bei der BP-Integration verwendet werden, siehe Bild 83. [P15]

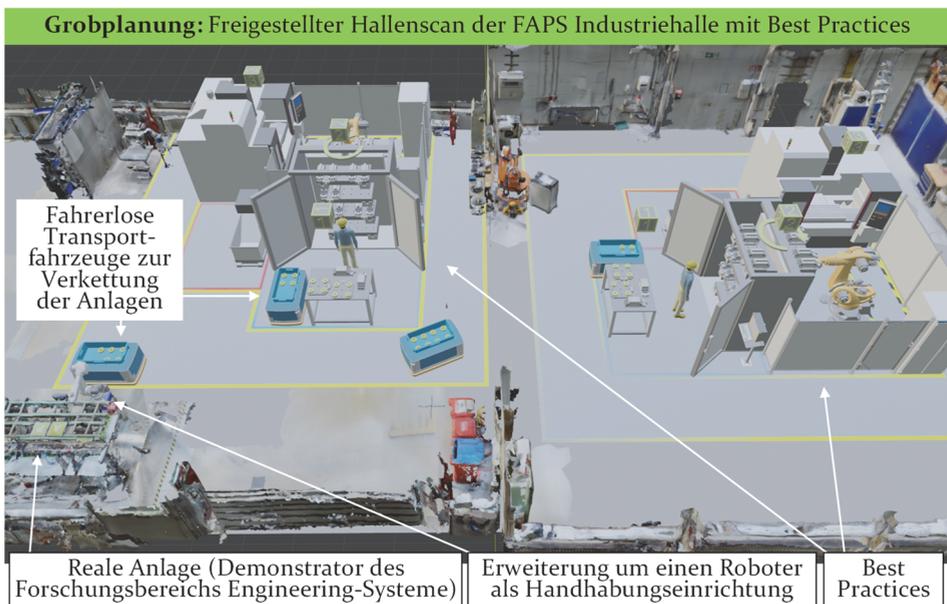


Bild 83: Grobplanung auf Basis des freigestellten Hallenscan der FAPS Industriehalle zur Berücksichtigung des Layouts und bestehender Anlagen bei der BP-Integration

Generell ist bei weiteren Anwendungsfällen des EK für die Nutzerinteraktion ein geeignetes Hardwaresystem für die Benutzerschnittstelle zu wählen, wie z. B. Computer, Laptop, Tablet, VR/AR-Brille, Handy oder Sprachsteuerung. Der Funktionsprototyp von Anwendungsfall zwei wurde

basierend auf dem VR-Hardwaresystem *HTC VIVE Pro* erstellt [P15]. Für den Anwendungsfall drei wurde die AR-Brille *Hololens 2* verwendet, um die Engineering-Konfiguration im realen Industrieumfeld durchzuführen, siehe Bild 84. Durch die Platzierung der BP in einer realen Umgebung, können die Realbedingungen besser berücksichtigt und per Foto oder Videofunktion der *Hololens 2* für die weitere Systemintegration dokumentiert werden. [P15]

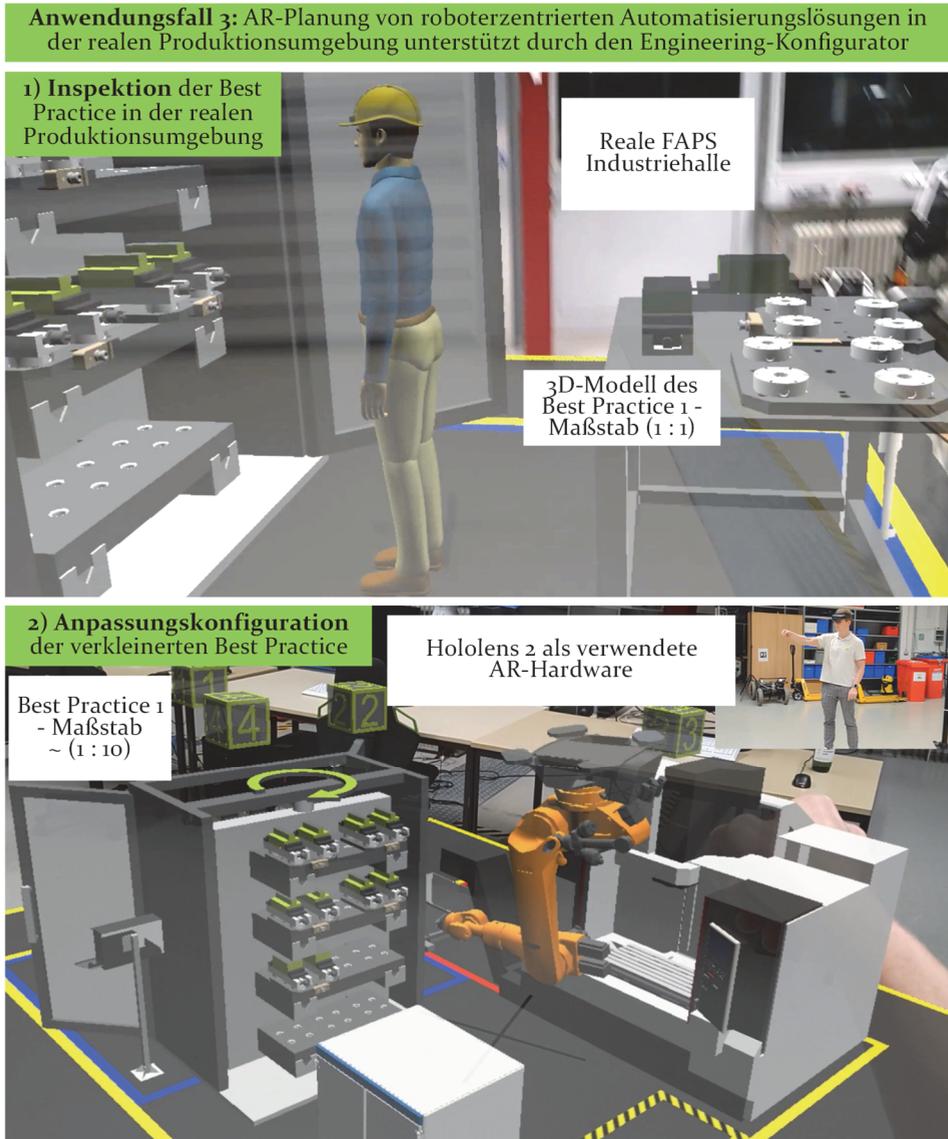


Bild 84: Anwendungsfall (3), AR-Planung von RA in der realen Produktionsumgebung, unterstützt durch den EK

6.3 Methode zur Aufbereitung von Best Practices als modulare Datenbasis für 3D-EK (W_2)

Um die Komplexität zu reduzieren und auf etablierte Engineeringerfahrungen aufzubauen, werden BP als zweiter Wissensbereich (W_2) eingeführt. Der Vorteil von BP liegt darin begründet, dass diese losgelöst von anderen Wissensbereichen akquiriert und aufbereitet werden können. Ferner lassen sich BP unabhängig von EK bzw. MS nutzenbringend einsetzen. So können diese als Lösung bzw. Beispiel innerhalb verschiedener Softwarewerkzeuge eingebunden werden.

6.3.1 Grundarchitektur und Bestandteile von Best Practices

Best Practices als modulare Datenbasis für 3D-EK (W_2) beinhalten die Konzeptidee der RA: den Tätigkeitsbereich, das Anwendungsszenario, das Layout, sowie die verwendeten Komponenten. Daneben werden die Daten der verwendeten Komponenten, also deren Eigenschaften bzw. Leistungsparameter, benötigt. Die visuelle Aufbereitung von BP spielt für eine verständliche Anzeige in der Benutzerschnittstelle eine wichtige Rolle, siehe Kapitel 6.2. Für eine 2D-Visualisierung sind 2D-Skizzen und 2D-Bilder ausreichend. Für eine interaktive 3D-Visualisierung bzw. einen 3D-EK sind modulare 3D-Szenen inklusive der CAD-Daten der Prozessmodule und Komponenten notwendig. Diese müssen durch integrierte 3D-Schnittstellen erweitert werden, damit diese durch eine EK automatisch konfiguriert bzw. getauscht werden können, siehe Bild 85.

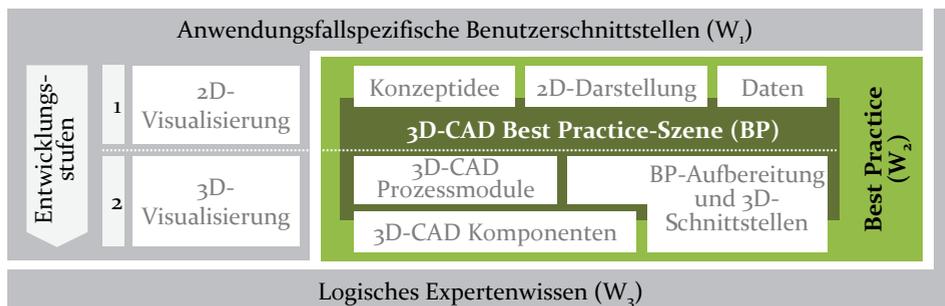


Bild 85: BP-Bestandteile und deren Relevanz für die Konfiguratorvisualisierung

Um die intuitive Verständlichkeit zu steigern, kann die 3D-Szene mit Konzeptideen, wie Prozessfluss, Reichweiten von Robotern oder weiteren, in der realen Umgebung nicht direkt ersichtlichen Informationen angereichert werden. Die Einordnung von BP wird in Bild 85 veranschaulicht. Aufgrund des Ansatzes einer modularen Struktur im Sinne der EK wurde eine generische Architektur zur Einbindung von BP geschaffen, siehe Bild 86.

2D- bzw. 3D-BP sowie deren Einzelmodelle werden dabei über einen Visualisierungsservice, z. B. von einem CAD-System, dargestellt. Die Parameter- und Logiksteuerung erfolgen über ein Konfigurationsframework. Für eine bessere Nutzbarkeit können zielgruppenspezifische Nutzeroberflächen (W_1) verwendet werden. Die Entwicklung des logischen Konfigurationsmodells wird im Detail in Kapitel 6.4 vorgestellt. Die Integration der BP und des logischen Konfigurationsmodells in den EK erfolgt in Kapitel 6.5.

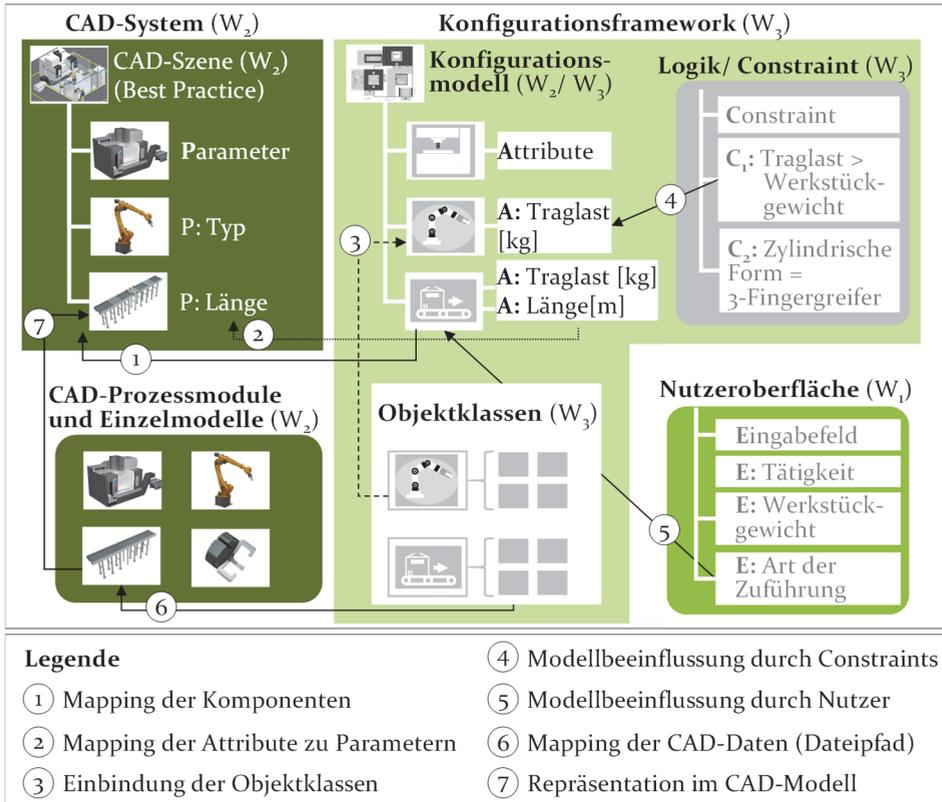


Bild 86: Wechselwirkung der Wissensbereiche (W) und Einbindung der BP (W_2) entlang der Architektur des EK

Auf Basis der BP-Beschaffung in Kapitel 6.3.2 werden die BP im Rahmen von zwei Entwicklungsstufen aufbereitet: für die 2D-Visualisierung in Kapitel 6.3.3, sowie als modulare 3D-BP für die EK in Kapitel 6.3.4.

6.3.2 Beschaffung und Bewertung von Best Practices

Die Beschaffung von BP-Lösungen erfolgt im Idealfall durch die Digitalisierung der in der realen Produktion erfolgreich umgesetzten RA. Da diese

Informationen nur bedingt vorhanden sind oder aus wettbewerbstechnischen Gründen nicht zur Verfügung stehen, kann es erforderlich sein, auf alternative Wissensquellen auszuweichen. Mögliche Quellen sind im Internet verfügbare Bilder, CAD-Szenen oder auf Messen ausgestellte Demonstratoren. Die Qualität, der Reifegrad und die Vollständigkeit von BP können sich in verschiedenen Stadien befinden, siehe Kapitel 2.1.2. Daher ist es notwendig, BP vor der Aufbereitung zu bewerten und zu selektieren. Sollten überhaupt keine BP zur Verfügung stehen, müssen diese selbst entwickelt und simulativ abgesichert werden. Um sowohl vorhandene als auch neuentwickelte BP grob zu bewerten, kann die Checkliste aus Tabelle 13 verwendet werden. Die manuelle Aufbereitung der BP wird durch das Entwicklungsteam des EK umgesetzt.

Tabelle 13: Checkliste zur ersten Konsistenzprüfung von BP als initiale Qualitätskontrolle vor der weiteren digitalen Aufbereitung

Checkliste zur ersten Konsistenzprüfung von Best Practices	
Reifegrad der realen Umsetzung	(1) Implementierung der Best Practice in industrieller Umgebung zwischen TRL 7-9 (siehe Kapitel 2.1.2) oder adäquate, simulative Absicherung vorhanden?
Primärfunktionen/-prozesse gewährleistet	(2) Prozessschritte sequenziell durchführbar und alle dafür notwendigen Komponenten bzw. Funktionen vollständig? (3) Werkstückzuführung und -abführung vorhanden? (4) Reichweiten und Traglasten von Robotern ausreichend?
Wirtschaftlich wertstiftend	(5) Ausreichende Autonomiezeit gewährleistet? (6) Kostenersparnis mit Lösung möglich? (z. B. Return on Investment der Anlage kleiner drei Jahre) (7) Sind bessere Alternativen verfügbar? (8) Höhere Auslastung bestehender Investitionsgüter möglich?
Layout vollständig (Platzbedarf)	(9) Alle weiteren notwendigen Prozessmodule und Komponenten vorhanden? (siehe Kapitel 2.2.3) (10) Erforderliche Sperrflächen vorhanden? (11) Falls notwendig, Zugänglichkeit zur Werkstückzuführung und -abführung für Logistik vorhanden?
Sekundärprozess durchführbar	(12) Zugänglichkeit für Wartung und Entstörung möglich? (13) Sicherheitskonzept erkennbar bzw. vorhanden?
Weitere	(14) Weitere...

Die Methode zur manuellen Aufbereitung der BP-Szenarien in konkrete 3D-BP-Szenen wird in den nachfolgenden Kapiteln zur 2D- und 3D- Aufbereitung eingeführt und detaillierter erläutert.

6.3.3 2D-Konzeptdarstellungsmuster

Die 2D-Aufbereitung von BP dient dazu, die wesentlichen Grobplanungskenngrößen zu extrahieren und reduziert grafisch darzustellen. Wesentliche Kernparameter sind Art der verwendeten Komponenten, Prozessfluss und grobe Abmessungen der platzkritischen Bestandteile. Ein Muster-templete zur Konzeptdarstellung einer 2D-BP ist für das BP 1, Bearbeitungsmaschine beladen und entladen, beispielhaft in Bild 87 dargestellt.

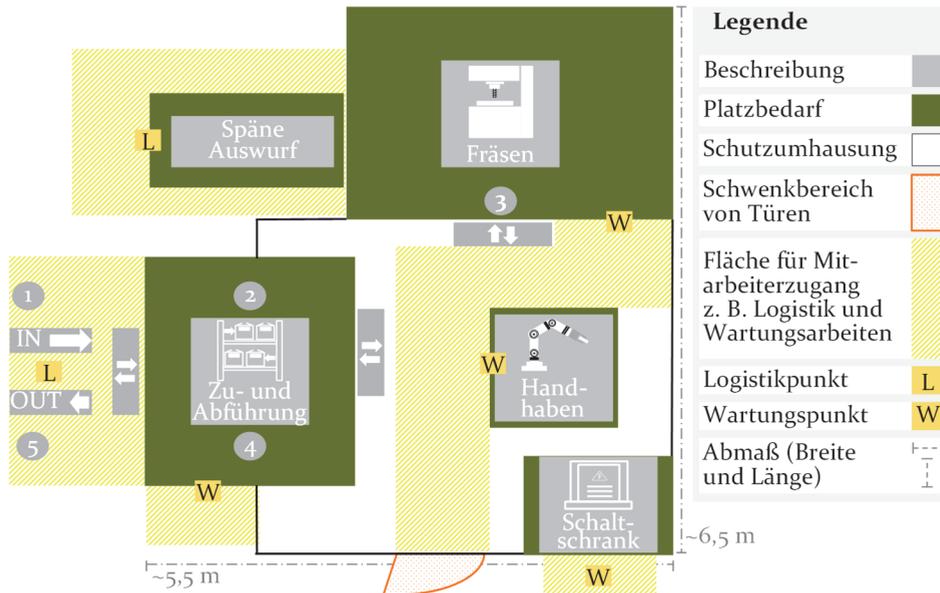


Bild 87: 2D-Best-Practice-Muster für die Grobplanung: Beispielhafte 2D-Aufbereitung des BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen (Werkstück handhaben)

6.3.4 Modulare Best-Practice-Architektur von RA für 3D-EK

Die Entwicklung des Top-down EK erfordert eine modulare generische Architektur von 3D-BP von RA als wesentliche Datengrundlage, siehe Kapitel 5.2.2 bzw. Bild 53. „Der Begriff ‚Best Practice‘ basiert auf der Idee, dass es für eine bestimmte Aufgabe ein Bündel von Techniken, Methoden, Prozessen, Aktivitäten und Anreizen gibt, das effektiver oder effizienter ist als andere gebräuchliche Vorgehensweisen. Effektiv bedeutet, dass das angestrebte Ergebnis mit höherer Wahrscheinlichkeit bzw. geringeren Risiken erreicht wird. Effizient heißt, dass für ein bestimmtes Ergebnis weniger Ressourcen gebraucht werden oder mit gleichen Ressourcen ein besseres Ergebnis erreicht wird als mit einer alternativen Vorgehensweise.“

[175, S. 1] Eine Modularisierung von 3D-BP kann auf Basis von Prozessmodulen, Komponenten, Informations- sowie Layout- und visuellen Gestaltungsobjekten erfolgen, siehe Bild 53. Die 3D-BP kann in Kombination mit generischem Engineering-Wissen, z. B. in Form von Constraints, anschließend für die jeweilige Situation im Rahmen einer Anpassungskonfiguration individualisiert und optimiert werden. Im Folgenden werden Prozessmodule und Komponenten im Kontext von EK definiert und erläutert.

Ein Prozessmodul führt Teilprozesse innerhalb des Produktionsprozesses einer BP aus. Die BP wird durch die Prozessmodule in ihre wiederverwendbaren Teilfunktionen modularisiert. Hierzu werden Prozessmodulkategorien angelegt, welche Funktionskategorien zu Erfüllung gleichartiger Prozesse beschreiben. Diese ermöglichen den Austausch alternativer Prozessmodule während der EK, wie z. B. die Kategorie geordnete Materialbereitstellung. Diese kann über die konkreten Prozessmodule Regalsystem oder Fahrerloses Transportsystem (FTS) realisiert werden, siehe Tabelle 14. Die funktionellen Aufgaben der Prozessmodule können anhand der Begriffe aus der VDI 2860 (Montage- und Handhabungstechnik) [35], der DIN 8580 (Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung) [176] sowie der DIN 1319-1 (Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe) [177] kategorisiert werden. Die im Rahmen der sechs Anwendungsbeispiele relevanten und erstellten Prozessmodule sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Definition Prozessmodul (PM)

Ein Prozessmodul ist ein funktionales, wiederverwendbares Modul einer fallspezifischen Automatisierungslösung bzw. einer Best Practice, welches durch zusammenhängende, oder sich gegenseitig beeinflussende Tätigkeiten einen Teilprozess durchführen kann und somit direkt oder indirekt zum Produktionsprozess beiträgt.

Das Prozessmodul unterstützt die Wiederverwendung von Engineeringwissen in Form von funktionalen Modulen bzw. Teillösungen. Hierdurch wird die Anpassungskonfiguration innerhalb von Engineering-Konfiguratoren optimiert. Dies ist möglich, da auf der obersten Konfigurationsebene funktionell ähnliche Prozessmodule ausgetauscht werden können, z. B. Materialbereitstellung. Auch eignen sich Prozessmodule als generelles Planungselement im Kontext des Engineerings von Automatisierungslösungen.

Der Begriff „Komponente“ leitet sich von dem lateinischen Wort „compone-re“ (zusammenstellen, -setzen) ab. In der Fachliteratur der Automatisierungstechnik bzw. Industrierobotik wird der Begriff Komponente generisch für einzelne Bestandteile einer Roboterzelle verwendet [33, 178]. Im Kontext von EK ist eine Komponente der kleinste konfigurierbare Baustein:

Definition Komponente (K)
<p>Eine Komponente ist ein Bauteil oder eine Baugruppe, welche innerhalb eines fallspezifischen Prozessmoduls verbaut wird und eine oder mehrere spezifische Teilfunktion(en) erfüllt. Ein Prozessmodul besteht dabei aus einer oder mehreren Komponente(n). Innerhalb des Engineering-Konfigurators sind die Komponenten die kleinsten Einheiten, die zur Konfiguration von Best Practices und Prozessmodulen verwendet werden.</p> <p>Komponenten werden meist von verschiedenen, spezialisierten Herstellern zugekauft, wie z. B. für Roboter oder Greifer. Diese werden durch einen Systemintegrator zu einer schlüsselfertigen Automatisierungslösung zusammengestellt. Die jeweiligen Komponenten können durch Produktkonfiguratoren der Hersteller vorkonfiguriert werden.</p>

Layoutobjekte sind organisatorisch und strukturell notwendige Objekte, siehe Bild 88. Diese definieren Interaktionspunkte für den Menschen, schaffen Struktur und verbessern die Sicherheit für den Menschen.

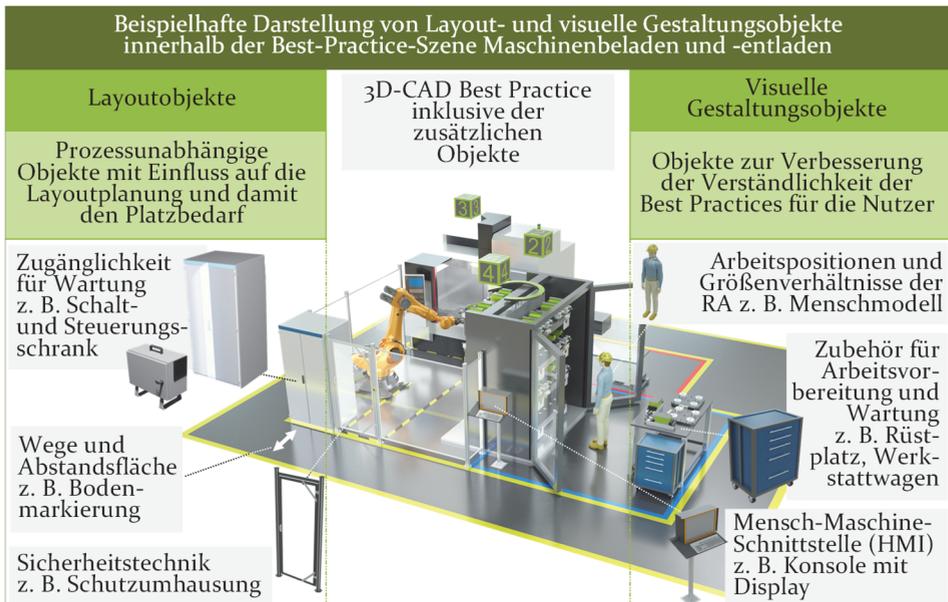


Bild 88: 3D-Darstellung der Layout- und visuellen Gestaltungsobjekte am Beispiel der BP 1 - Maschinenbeladen und -entladen

Für die grobe Ermittlung des Platzbedarfs von RA bei der Grobplanung sind die folgenden Layoutobjekte zu berücksichtigen: Schutzeinrichtungen, die Position von Schaltschränken (ohne Innenleben), Abstandsflächen, sowie Wege für die Instandhaltung und Logistik in Form von Bodenmarkierungen. Daher werden diese als zusätzliche, nicht primär prozessrelevante Kategorien innerhalb der BP-Architektur aufgenommen.

Die visuellen Gestaltungsobjekte dienen zum verbesserten Kontextverständnis von BP-Szenen. Durch eine Anreicherung mit zusätzlichen Informationen wird ein intuitives Verständnis der RA geschaffen. Menschmodelle, Eingabegeräte sowie Wartungs- und Rüstwägen vermitteln hierbei die Skalierung sowie die Arbeitspositionen innerhalb der RA. Die Layout- und visuellen Gestaltungsobjekte steigern die Akzeptanz bei dem Betrachter, da diese zu einem vollständigen und professionellen Eindruck von BP-Szenen bzw. von RA beitragen.

Bei der Modellierung von BP als 3D-CAD-Szenen gehen dynamische Informationen, wie der Materialfluss oder die Bewegung von Prozessmodulen und Komponenten verloren. Ebenso sind weniger offensichtliche Details, wie z. B. der Erfassungsbereich der Sensorik und der Kameratechnik, sowie der Bewegungsraum der Kinematik, wie z. B. von Industrierobotern, für ein Prozessverständnis vorteilhaft. Daher werden die Informationsobjekte innerhalb der BP-Architektur eingeführt. Die Ergänzung von CAD-Modellen durch die Informationsobjekte erfolgt auf der Best-Practice- und Komponentenebene, siehe Bild 89.

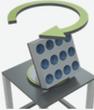
	Architektur- ebene	Funktionalität bzw. Abbildung von	Beispielhafte Implementierung der IFO innerhalb der 3D-CAD Umgebung						
Informationsobjekte (IFO)	1 Best Practice	Prozess- reihenfolge und Materialfluss		Zahlenwürfel zur Darstellung der Prozessreihenfolge		Richtungspfeil zur Darstellung des Materialflusses			
	2 Prozess- module	Keine zusätzlichen prozessmodulspezifischen Informationsobjekte							
	3 Kompo- nenten	nicht sichtbare, prozess- relevante Funktionen und Bewegungs- abläufe		Bildbereich z. B. von Kameras		Licht- und Laserstrahl z. B. von Sensoren		Bewegungs- und Rotations- möglichkeit und richtung		Arbeitsraum z. B. von Roboter

Bild 89: Exemplarische Darstellung und Zuordnung der Informationsobjekte (IFO) zu den BP-Architekturebenen, wobei die Übernahme von IFO in höhere Ebenen erfolgt

6.3.5 Anwendungsbeispiele der Best-Practice-Aufbereitung

Zur Validierung der BP-Entwicklungsmethode wurden insgesamt sechs BP-Szenen exemplarisch aufbereitet, siehe Bild 90. Die Auswahl der BP-Szenarien ist dabei nach der wirtschaftlichen Relevanz bzw. Häufigkeit der Anwendungsfelder erfolgt. Diese wurden aus der Statistik der International

Federation of Robotics (IFR) abgeleitet [179]. Daher wurde für die BP-Aufbereitung folgende Verteilung gewählt: Drei BP für Handhabung ohne Montageprozesse (45 Prozent), zwei BP für die Montage (11 Prozent) sowie ein BP als flexibles hybrides Konzept. Das Anwendungsfeld des Schweißens (24 Prozent) wurde aufgrund der Komplexität bei der Schweißwerkzeugauslegung sowie der Simulation in der Webplattform ROBOTOP vorerst ausgeschlossen und wird nicht berücksichtigt.

BP 1 Bearbeitungsmaschine sowie BP 2 Prüfautomaten beladen und entladen (handhaben): BP 1 und BP 2 adressieren das Beladen und Entladen von Automaten mit Werkstücken: eine große Bearbeitungsmaschine (BP 1) und mehrere Prüfautomaten (BP 2). Der Industrieroboter hat innerhalb der BP eine handhabende Aufgabe. Ziel ist es, die Automaten für eine gewisse Zeit autonom, d. h. ohne den notwendigen Eingriff durch einen Menschen, betreiben zu können. Die Werkstückzufuhr und -abfuhr wird hierbei über stationäre Systeme oder kontinuierliche Materialflusssysteme realisiert.

BP 3 Werkstücke verpacken (handhaben): In diesem BP-Szenario werden mehrere einzelne Werkstücke durch die RA in bereitgestellte Verpackungsträger, z. B. Kartonagen, geladen. Die Position der Werkstücke wird per Kamera erkannt. Der Verpackungsträger befindet sich an einer vordefinierten Position.

BP 4 Werkstücke montieren (handhaben, fügen): Innerhalb dieses BP-Szenarios wird ein Montageprozess abgebildet. Hierbei führt der Roboter einzelne Werkstücke in eine Baugruppe zusammen. Über einen einfachen oder mehrfachen Greifer nimmt der Roboter die Werkstücke an den Zuführsystemen auf. Diese werden anschließend zu den Montagepositionen bewegt bzw. in der Baugruppe eingefügt. Eine Fixierung der Werkstücke kann z. B. per Einrasten über eine Steckverbindung bzw. per Form oder Kraftschluss erfolgen. Eine Verbindung durch Schrauben, Kleben oder Ähnliches ist in diesem BP nicht vorgesehen.

BP 5 Werkstücke mit Schraubspindel verschrauben (schrauben): Dieses BP-Szenario bildet einen Montageprozess ab, bei welchem vorpositionierte Werkstücke miteinander verschraubt werden. Der Roboter hat in diesem BP die Funktion der Werkzeugführung einer Schraubspindel. Diese wird mit einer automatischen Schraubenzuführung über einen Schlauch versorgt. Die Schrauben werden über einen Vibrationswendelförderer für die Zuführung vereinzelt.

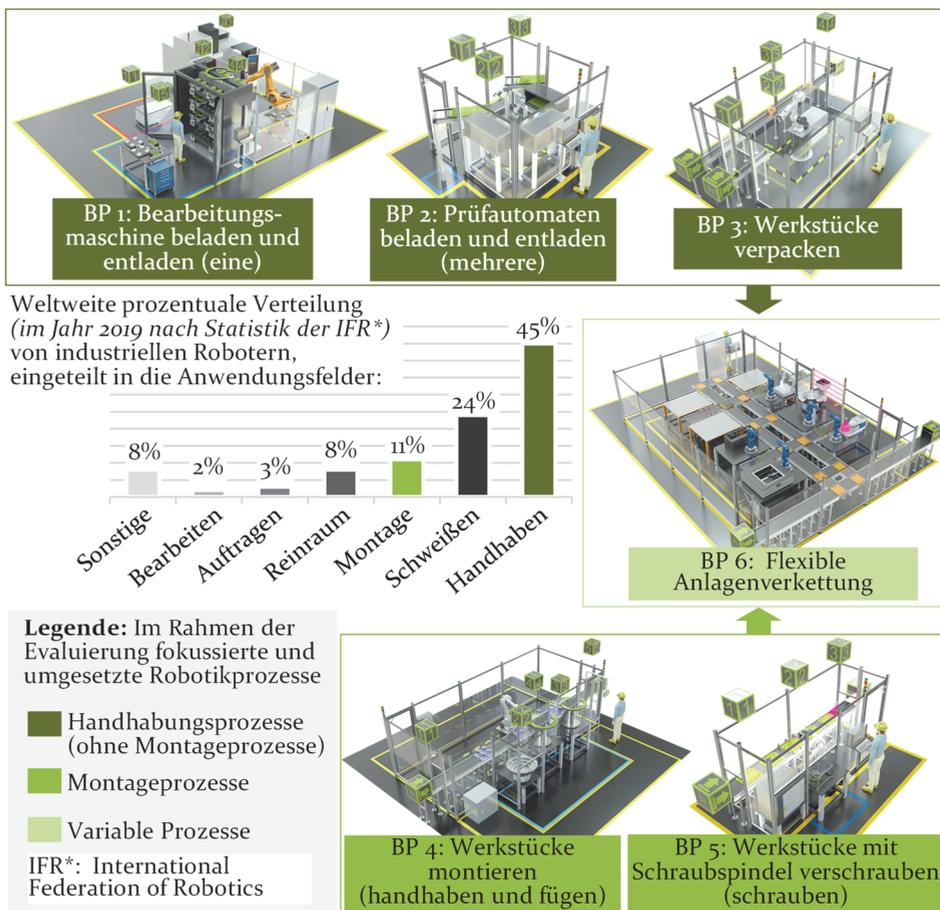


Bild 90: Umgesetzte Validierungs-BP von RA nach Zahlen der IFR aus dem Jahr 2019, zur Ableitung möglicher BP, prozentuale Verteilung der Anwendungsfelder nach [179]

BP 6 Flexible Anlagenverkettung (handhaben, weitere): Dieses BP-Szenario dient der Darstellung einer flexiblen Produktionsanlage. Eine Zuordnung zu einem spezifischen Anwendungsfeld ist deshalb nicht möglich. Vielmehr soll demonstriert werden, wie unterschiedliche Prozesse durch eine flexible Verkettung einzelner Prozessstationen parallel ablaufen können. Programmierbare Werkstückträger transportieren dabei die Werkstücke über Schienen zu den gewünschten Stationen bzw. Automaten. Die Auslagerung der Stationen auf separate Ausleger ermöglicht es, das Gesamtsystem unabhängig von den Einzelstationen zu betreiben.

Tabelle 14: Klassifizierung relevanter Prozessmodule, welche im Rahmen der Validierung erstellt wurden, geordnet nach der VDI 2860 [35], der DIN 8580 [176] sowie der DIN1319-1 [177]

Klassifizierung von Prozessmodulen		Nach Norm	Handhabungs-funktionen nach VDI 2860 (Werkstück)													Fertigungs-funktionen nach DIN 8580	Prüfen nach DIN 1319-1
			Relevante Funktionen			Speichern			Bewegen			Sichern			Menge verändern			Kontrollieren (Prozesssteuerung)
Kategorien der Prozessmodule		Prozessmodule* *Im Rahmen der Validierung relevante und exemplarisch erstellte Prozessmodule, beschrieben durch die darin enthaltenen Komponenten	Ungeordnet	Geordnet	Schwenken	Ordnen	Führen	Weitergeben	Fördern	Spannen	Entspannen	Zuteilen	Erfassen	Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten, Stoffeigenschaften ändern	(Qualität)-Prüfen außerhalb des Handhabens nach DIN 1319-1		
Geordnete Werkstückbereitstellung + Werkstückabfuhr	Kiste mit Kamera (Griff in die Kiste)		X											X			
		Bunker, Linearvibrationsförderer und Kamera	X						X				X	X			
		Bunker, Vibrationswendelförderer und Schikane	X			X	X										
	Förderband, Werkstückträger, Sensor, Kamera und Spannmittel	Drehaufsteller mit Tray		X			X				X			X		X	
		Drehregal mit Spannmittel		X	X						X						
		Schräggrollenrutsche und Schikane		X			X										
		Werkstückrutsche		X													
		Durchlaufregal und Schikane		X			X										
		FTS, Werkstückträger, Sensor		X				X	X					X			
		Werkstück Umgreifeinrichtung		X													
Support	Werkstück Wendestation		X	X						X	X						
	Spann- und Positioniertisch		X							X	X						
	Roboter, Adapter und 1-n Greifer			X	X	X	X	X	X	X	X			X			
Prozessdurchführung	Flexibel	Roboter, Adapter und 1-n Werkzeug												X	X		
		Roboter, Adapter und Mess- und Prüfmittel												X		X	
		Qualitätsprüfkasten mit Kamera														X	
	Automat	Montageautomat														X	
		CNC-Bearbeitungsmaschine														X	
		Drehmaschine														X	
		Graviermaschine														X	
		3D-Drucker														X	
		Weitere	...														

Diese sechs BP wurden auf Basis der BP-Architektur aufbereitet und in die funktionellen Prozessmodule strukturiert, siehe Tabelle 14. Als Grundlage für die generische Klassifizierung der Prozessmodule wurde die VDI 2860 (Montage- und Handhabungstechnik) [35], die DIN 8580 (Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung) [176] sowie die DIN1319-1 (Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe) [177] verwendet. Hervorzuheben ist, dass die VDI 2860 sich lediglich auf die Handhabung von Werkstücken und nicht auf die Handhabung von Werkzeugen bezieht. Die nachfolgende Tabelle 14 kann als Grundlage für die strukturierte Aufbereitung weiterer BP bzw. Prozessmodule verwendet werden. Die Prozessmodule werden durch die darin enthaltenen Komponenten beschrieben. Die Prozessmodule für die Werkstückabfuhr können auch für die Werkstückzufuhr verwendet werden, aber nicht auch zwangsläufig umgekehrt. Generell kann Tabelle 14 sukzessiv um weitere Prozessmodule im Rahmen zusätzlicher BP erweitert werden. Um die BP sowie die Prozessmodule vollautomatisch innerhalb von EK zu konfigurieren, wird das logische Expertenwissen aus dem nächsten Kapitel 6.4 benötigt.

6.4 Methode zur arbeitsteiligen Aufbereitung von logischem Expertenwissen (W_3)

Durch die Aufbereitung von implizitem Fachwissen über die Auslegung von RA in explizite Konfigurationsmodelle können die Vorteile von EK vollumfänglich erschlossen werden. Im Gegensatz zu menschlichen Experten stehen wissensbasierte Systeme bzw. EK mit gleichbleibender Qualität, kondensiert, permanent, örtlich ungebunden, durchgängig und unmittelbar zur Verfügung [1, 180]. Dies spart Zeit und Geld und verbessert die Qualität und Skalierbarkeit bei der Auslegung von Automatisierungslösungen. Um die dafür notwendigen Konfigurationsmodelle zu erstellen, muss das Expertenwissen gefunden, extrahiert, vorverarbeitet, standardisiert und verdichtet werden. Dies ist eine der schwierigsten Aufgaben bei der Erstellung von wissensbasierten Systemen, wie z. B. EK [181]. Daher wird im Folgenden eine Methode zum Wissenserwerb und zur Modellierung von generischem logischem Expertenwissen für EK eingeführt. [P13]

6.4.1 Constraintbasierte Konfiguration: eine Voraussetzung für die arbeitsteilige Wissensakquise für EK

Eine wesentliche Voraussetzung für die arbeitsteilige Wissensakquise ist der objektorientierte Ansatz zur Aufbereitung von Konfigurationsmodellen bzw. -wissen mittels Constraints. Um hierbei besser zu differenzieren, wird im Folgenden zwischen tabellarischer, anweisungsbasierter, regelbasierter, und constraintbasierter Konfiguration unterschieden, siehe Tabelle 15. Daraus ergibt sich, dass die constraintbasierte Konfiguration eine objektorientierte, komponentenunabhängige Darstellungsform des EK-Wissens ermöglicht. EK sind so am besten skalierbar, da die Lösung im Rahmen eines Suchproblems gefunden werden kann. Constraints sind im Prinzip Regeln ohne Ableitungsrichtung. Diese gelten auf Basis von Objektklassen und -eigenschaften für eine Gruppe von Komponenten. Hierbei wird nur indirekt die Lösung beschrieben, siehe Kapitel 4.4. Im Gegensatz dazu gelten Regeln, die auch Produktionsregeln genannt werden, für einzelne Komponenten und deren individuelle Attribute. [11, 34, 122, P13]

Tabelle 15: Gegenüberstellung sowie Abgrenzung von tabellarischer, anweisungs-, regel- und constraintbasierter Konfiguration [1, 11, 34, 43, 49, 122, P13]

Konfiguration	Besonderheit
Tabellarisch	Liste aller gültigen Kombinationen von Komponenten + Kein Konfigurator erforderlich - Wartungsaufwand für neue Komponenten - Exponentielle Komplexität (n^m)
Anweisungs-basiert	Feste Sequenz von Befehlen und Abfragen + Sequenzen für Einzelfälle leicht zu implementieren - Wartungsaufwand und schlechte Skalierung
Regelbasiert (komponentenbasiert, definierte Ableitungsrichtung)	Produktionsregeln, die festlegen, welche Komponenten miteinander kombiniert werden dürfen + Leicht aus der natürlichen Sprache abzuleiten - Wartungsaufwand für neue Komponenten
Constraintbasiert (modellbasiert bzw. objektorientiert, keine Ableitungsrichtung vorgegeben)	Constraint hinsichtlich der abstrakten Komponenteneigenschaften, die mögliche Kombinationen basierend auf übergreifenden Objektklassen einschränken + Projektübergreifende Übertragbarkeit der Constraints - Übergreifende Objektklassen erforderlich

Konfigurationstabellen speichern lediglich alle Kombinationen von Komponenten in gültigen Konfigurationen und sind daher nur bedingt als arbeitsteiliges Werkzeug im Rahmen eines standardisierten Prozesses geeignet, siehe Bild 91. [P13]

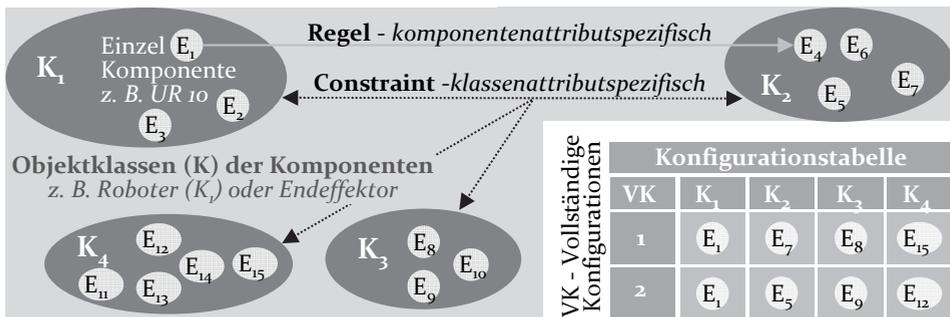


Bild 91: Gegenüberstellung und Abgrenzung von tabellarischer, regel- und constraintbasierter Konfiguration

Grundsätzlich ist es möglich, aus Konfigurationstabellen komponentenspezifische Regeln abzuleiten. Diese Regeln können dann zu Objektklassen und allgemeingültigen Constraints kondensiert werden. Dieses Vorgehen kann bei sehr jungen Wissensbereichen notwendig sein, lässt den bearbei-

tenden Fachexperten aber zu viel Interpretationsspielraum für eine nachhaltige Wissenskollaboration. Der nachfolgende Prozess der arbeitsteiligen Wissensakquise basiert daher auf Constraints.

Im Folgenden wird ein objektorientierter Ansatz verfolgt. Hierbei wird eine explizite und übergreifende Struktur für die Modellierung erstellt. Die Entwicklung der Struktur bzw. der 150% Topologie wird in Kapitel 6.4.2 adressiert. Durch die dahinterliegende Struktur werden die Constraints projektübergreifend verwertbar, da diese auf demselben Schema basieren. Dadurch wird eine bessere Koordination der Entwicklung der Wissensbasis unterstützt. Auch ermöglicht eine objektorientierte Wissensrepräsentation den Einsatz von Vererbungshierarchien [43], um übergeordnete Constraints für spezifische Klassen von Problemen einzusetzen. Das Constraint orientiert sich an dem Aufbau einer Regel aus [43] und kann in mehrere Bestandteile untergliedert werden. Hierbei wird dieses Modell um die Notwendigkeit eines Systemmodells erweitert, siehe Bild 92. Die Kernaussage ist die eigentliche Constraint-(Un-)Gleichung.

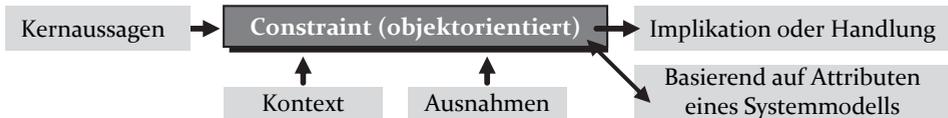


Bild 92: Strukturierte Darstellung der Bestandteile eines Constraints nach eigener Erweiterung, in Anlehnung an das Regelmodell aus [43]

Die zusätzliche Angabe des Kontexts der Constraints kann zur Effizienzsteigerung genutzt werden. Der Kontext regelt, wann welche Constraints vom System ausgeführt werden müssen, und erleichtert die Wiederverwendung der Constraints. Über die Ausnahmen kann die Verwendung für spezifische Anwendungsfälle eingeschränkt werden.

6.4.2 Entwicklungsmethode zur kollaborativen Wissensakquise und -modellierung

Die Methode besteht aus acht aufeinander aufbauenden Schritten, welche aufgrund der modularen Struktur an verschiedene Mitarbeiter delegiert werden können, siehe Bild 93. Die ersten sieben Schritte werden sequenziell ausgeführt, um ein geeignetes Konfigurationsmodell zu entwickeln. Der letzte Schritt adressiert die Validierung und kontinuierliche Weiterentwicklung des Konfigurationsmodells. Obwohl das Verfahren allgemein für EK anwendbar ist, wird es im Folgenden am Beispiel einer RA erläutert. Die Veröffentlichung von SCHÄFFER et al. stellt die Basis für das Teilkapitel dar. [P13]

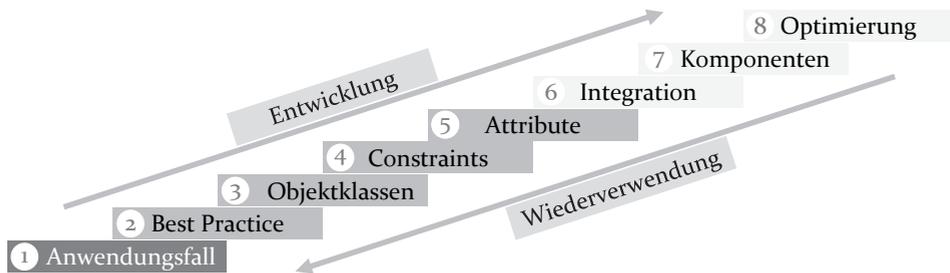


Bild 93: Acht-Schritte-Methode zur kollaborativen Wissensakquise und -modellierung, sowie als Grundlage einer skalierbaren Entwicklung von EK [P13]

(1) Identifizierung von marktwirtschaftlich relevanten Anwendungsfällen für EK

Im Allgemeinen bieten Konfiguratoren bzw. EK ein großes marktwirtschaftliches Potential, erfordern aber einen hohen initialen Entwicklungsaufwand [11]. Deshalb werden im ersten Schritt gesellschaftlich bzw. marktwirtschaftlich relevante Anwendungsfälle für EK identifiziert. Die Auswahl eines geeigneten Anwendungsfalls ist entscheidend dafür, ob rasche Erfolge erzielt werden können. Ein konkreter Anwendungsfall hilft dabei, die Entwicklung des EK auf die wichtigsten Funktionen zu fokussieren. Auch wird hierdurch vermieden, dass technologisch relevante aber wirtschaftlich irrelevante Anwendungsfälle adressiert werden. Die klare Definition eines wirtschaftlich sinnvollen Anwendungsfalls erleichtert es dem Management, die notwendigen Ressourcen für die Erstellung des angestrebten EK zur Verfügung zu stellen. [P13]

Anwendungsfall von ROBOTOP: Bei Unternehmen mit weniger als 50 bzw. 250 Beschäftigten nutzt nur jedes Fünfte bzw. jedes Dritte Industrieroboter in seiner Produktion [182]. Hieraus leitet sich ein enormes Optimierungsbzw. Marktpotential ab, welches im Folgenden adressiert wird. Hierbei wird der EK für die Vertriebsunterstützung von RA eingesetzt. Das wirtschaftliche Potential von EK zur Angebotsbearbeitung ist in Kapitel 5.3.1 dargestellt. Nach dem Pareto-Prinzip liegt der Fokus des angestrebten EK auf den häufig auftretenden Anwendungsfeldern: Handhabungsprozesse (ohne Montage) und Montageprozesse, siehe Kapitel 6.3.5. Diese Auswahl erfolgt nach der Marktstudie der *International Federation of Robotics* [179]. Das roboterzentrierte Schweißen als Teilmenge der Montage wird hierbei ausgeschlossen, da dies in der Regel wesentlich komplexer ist. [P13]

(2) Sammlung und Aufbereitung mehrerer BP sowie Prozessmodule als Datengrundlage

Im zweiten Schritt werden BP sowie Prozessmodule von RA gesammelt und aufbereitet. Diese BP dienen als Wissensbasis für die nächsten Schritte, da diese Informationen über praxiserprobte Lösungsansätze enthalten. Darüber hinaus bieten BP und Prozessmodule eine erste Struktur sowie Startparameter für die aufwandsreduzierte Anpassungskonfiguration, siehe Bild 94. Dokumente, wie Spezifikationen, technische Dokumentation und digitale Modelle der BP, liefern diese Informationen. Diese können durch Herstellerangaben über die Komponenten ergänzt werden. Im Detail werden die Sammlung, Bewertung und Aufbereitung von BP in Kapitel 6.3 adressiert. [P13]

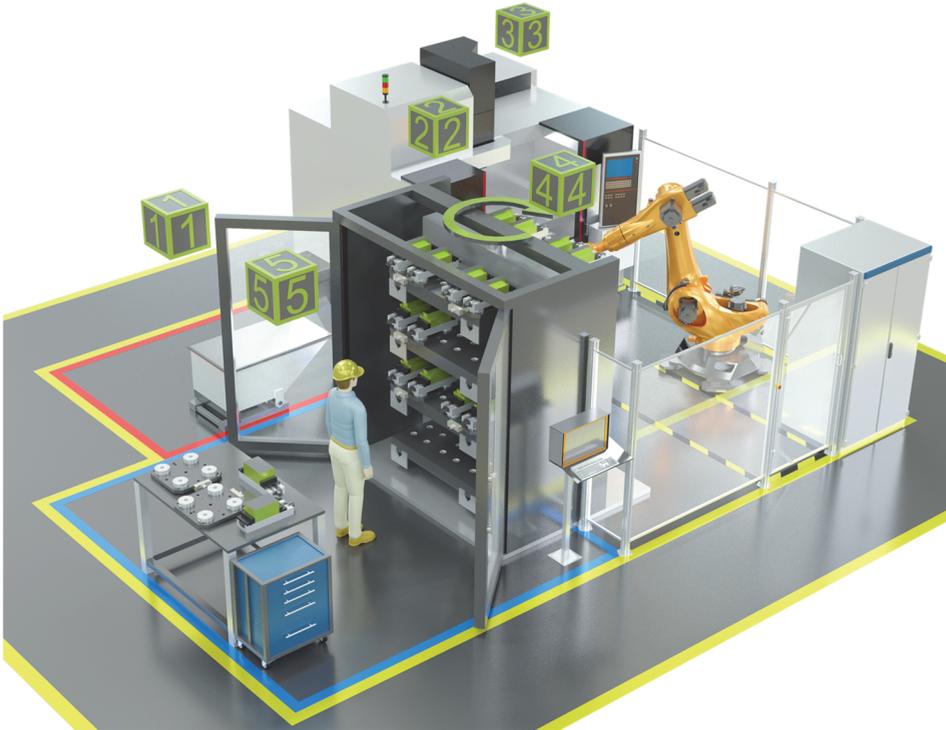


Bild 94: Aufbereitete BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen als Datengrundlage für die weitere Modellierung

Für Unternehmen, die über keine große Anzahl von selbst implementierten RA verfügen, kann dieser Schritt eine Herausforderung darstellen. Viele Systemintegratoren betrachten die Freigabe solcher Informationen als geschäftskritisch. Nach Experteninterviews wird nur für vertriebsunterstützende Maßnahmen ein Transfer von BP gefördert. Diese Herausforderung

kann durch die strategische Zusammenarbeit mit mehreren Systemintegratoren bzw. Domänenexperten gemindert werden. [P13]

(3) Extraktion der generischen, fallübergreifenden Objektklassen aus den gesammelten BP in Form der 150% Topologie

Im dritten Schritt werden generische Objektklassen aus den gesammelten BP und deren Prozessmodulen extrahiert. Diese können durch Experteninterviews sowie eine Literaturrecherche ergänzt werden. Die für die Modellierung von BP bzw. RA benötigten Objektklassen werden in der sogenannten 150% Topologie zusammengefasst. [P13]

Definition 150% Topologie	
<p>Die 150% Topologie dient zur objektorientierten, Best-Practice(BP)-neutralen Beschreibung bzw. Modellierung einer Automatisierungslösung. Bei der Konzeption und Implementierung von Engineering-Konfiguratoren (EK) kommt die 150% Topologie zum Einsatz. Hierdurch wird eine BP- und EK-übergreifende Wiederverwendung von Expertenwissen in Form von Constraints ermöglicht. Die Constraints werden auf Basis der Objektklassen modelliert. Hierzu kondensiert die 150% Topologie die relevanten Bestandteile von allen zur Verfügung stehenden BP als Objektklassen (1-x). Daher enthält die 150% Topologie mehr Objektklassen (150%) als für die Modellierung einer spezifischen BP benötigt werden.</p>	

Am Beispiel der RA aus Bild 94 ist in Bild 95 ein mögliches Ergebnis für die Objektklassen dargestellt. Die Zusammenstellung der Objektklassen wird als 150% Topologie bezeichnet.

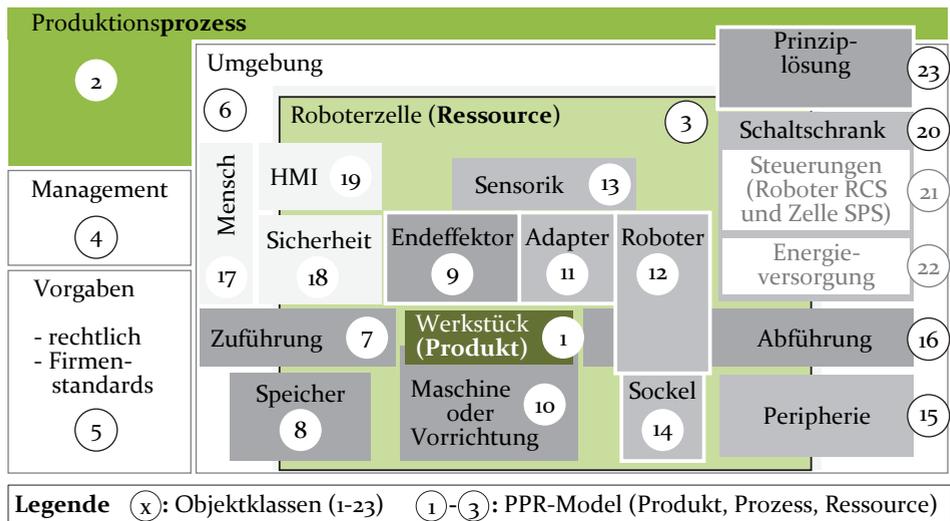


Bild 95: Die 150% Topologie mit den Objektklassen (1-23) zur Modellierung einer RA als Basis zur Wissenswiedernutzung [P13]

Objektklassen (siehe Bild 95) beinhalten physikalische Objekte, die in einer RA zur Durchführung der Fertigungsaufgabe erforderlich sind (d. h. Ressourcen). Daneben beinhalten die Objektklassen auch allgemeine, am Planungsprozess beteiligte Konzepte, wie: Produktionsprozess (z. B. Reihenfolge der Prozessschritte), Werkstück- bzw. Produktinformationen (z. B. Anzahl der zu montierender Werkstücke), das Umfeld (z. B. das Fabriklayout) oder die Managementvorgaben (z. B. das Budget). [P13]

(4) Entwicklung der Konfigurationslogik mittels Constraints basierend auf der Nomenklatur der Objektklassen

Im Allgemeinen beschreiben die Constraints die Kombinierbarkeit verschiedener Objektklassen in Bezug auf deren Attribute und verkörpern damit das grundlegende Expertenwissen. Die vorliegende Methode konzentriert sich auf einen bedarfsorientierten Modellierungsansatz. Ausgehend vom Anwendungsfall von ROBOTOP bzw. BP 1 wird die nachfolgende Modellierung durchgeführt. Zusätzlich werden die Constraints auf Basis der generellen Anforderungen eines EK entwickelt. Im vorliegenden Fall wird das Abhängigkeitswissen zwischen den Objektklassen (1-23) in Form von Constraints abgeleitet. Dazu wird eine Auswahl von anwendungsfall-relevanten Objektklassen aus der 150% Topologie extrahiert und eine zweidimensionale Zuordnungsmatrix erstellt, die alle relevanten Objektklassen enthält, siehe Bild 96. [P13]

Legende: 1-23: Objektklassen Aufgabenbereich (Markierung) der Mitarbeiter (A-C) zur Wissensakquise																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	...
1	X																							
2		X																						
3			X																					
4				X																				
5	Vorgaben				X																			
6	Umgebung					X																		
7	Zuführung						X																	
8	Speicher							X																
9	Endeffektor								X															
10	Maschine oder Vorrichtung									X														
11	Adapter										X													
12	Roboter											X												
13	Sensorik												X											
...														X										

Bild 96: Beispielhafter Ausschnitt aus der zweidimensionalen Zuordnungsmatrix [P13]

Jedes Feld der Matrix stellt die binären Beziehungen der beiden betrachteten Objektklassen dar. Die Matrixanordnung ermöglicht die sequenzielle

Erfassung und Modellierung der Constraints (siehe Tabelle 16). Einzelne Constraint- bzw. Felderkombinationen können an verschiedene Mitarbeiter delegiert werden. Die Zuordnung von Objektklassen kann durch den Wissensingenieur mithilfe der Matrix erfolgen. So kann das Wissen der verfügbaren Mitarbeiter (A-C) optimal berücksichtigt werden, siehe Bild 96 (z. B. erhält der Mitarbeiter C als Experte für Robotik die Felder 6-13). Fehlende Constraints können durch Literaturrecherche, Experteninterviews und Outsourcing gewonnen werden. Eine Übersicht und Bewertung weiterer Wissensquellen befindet sich in [P1]. Durch die systematische Vervollständigung aller Felder der Matrix werden die potentiellen Beziehungen zwischen den Objektklassen abgefragt. Darüber hinaus werden durch die Matrixanordnung Wissenslücken oder Bereiche ohne Wechselwirkung explizit sichtbar. Diese sind die Objektklassenkombinationen, in denen keine Constraints vorhanden sind. Durch die Matrixanordnung wird die strukturierte Wiederverwendung einzelner Kombinationen der Constraints von einem Konfigurationsprojekt zu einem anderen ermöglicht. Tabelle 16 zeigt einen Auszug der werkstückbezogenen Constraints. [P13]

Tabelle 16: Auszug aus den werkstück- (produkt-)bezogenen Constraints

	Beeinflussung	Constraint
Physikalische Wechselwirkung	(1) Roboterauswahl	(1) Roboter.Traglast > Endeffektor.Gewicht + Adapter.Gewicht + Werkstück.Gewicht
	(2) Adapterauswahl	(2) Werkstück.Anzahl = Adapter.Schnittstellen_Anzahl
	(3) Endeffektorauswahl (Greifbare_Geometrie: z. B. Zylinder (3-Backen-Greifer, Sauggreifer), Flachteil (Sauggreifer)	(3) Endeffektor.Traglast > Werkstück.Gewicht Endeffektor.Greifbare_Geometrie = Werkstück.Grundgeometrie Endeffektor.Anzahl = Werkstück.Anzahl
	(4) Auswahl der Maschine	(4) Maschine.Traglast > Werkstück.Gewicht Maschine.Werkstückvolumen > Werkstück.Volumen
	(5) Auswahl der Zuführung (Typ z. B. Schüttgut, hohe Empfindlichkeit)	(5) Zuführung.Traglast > Werkstück.Gewicht Zuführung.Type = Werkstück.Type Zuführung.Werkstückvolumen > Werkstück.Volumen
	(6) Auswahl der Abführung	(6) Abführung.Traglast > Werkstück.Gewicht Zuführung.Werkstückvolumen > Werkstück.Volumen
	(7) Weitere	(7) ...

Um die gesammelten Constraints zu strukturieren, eignet sich eine Einteilung nach dem PPR-Modell: Produkt- (Werkstück: Tabelle 16), Prozess- (Produktionsprozess: Tabelle 17) und Ressourcenanforderungen (Komponenten: Tabelle 18). Da das Produkt die primären Anforderungen an eine RA vorgibt, wird mit diesem in Tabelle 16 begonnen. Ergänzt werden die Produkthanforderungen durch die prozessspezifischen Anforderungen in Tabelle 17.

Tabelle 17: Auszug aus den produktionsprozess- (prozess-)bezogenen Constraints

	Beeinflussung	Constraint
Physikalische Wechselwirkung	(1) RoboterAuswahl (Typ: Scara, Delta, 5-Achs-Knickarm, 6-Achs-Knickarm, 7-Achs-Knickarm)	(1) Roboter.Typ = Produktionsprozess.Typ Roboter.Reichweite > $\overline{\text{Roboter.Position} - \text{Zuführung.Werkstück_Position}}$ Roboter.Reichweite > $\overline{\text{Roboter.Position} - \text{Maschine.Werkstück_Position}}$ Roboter.Reichweite > $\overline{\text{Roboter.Position} - \text{Abführung.Werkstück_Position}}$
	(2) Endeffektorauswahl	(2) Endeffektor.Haltekraft > Produktionsprozess.Beschleunigungskraft
	(3) Auswahl der Maschine (Typ z. B. Drehen, Fräsen)	(3) Produktionsprozess.Typ = Maschine.Typ
	(4) Auswahl der Zuführung	(4) $\text{Produktionsprozess.Autonomiezeit} < \frac{\text{Zuführung.Werkstück_Speicherkapazität} + \text{Speicher.Kapazität}}{\text{Produktionsprozess.Taktzeit}}$
	(5) Weitere	(5) ...

Auf Basis technischer Rahmenbedingungen, wie Software- oder Hardware-schnittstellen, bestehen weitere Restriktionen. Diese existieren beispielsweise bei dem Flansch (Schnittstelle) zwischen Roboter und Endeffektor. Sollten diese nicht kompatibel sein, wird ein zusätzlicher Adapter benötigt. Um die Kompatibilität der Komponenten zu validieren, wird die letzte Kategorie der komponenten- (ressourcen-)bezogenen Constraints benötigt, siehe Tabelle 18. Auch wirken sich Preisvorgaben auf die Komponenten aus. Durch restriktive Preisvorgaben, werden Komponenten gewählt, die gerade noch die Anforderungen erfüllen. Zielgrößen wie Autonomiezeit oder Taktzeit der RA können hierdurch ggf. negativ beeinflusst werden.

Tabelle 18: Auszug aus den komponenten- (ressourcen-)bezogenen Constraints

	Beeinflussung	Constraint
Kompatibilität	(1) Roboter und Endeffektor (Schnittstelle z. B. ISO 9409-Schnittstelle)	+ Roboter.Schnittstelle = Endeffektor.Schnittstelle | (oder) Roboter.Schnittstelle = Adapter.Schnittstelle_01 & (und) Endeffektor.Schnittstelle = Adapter.Schnittstelle_01
Preis	(2) Gesamtpreis (3) Weitere	(2) Management.Budget > all.select(Preis).quantified_sum (Summe der Preise aller Komponenten) (3) ...

Die vorher aufgeführten Constraints müssen als funktional notwendige Rahmenbedingungen erfüllt werden. Zur Optimierung kann zusätzlich ein Constraint ausgewählt werden. Hierbei ist eine Optimierung nach Preis, Autonomiezeit oder Taktzeit sinnvoll, siehe Tabelle 19. Das Konfigurationsframework besitzt eine interne Optimierungsfunktion (min., max.), um nach einem ausgewählten Attribut und unter Einhaltung aller Constraints minimieren oder maximieren zu können.

Tabelle 19: Constraints zur automatischen Engineering-Konfiguration der RA nach den Optimierungskriterien Preis, Taktzeit oder Autonomiezeit

	Beeinflussung	Constraint
Primäres Optimierungskriterium	(1) Preis (minimieren) (2) Taktzeit (minimieren) (3) Autonomiezeit (maximieren)	(1) Gesamtpreis = all.select(Preis).quantified_sum.min (2) Gesamte_Taktzeit = all.select(Taktzeit).quantified_sum.min (3) Gesamte_Autonomiezeit = all.select(Autonomiezeit).max

(5) Ableitung der erforderlichen Attribute aus den Constraints und Implementierung innerhalb des Datenschemas

Anhand der extrahierten Constraints wird ersichtlich, welche Attribute die gegebenen Objektklassen benötigen, um innerhalb eines Konfigurationsframeworks automatisch ausgeführt werden zu können, siehe Tabelle 20.

Tabelle 20: Exemplarisch dargestellte Ableitung der notwendigen objektlassenspezifischen Attribute aus den gesammelten Constraints

Constraint	Objektklasse: Attribut (Name der Variablen mit Einheit sowie [Datentyp])
(1) Roboter.Traglast > Endeffektor.Gewicht + Adapter.Gewicht + Werkstück.Gewicht	(1) Roboter: Traglast in kg [double] Endeffektor: Gewicht in kg [double] Adapter: Gewicht in kg [double] Werkstück: Gewicht in kg [double]
(2) Endeffektor.Greifbare_ Geometrie = Werkstück.Grundgeometrie	(2) Endeffektor: Greifbare_Geometrie [*enum] Werkstück: Grundgeometrie [*enum] [*enum: Zylinder, Quader, Ellipsoid, Flachteil]
(3) Weitere	(3) ...

Das Ergebnis ist ein Datenschema basierend auf den verwendeten Objektclassen sowie den zugehörigen Attributen. Im Kontext von EK werden die Attribute wie folgt definiert:

Definition Attribut
Das Attribut ist eine charakteristische Eigenschaft einer Objektklasse in Form einer präzise definierten Variable inklusive eines eindeutigen Namens (z. B. Gewicht, Traglast), einer optionalen Einheitenbeschreibung bei Zahlen (z. B. kg, mm, s, €) und eines Datentyps (z. B. boolean, integer, double, String, enum).
Struktur des Attributs: Name der Variablen mit Einheit (optional) sowie [Datentyp] Beispiel für ein Attribut: Traglast in kg [double]

Da Konfigurationssysteme Zeichenketten vom englischen Datentyp „String“ nur schwer vergleichen können, sollten textuelle Variablentypen vermieden werden. Stattdessen wird für jede Textvariable eine eigene Liste bzw. Domäne erstellt, die jeder gültigen String-Antwort eine Nummer zuordnet. Die Objektclassen von Ressourcen benötigen eine herstellerunabhängige funktionale Beschreibung. Zusätzlich sind Anzeigeattribute erforderlich. Diese werden für die grafische Benutzeroberfläche verwendet bzw. sind für den Nutzer von Interesse, haben aber keine logische Relevanz für Constraints. [P13]

(6) Integration des Datenschemas und der Constraints in das Konfigurationsframework

Im sechsten Schritt werden die Objektclassen und ihre Attribute (Datenschema) in eine bestimmte Konfigurationssprache überführt. Ein Auszug aus einem Datenschema für EK ist in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Auszug aus dem Datenschema für die Objektklassen Roboter, Endeffektor, Adapter und Werkstück

Objektklasse	Attribute			
Roboter	Bezeichnung [String]	Traglast in kg [double]	Reichweite in mm [double]	Weitere
Endeffektor	Bezeichnung [String]	Traglast in kg [double]	Preis in € [double]	...
Adapter	Bezeichnung [String]	Flanschtyp_1 [enum]	Flanschtyp_2 [enum]	...
Werkstück	Bezeichnung [String]	Gewicht in kg [double]	Grundgeometrie [enum]	...
Weitere	...	...	...	...

Auf dieser Grundlage werden die Constraints aus dem vierten Schritt dem Modell hinzugefügt. Diese beziehen sich dann auf die Objektklassen bzw. deren Attribute. Die Constraints werden in eine maschinenlesbare Sprache übersetzt, die durch das ausgewählte Constraint-basierte Konfigurationsframework vorgegeben wird. Für die prototypische Implementierung wurde das Konfigurationsframework der Firma *Tacton* verwendet, insbesondere die Modellierungsumgebung und der Constraint-Solver. [P13]

(7) Erstellung von konkreten Komponenten auf Basis des Datenschemas und Integration in den EK

Im siebten Schritt werden konkrete Komponenten, wie spezifische Roboter (z. B. UR 10) oder Greifer (z. B. PGN-plus), basierend auf dem Datenschema instanziiert. Dabei müssen die Komponenten in eine generische hersteller-unabhängige Beschreibung überführt werden. Alle vom Schema geforderten Attribute werden mit spezifischen Werten auf der Grundlage der Herstellerangaben, z. B. in Form von Tabellen, gefüllt. Somit wird eine Komponente durch eine bestimmte Menge an konkreten Werten und der Zuordnung zu einer Klasse repräsentiert. Durch die Verwendung von Listenvorlagen kann eine Arbeitsteilung erreicht werden. Aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Informationen können bestimmte Attribute und damit Constraints für die Konfiguration nicht verwendet werden. In diesem Fall kann eine strategische Kooperation weiterhelfen. Eine standardisierte Vorbereitung ist für Ressourcenklassen notwendig, solange die Hersteller keine standardisierten maschinenlesbaren, herunterladbaren Listen ihrer Komponenten zur Verfügung stellen.

Tabelle 22: Auszug aus den Komponenten bzw. Datensätzen der Objektklasse Roboter mit den Attributen Bezeichnung, Hersteller, Traglast, Reichweite sowie Anzahl der Achsen nach den Herstellerdatenblättern [183–186]

Objektklasse (Roboter)	Attribute des Roboters				
Bezeichnung [String]	Hersteller [enum]	Traglast in kg [double]	Reichweite in mm [double]	Anzahl der Achsen [int]	Weitere
RS010N	Kawasaki	10	1450	6	...
KR20_R1810	Kuka	20	1813	6	...
UR5	Universal Robots	5	850	6	...
UR10	Universal Robots	10	1300	6	...
UR16	Universal Robots	10	900	6	...
GP88	Yaskawa	88	2236	6	...
Weitere	...	...	...	...	...

Abschließend können die gefüllten Tabellen in das Konfigurationsframework importiert und dem Konfigurationsmodell mit der gleichen Struktur zugeordnet werden. [P13]

(8) Validierung und schrittweise Optimierung des EK auf Basis neuer BP sowie durch das Feedback aus dem Realbetrieb

Im achten Schritt wird das Konfigurationsmodell iterativ getestet und verbessert. Zu diesem Zweck werden zusätzliche Komponenten angelegt sowie neue BP analysiert, um weitere fehlende Constraints zu extrahieren. Durch die Eingabe von Produkt- und Prozessspezifikationen im EK wird eine Lösung, d. h. ein passender Satz von Ressourcen, generiert. Optimiert durch die BP kann der eigentliche Geschäftsbetrieb mit den Anwendern aufgenommen werden. Dieser wird überwacht und ein Systemintegrator überprüft die praktische Machbarkeit der konfigurierten Lösung. Fehlende Details innerhalb der EK werden durch zusätzliche Constraints ergänzt, bis das EK-Ergebnis der geforderten Detaillierung entspricht. [P13]

6.5 Implementierung des EK und Anwendungsbeispiele

Im Rahmen des Wissenserwerbs und der Modellierung wurden die vorgestellten Schritte der BP-Aufbereitung (Kapitel 6.3) sowie der Aufbereitung des logischen Expertenwissens (Kapitel 6.4) durchgeführt. Die Aufbereitung der BP-Szene für den EK erfolgte entlang der vorgeschlagenen Methode, zuerst als 2D-, gefolgt von der 3D-Aufbereitung der BP in *Inventor*.

Um diese in einen EK zu überführen, wird in Kapitel 6.5.1 eine Vorgehensweise für die Implementierung von 3D-EK vorgestellt. Zur Validierung des EK sowie der Methode wurden zwei Fallstudien für RA erstellt, in welchen die Szenen bzw. BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen (handhaben) sowie BP 4 - Werkstücke montieren (handhaben und fügen) verwendet werden. Als Ergebnis wurde ein EK geschaffen, welcher die Planung der angestrebten Automatisierungslösung auf einfache Weise übernehmen kann. Bei der Implementierung wurde mit technischen bzw. kundenspezifischen Restriktionen als konstruktive Rahmenbedingungen hinsichtlich der Produkt- und Prozessparameter begonnen. Innerhalb der räumlichen Zusammenhänge wurde zwischen Inhaltsrelation, also Objekt A ist Teil von Objekt B, Abstands- bzw. Lagerrelationen und Berührungsrelationen, also Schnittstelle A darf mit Schnittstelle B verbunden werden, unterschieden [187].

6.5.1 Vorgehen bei der Implementierung des 3D-EK

Die 2D-BP dienen als Konzeptgrundlage für die 3D-Aufbereitung. Um die 3D-BP in den Gesamtkontext der Wissensbereiche einzuordnen, werden diese entlang der vorgeschlagenen Entwicklungsmethode zur Erstellung von 3D-EK erläutert. Die arbeitsteilige Entwicklungsmethode zur Erweiterung des logischen EK zu einem 3D-visuellen EK besteht aus fünf Schritten, siehe Bild 97. Das logische Konfigurationsmodell (W_3) kann bis Schritt vier parallel entwickelt werden und wird erst ab Schritt fünf benötigt. Während dieses Prozesses werden 3D-BP strukturiert als digitale modulare Szenen aufgebaut. Die Methode wird an einem Beispiel erklärt, lässt sich aber grundsätzlich auf alle CAD-Werkzeuge übertragen, in welche eine Konfigurationsengine eingebunden werden kann.

(1) Definition der Objektklassen: Um die Übertragbarkeit und automatische Koppelbarkeit mit dem logischen Konfigurationsmodell von 3D-BP sicherzustellen, werden zuerst die beschreibungsrelevanten Objektklassen der 150% Topologie ausgewählt, siehe Kapitel 6.4.2. Die eigentliche Aufbereitung geschieht auf Basis der 2D-BP, wobei für alle vorhandenen Komponenten 150% Objektklassen als Klassifizierung zugeordnet werden.

(2) 3D-Komponenten anlegen: Im zweiten Schritt werden die 3D-Einzelmodelle der Komponenten als kleinste 3D-visuelle Einheit von 3D-BP bzw. als austauschbare Module für den 3D-EK erstellt. Dies geschieht für alle konkreten Instanzen von Komponenten bzw. Modulen, wie Greifer, Roboter, Sensoren oder Schutzeinrichtungen, welche sich jeweils in ein Objekt

kategorisieren lassen. Das Anlegen der 3D-Modelle lässt sich in vier Teilschritte unterteilen.

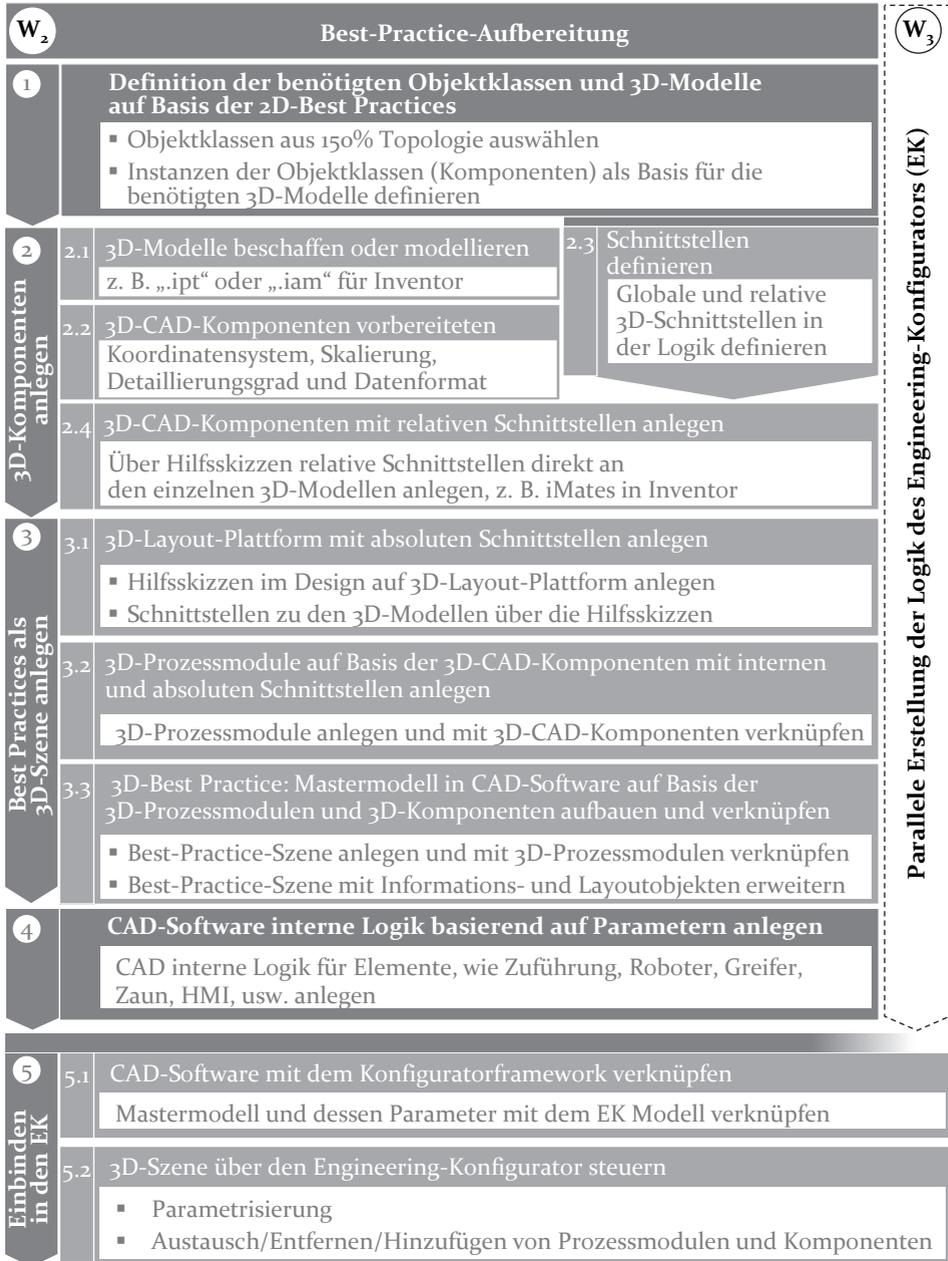


Bild 97: Entwicklungsmethode zur Implementierung eines 3D-EK basierend auf den BP und dem logischen Konfigurationsmodell

Zuerst müssen die erforderlichen 3D-Modelle von den Komponentenherstellern bzw. Datenaustauschplattformen beschafft oder, falls nicht vorhanden, nach den jeweiligen Datenblättern nachmodelliert werden (Teilschritt 2.1). Danach müssen 3D-Modelle für eine automatische Verwendung vorbereitet werden, d. h. Koordinatensysteme, Skalierung und Dateiformat sollten normiert sowie der Detaillierungsgrad reduziert werden (Teilschritt 2.2). Gerade wenn die 3D-Modelle in verschiedenen CAD-Softwaresystemen angelegt wurden, kann es zu einem Anpassungsbedarf kommen. Auch weisen 3D-Modelle, welche über verschiedene Designwerkzeuge erstellt werden, des Öfteren unterschiedliche Koordinatensysteme und Ursprungskoordinaten auf, wodurch vorab eine einheitliche Normierung erforderlich wird. Software aus dem Bereich des Grafikdesigns, wie *Blender* oder *Three.js-Editor (WebGL)*, besitzen ein linksdrehendes, CAD-Softwaresysteme, wie *Inventor* oder *SolidWorks*, ein rechtsdrehendes Koordinatensystem. Darüber hinaus sind die CAD-Modelle, die primär aus der Produktentwicklung des Komponentenherstellers hervorgehen, für einen 3D-EK bzw. die Grobplanung von RA unnötig detailliert. Durch zu detaillierte 3D-Modelle wird die Darstellungsperformance reduziert. In Teilschritt 2.3 werden die generischen Schnittstellen definiert, über die die einzelnen 3D-Modelle miteinander verknüpft werden sollen. Hierbei kann zwischen globalen, also an der primären Baugruppe befindlichen, und relativen, also an den Unterbaugruppen befindlichen, Schnittstellen unterschieden werden. Abschließend werden 3D-Modelle mit generischen Schnittstellen angelegt. Das Konzept ist in den meisten CAD-Werkzeugen umsetzbar. Speziell in der Software *Inventor* ist dies z. B. über *iMates* möglich.

(3) BP als 3D-Szene anlegen: In Schritt drei werden die zuvor angelegten 3D-Modelle über die generischen Schnittstellen zu 3D-BP kombiniert. Um die generische Konfigurierbarkeit einer solchen Szene sicherzustellen, geschieht dies in zwei Teilschritten. In Teilschritt 3.1 wird zuerst eine 3D-Layout-Plattform angelegt. Die 3D-Layout-Plattform dient mit ihren globalen Schnittstellen als primäres Elternelement, zu dem alle weiteren 3D-Modelle relativ ausgerichtet werden. Die Schnittstellen werden parametrisiert, d. h. im Bezug zum Ursprungskoordinatensystem der 3D-Layout-Plattform angelegt, damit diese im Nachgang dynamisch entlang der Konfiguration angepasst werden können – in *Inventor* ist das Vorgehen z. B. über Hilfs-skizzen möglich, siehe Bild 98. Außerdem kann über die 3D-Layout-Plattform das Abmaß des 3D-BP in Form von Parametern durch die Konfigura-

tionsengine verändert sowie die Szene kontinuierlich um Schnittstellen erweitert werden. Hierbei handelt es sich primär um eine Bus-Modularität, siehe Kapitel 2.3.1.

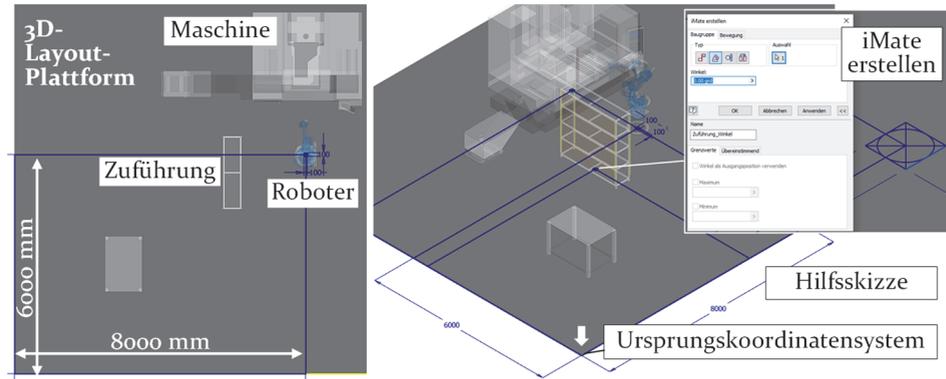


Bild 98: 3D-Layout-Plattform bzw. Mastermodell der BP 1, indem über Hilfsskizzen die Prozessmodule und Komponenten auf der Bodenplatte vorpositioniert werden

Die Schnittstellen werden in Teilschritt 3.2 zum Aufbau des Mastermodells benötigt. Dabei wird das Mastermodell als Baumstruktur der einzelnen 3D-Modelle angelegt. Die 3D-Modelle dürfen dabei nur über Schnittstellen, also absolute Schnittstellen der 3D-Layout-Plattform oder relative Schnittstellen eines bereits existierenden 3D-Modells, eingefügt werden.

(4) CAD-Software-interne Logik anlegen: Insbesondere für die relative Anordnung von einzelnen 3D-Modellen zueinander kann es sinnvoll sein, gewisse logische Zusammenhänge in der CAD-Software zu hinterlegen, so dass sich die Konfigurationsengine auf die primären Konfigurationsaspekte wie Art und Anzahl der Komponenten, fokussieren kann.

(5) Konfigurator einbinden: Im letzten Schritt erfolgt die Kopplung des logischen Konfigurationsmodells bzw. der -engine mit der visuellen Darstellung des CAD-Systems über die 3D-BP. In Teilschritt 5.1 werden dafür der Komponentenbaum und dessen Parameter der CAD-Software mit dem Datenmodell des Konfigurator-Frameworks verknüpft, siehe Bild 99. In Teilschritt 5.2 kann die 3D-Szene über den Konfigurator gesteuert werden und ermöglicht dadurch eine Anpassungskonfiguration der 3D-BP, siehe Kapitel 6.5.2 und Kapitel 6.5.3.

Zur Validierung des EK wurde ein Prototyp implementiert und zwei Fallstudien auf Basis der BP eins und vier durchgeführt, siehe Kapitel 6.3.5. Die Implementierung des Konfigurationsmodells erfolgt mit dem Framework und der constraintbasierten Konfigurationsengine *Tacton Configuration*

Studio (im Folgenden auch *Tacton*). Für die prototypische Implementierung des 3D-EK wurde das Konfigurationsframework mit der CAD-Software *Inventor* gekoppelt. *Inventor* wurde verwendet, da hierfür eine Plug-In-Integration von *Tacton* besteht, siehe Bild 18 (Lösung durch Kopplung). Die CAD-Software *SolidWorks* wäre eine potenzielle Alternative.

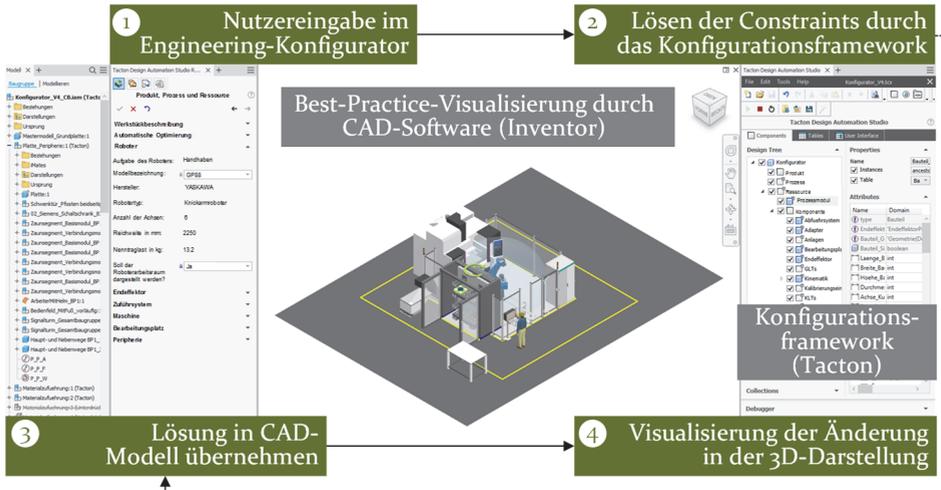


Bild 99: Validierung der BP-Konfiguration entlang einer prototypischen Implementierung mittels der CAD-Software *Inventor* und dem Konfigurationsframework *Tacton*

Ausgehend von einer initialen BP erfolgt eine Anpassungskonfiguration über die Nutzereingaben, welche im Rahmen der verfügbaren Constraints vom Konfigurationsframework gelöst werden. Die berechnete Lösung wird dann in das zuvor angelegte CAD-Modell übernommen und anschließend in der 3D-Darstellung visualisiert, siehe Bild 99.

6.5.2 Fallstudie 1: Bearbeitungsmaschine beladen und entladen (handhaben)

Die Fallstudie 1 des EK basiert auf dem BP 1 – „Bearbeitungsmaschine beladen und entladen (handhaben)“, siehe Kapitel 6.3.5. Ausgehend von der Zielstellung eines Kunden, eine Bearbeitungsmaschine beladen und entladen zu wollen (Einordnung des Lösungsbedarfs, siehe Kapitel 5.2), wird das BP 1 als initialer Parametersatz geladen. Da es sich hierbei um eine Handhabungsaufgabe handelt, sind die primär zu konfigurierenden Prozessmodule und Komponenten (Anpassungskonfiguration, siehe Kapitel 5.2) das Fertigungsverfahren (stationäre oder Fließfertigung), die Materialbereitstellung, die Bearbeitungsmaschine sowie der Roboter, Adapter und Endeffektor, siehe Bild 100.

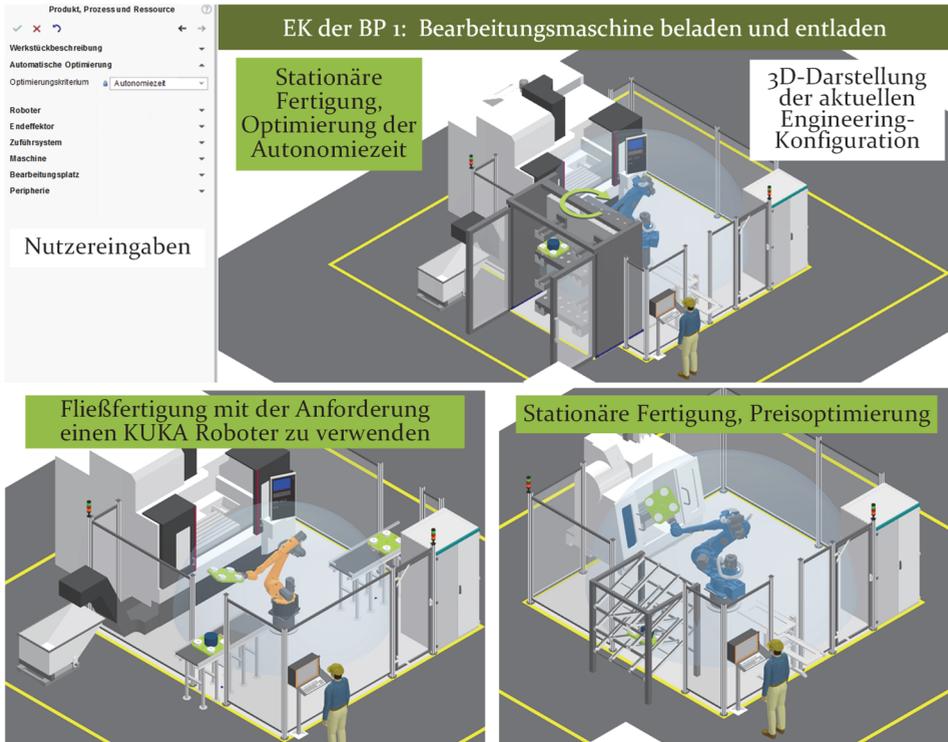


Bild 100: Beispielhafte EK der BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen mittels RA, welches über den EK adaptiert und optimiert wird

Die Reihenfolge orientiert sich an der EK, siehe Kapitel 5.2. Zuerst erfolgt die BP-Auswahl, dann werden die Produkt- (Werkstückbeschreibung), Prozess- (z. B. stationäre oder Fließfertigung, siehe Bild 101) sowie Ressourcenanforderungen (z. B. nur KUKA Roboter) als Datengrundlage für die Anpassungskonfiguration eingegeben. Auf Basis der eingegebenen Anforderungen erfolgt eine automatische Optimierung nach einem ausgewählten Kriterium wie z. B. Taktzeit, Autonomiezeit oder Preis. Abschließend können einzelne Prozessmodule und Komponenten manuell durch den Nutzer ausgetauscht werden, siehe Bild 101 (unten). Der EK erlaubt auf Basis der getätigten Eingaben und Constraints nur die Auswahl zulässiger Prozessmodule und Komponenten (grün). Die visuellen Gestaltungsobjekte, wie das Menschmodell, Eingabegeräte sowie Wartungs- und Rüstwägen, und Informationsobjekte, wie der Arbeitsraum des Roboters oder die Prozessreihenfolge, können bei Bedarf ein oder ausgeblendet werden.

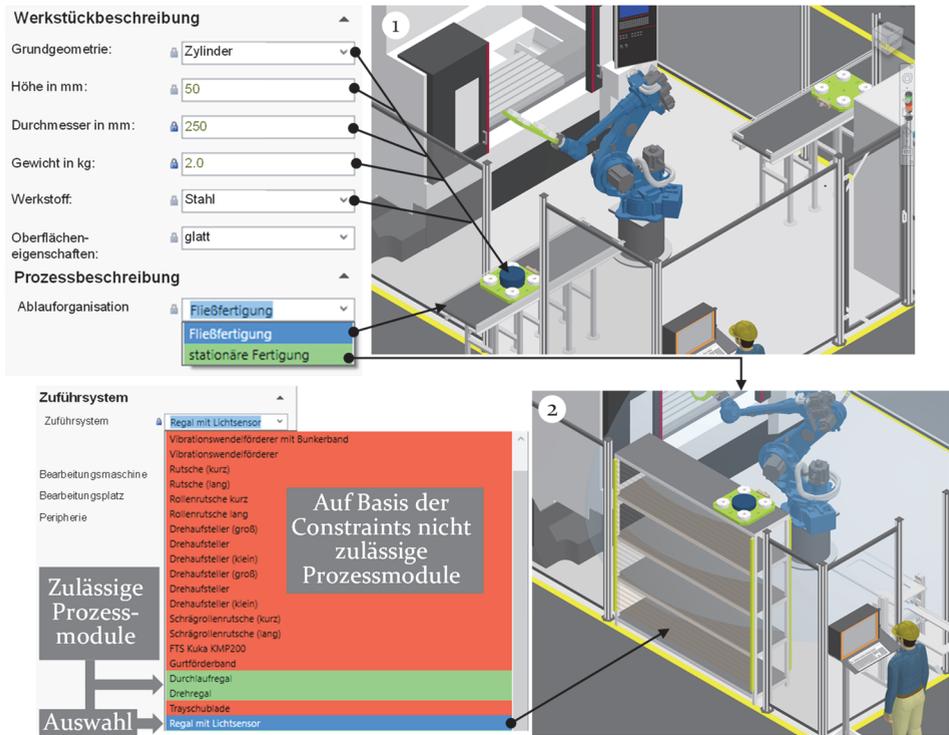


Bild 101: Anpassungskonfiguration der BP 1 - Bearbeitungsmaschine beladen und entladen

6.5.3 Fallstudie 2: Werkstücke montieren (handhaben und fügen)

Die Fallstudie 2 des EK basiert auf dem BP 4 – „Werkstücke montieren (handhaben und fügen)“, siehe Kapitel 6.3.5. Ausgehend von der Zielstellung eines Kunden, Werkstücke montieren zu wollen (Einordnung des Lösungsbedarfs, siehe Kapitel 5.2), wird das BP 4 als initialer Parametersatz geladen. Da es sich hierbei um eine Handhabungs- und Fügeaufgabe handelt, sind die primär zu konfigurierenden Prozessmodule und Komponenten (Anpassungskonfiguration, siehe Kapitel 5.2) die Anzahl der Werkstückzufuhr (1-3) basierend auf der Anzahl der zu montierenden Werkstücke sowie der Typ der Materialbereitstellung (Zuführung) in Abhängigkeit der Werkstückeigenschaften, wie z. B. Geometrie, Schüttgut und Empfindlichkeit, siehe Bild 102.

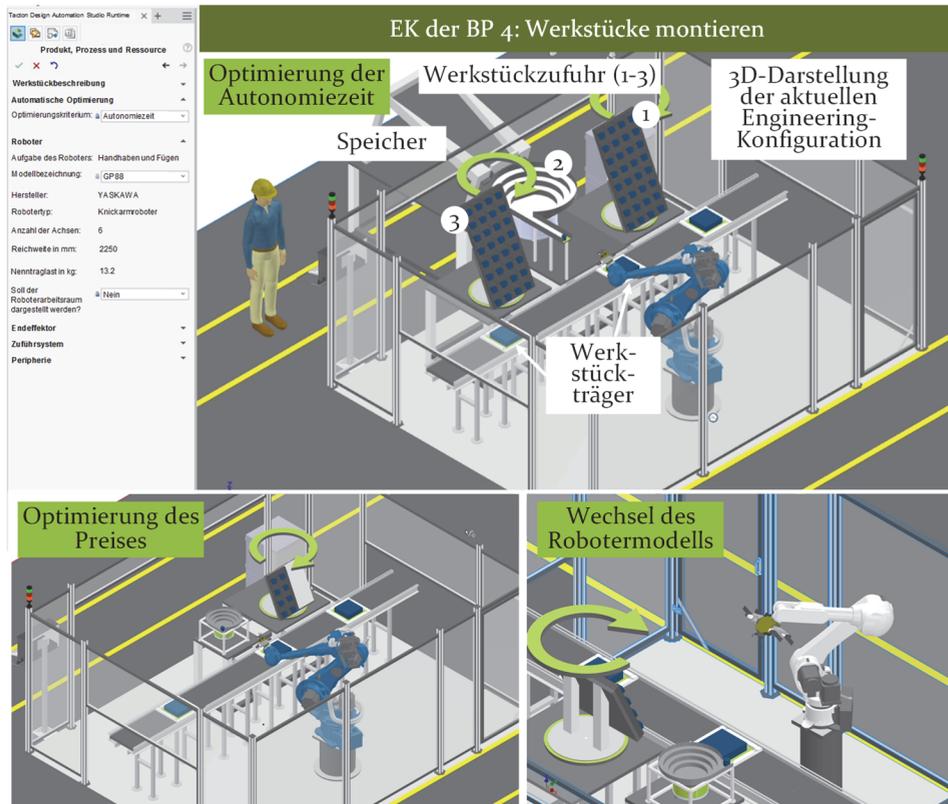


Bild 102: Beispielhafte EK der BP 4 - Werkstücke montieren mittels RA, welche über den EK adaptiert und optimiert wird

Das generelle Vorgehen bei der Engineering-Konfiguration erfolgt analog zu der Fallstudie 1 in Kapitel 6.5.2. Spezifisch für die Montage ist, dass mehrere Werkstücke in einer RA von einem Roboter montiert werden, siehe Bild 103. Die Werkstücke beeinflussen direkt den Typ der Zuführung. Beispielsweise werden empfindliche Werkstücke über einen Werkstückträger bereitgestellt, wohingegen Schüttgut z. B. über Vibrationswendelförderer oder Flexfeeder bereitgestellt werden kann. Hierbei kann die Autonomiezeit durch eine Vergrößerung des Zufuhrsystems (siehe Bild 103, links) oder durch einen zusätzlichen Speicher (siehe Bild 102, oben) erhöht werden. Sollten nur ein oder zwei Werkstücke montiert werden, kann der freie Platz für zusätzliche Werkstückzufuhr verwendet werden, um zusätzlich die Autonomiezeit der RA zu erhöhen. Aus dem Typ der Werkstückträger ergeben sich die Griffpositionen für den Roboter (siehe Bild 103, rechts). Eine Preisreduktion kann z. B. durch die Wahl kostengünstiger Werkstückträger sowie durch die Reduktion der Anzahl an Greifern erfolgen. Auch hier

kann der EK automatisch auf Basis der verfügbaren und zulässigen Prozessmodule und Komponenten eine Optimierung durchführen.

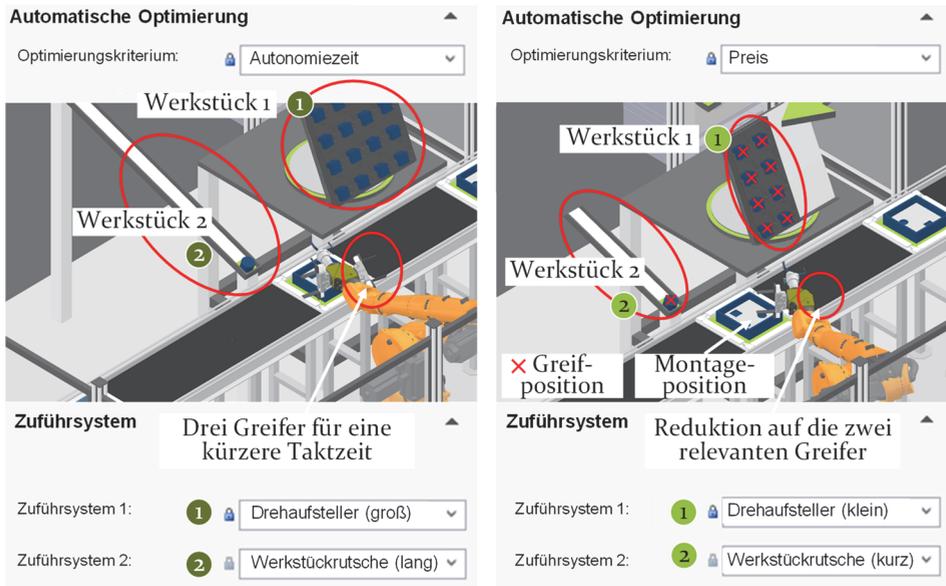


Bild 103: Anpassungskonfiguration der BP 4 - Werkstücke montieren mittels RA

Die sukzessive Optimierung des EK ist über zwei Ansätze möglich: Durch eine Erweiterung des EK um zusätzliche Constraints kann das Ergebnis präzisiert werden. Mithilfe weiterer Prozessmodule und Komponenten können neue, ggf. bessere Varianten der BP konfiguriert werden.

6.5.4 Abschließendes Fazit und Argumentenbilanz zum EK

Zusammenfassend wurde der EK zur Planung von RA und dessen Entwicklungsmethode auf Basis der Implementierung der Webplattform ROBOTOP (siehe Kapitel 5.4) sowie auf Basis von zwei Fallstudien (siehe Kapitel 6.5) validiert. Im Rahmen mehrerer Feedbackzyklen wurden die Konzepte in den Entwicklungsprozess von ROBOTOP eingebracht, wodurch eine agile und effektive Weiterentwicklung ermöglicht wurde. Über die Teilvalidierungsprototypen konnten die Anforderungen für die Webplattform ROBOTOP frühzeitig erhoben werden und eine kontinuierliche Konzeptabsicherung wurde erreicht.

Somit können alle vier Forschungsfragen, die im Rahmen dieser Dissertation adressiert sind, mit ja beantwortet werden:

- 1) **Forschungsfrage:** Kann das Engineering von RA vereinfacht und skalierbar optimiert werden?

In Kapitel 5 wird aufgezeigt, wie mithilfe des EK über einen Top-down Ansatz auf Basis von BP die Grobplanung von RA optimiert und vereinfacht wird. Die wesentlichen Schritte der EK sind die BP-Auswahl und die Individualisierung der BP (Anpassungskonfiguration) auf Basis von logischem Expertenwissen (Constraints). Die Skalierbarkeit der EK wird im Rahmen einer microservicebasierten Webplattform erreicht. Die Validierung erfolgt über die Implementierung eines Teilprototyps für die MSA sowie über die Webplattform ROBOTOP.

- 2) **Forschungsfrage:** Kann die spätere Nutzbarkeit von EK für verschiedene Zielgruppen bei der Entwicklung berücksichtigt werden?

Auf Basis der in Kapitel 6.2 vorgestellten Methode zur Entwicklung nutzerzentrierter EK und der implementierten Funktionsprototypen werden hierfür drei Lösungsalternativen von EK für verschiedene Zielgruppen aufgezeigt. Die detaillierte Erläuterung der Entwicklungsmethode erfolgt am Anwendungsfall eins, der Unterstützung von Planern eines produzierenden Unternehmens bei der Grobplanung einer RA. Anwendungsfall zwei ist der VR-Vertrieb von RA und Anwendungsfall drei ist die AR-Planung von RA in der realen Produktionsumgebung.

- 3) **Forschungsfrage:** Kann die Wissensbasis von EK modular und wiederverwendbar aufbereitet werden?

Mittels der Methode zur BP-Aufbereitung als modulare Datenbasis für 3D-EK in Kapitel 6.3 und der Methode zur arbeitsteiligen Aufbereitung von logischem Expertenwissen in Kapitel 6.4 werden zwei Ansätze erläutert, wie die Wissensbasis von EK modular und wiederverwendbar aufbereitet werden kann. Die Umsetzung wird anhand von zwei Anwendungsbeispielen aufgezeigt. Die erste Fallstudie basiert auf dem BP 1, dem Beladen und Entladen einer Bearbeitungsmaschine (handhaben). Die Fallstudie 2 basiert auf dem BP 4, dem Montieren von Werkstücken (handhaben und fügen).

- 4) **Forschungsfrage:** Können web- und wissensbasierte EK agil konzipiert und entwickelt werden?

Die agile Konzeption und Entwicklung von web- und wissensbasierten EK erfolgte auf Ebene der Webplattform ROBOTOP in Kapitel 5 über

eine MS-Architektur. Im Rahmen der in Kapitel 6 vorgestellten Methode wird der EK über die drei Teilprototypen der nutzerzentrierten Benutzerschnittstellen, der BP und des logischen EK-Modells konzipiert und entwickelt.

Die Argumentenbilanz in Tabelle 23 zeigt abschließend die Vorteile und Nachteile des EK gegenüber dem klassischen Ansatz (Bottom-up) zur Planung von RA auf. Die EK eignet sich insbesondere für eine schnelle und effiziente Lösungsfindung für Normalfälle auf Basis von BP.

Tabelle 23: Argumentenbilanz zur Gegenüberstellung der Engineering-Konfiguration (Top-down) und dem klassischen Ansatz (Bottom-up) zur Planung von RA

Alternativen	Vorteile	Nachteile
Engineering-Konfiguration (Top-down)	<ul style="list-style-type: none"> + Schnelle, kostengünstige und konsistente Planung durch EK + Lösungsfindung ist weniger abhängig vom Fachwissen des Nutzers + Intuitives Verständnis von Ursache und Wirkung bei der Lösungsfindung durch direkte 3D-Visualisierung + EK ermöglicht neue, skalierbare Geschäftsmodelle für das Engineering + Höhere Datenqualität in Unternehmen mit EK durch formalisierte Best Practices und Constraints 	<ul style="list-style-type: none"> - Sonderfälle und Spezialanwendungen können nur mit hohem Aufwand adressiert werden - Qualität der Ergebnisse ist direkt von der Qualität der Best Practices sowie des Expertenwissens bzw. der Constraints abhängig - Bestehende Geschäftsmodelle werden kannibalisiert - Umfangreicher Entwicklungsaufwand für EK - Best-Practice-Datenbasis und Expertenwissen notwendig, welche initial formalisiert werden müssen
Klassischer Ansatz der Grobplanung (Bottom-up)	<ul style="list-style-type: none"> + Kundenindividuelle Lösung + Sonderfälle und Spezialanwendungen können gelöst werden + Neue innovative Lösungsansätze können gefunden werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Kosten - Lange Bearbeitungszeiten - Hoher Kommunikationsaufwand - Ergebnisqualität ist von der Erfahrung der Experten abhängig - Teure Engineering-Werkzeuge notwendig

7 Zusammenfassung und Ausblick

Wissensbasierte Konfiguratoren entwickeln sich seit mehreren Jahrzehnten zunehmend zu einem wichtigen Instrument der Digitalisierung. Immer mehr Unternehmen besitzen sowohl für interne Mitarbeiter als auch für Kunden zum Teil hochindividualisierte Produktkonfiguratoren. Der Einsatz von Konfiguratoren für das Engineering spielt bislang nur eine untergeordnete Rolle. Dabei besteht insbesondere bei Ansätzen zur Optimierung des Engineerings von roboterzentrierten Automatisierungslösungen (RA) Handlungsbedarf. Hieraus leitet sich die zu beantwortende Forschungsfrage dieser Dissertation ab: „Kann das Engineering von RA vereinfacht und skalierbar optimiert werden?“ Diese Forschungsfrage wird entlang der zwei Hauptkapitel 5 und 6 beantwortet.

In Kapitel 5 wird der generelle Lösungsansatz vorgestellt: der web- und wissensbasierten Engineering-Konfigurator (EK). Um die Skalierbarkeit von EK zu berücksichtigen, werden diese im Kontext von Webplattformen betrachtet. Anhand der Idee eines Webplattformökosystems wird vorgestellt, wie Konfiguratoren und weitere Engineering-Funktionen bzw. -Microservices (MS) in eine MS-basierte Webplattform eingebunden werden können. Eine MS-basierte Softwarearchitektur stellt einen vielversprechenden Lösungsansatz für Endkundenplattformen wie Amazon, Otto, Zalando oder Netflix dar. Hierbei wird die Gesamtfunktionalität einer Webplattform in einzelne Subfunktionalitäten bzw. MS mit definierten Schnittstellen aufgeteilt. Somit können die MS von verschiedenen Teams arbeitsteilig und unabhängig entwickelt werden. Einzelne MS-Anbieter können verschiedene Engineering-MS für Webplattformen bereitstellen. Hierdurch kann ein Webplattformbetreiber auf viele hoch spezialisierte Module bzw. MS zurückgreifen und diese im Kontext einer ganzheitlichen Engineering-Lösung für eine spezifische Zielgruppe zusammenstellen. Beispiele für die Engineering-Funktionen bzw. MS sind Konfiguration, Simulation, 3D-Darstellung oder Datenexport. Die Vorstellung des MS-basierten Lösungsansatzes sowie der MS für das Engineering erfolgt am Beispiel der Webplattform ROBOTOP zur Planung von RA. Insbesondere die Wissensaufbereitung stellt bei der Entwicklung von EK bzw. der Webplattform ROBOTOP die primäre Herausforderung dar.

Um dieses Defizit zu adressieren, wird in Kapitel 6 die Entwicklung von wissensbasierten nutzerzentrierten EK in drei Wissensbereiche ($W_1 - W_3$)

unterteilt, welche als solche arbeitsteilig erstellt werden können: das Wissen über den Anwendungsfall bzw. die Nutzer (W_1), die Best Practices (BP) als fallspezifisches Lösungswissen (W_2) und das generische bzw. logische Expertenwissen (W_3). Diese ermöglichen eine effiziente, skalierbare und agile Entwicklung von EK. Zusätzlich wird eine strukturierte Wiederverwendung der geschaffenen Wissens Elemente ermöglicht.

Im ersten Wissensbereich (Wissen über den Anwendungsfall bzw. die Nutzer (W_1)), wurden nutzerzentrierte Methoden und Konzepte auf die Konfiguratorenentwicklung übertragen. Dabei wird eine Entwicklungsmethode für nutzerzentrierte EK eingeführt und anhand von drei Anwendungsfällen demonstriert. Die detaillierte Vorstellung und Validierung der Methode erfolgt durch einen ersten Anwendungsfall. Die Zielgruppe bzw. Proto-Persona ist ein Planer eines produzierenden mittelständischen Unternehmens. Dieser möchte eine RA für die Fertigung konzeptionieren und beschaffen. Der zweite Anwendungsfall adressiert den VR-unterstützten Vertrieb von RA. Dieser wird auf Basis eines webbasierten Mehrbenutzersystems umgesetzt. Der Funktionsprototyp von Anwendungsfall zwei wird basierend auf dem VR-Hardwaresystem *HTC VIVE Pro* erstellt. Für den Anwendungsfall drei wird die AR-Brille *Hololens 2* verwendet, um die Engineering-Konfiguration im realen Industrieumfeld durchzuführen.

Die Entwicklung des Top-down EK erfordert eine modulare, generische BP-Architektur von RA als wesentliche Datengrundlage (W_2). Eine Modularisierung von BP entlang der 3-Ebenen BP-Architektur kann auf Basis von Prozessmodulen, Komponenten, Layout- und visuellen Gestaltungs- sowie Informationsobjekten erfolgen. Zur Validierung der BP-Entwicklungsmethode wurden insgesamt sechs BP-Szenen (BP 1 - 6) exemplarisch aufbereitet. Die BP können in Kombination mit generischem Engineering-Wissen (z. B. in Form von Constraints) anschließend für die jeweilige Situation im Rahmen einer Anpassungskonfiguration individualisiert werden.

Um die dafür notwendigen Konfigurationsmodelle (W_3) zu erstellen, muss das Expertenwissen extrahiert, vorverarbeitet und verdichtet werden. Für die Erarbeitung des logischen Expertenwissens basierend auf Constraints wird mit der 150% Topologie und den damit verbundenen acht Schritten eine dedizierte Entwicklungsmethode vorgestellt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine strukturierte Aufbereitung sowie Übertragbarkeit von Expertenwissen auf weitere wissensbasierte Projekte.

Die Validierung der Methoden und Konzepte erfolgt im Rahmen von mehreren Teilprototypen sowie einer Gesamtvalidierung entlang der Webplattform ROBOTOP. Im Rahmen des Wissenserwerbs und der Modellierung

wurden die vorgestellten Schritte der BP-Aufbereitung (Kapitel 6.3) sowie der Aufbereitung des logischen Expertenwissens (Kapitel 6.4) durchgeführt. Die Aufbereitung der BP-Szene für den EK erfolgte entlang der vorgeschlagenen Methode, zuerst als 2D-, gefolgt von der 3D-Aufbereitung der BP in *Inventor*. Um diese in einen EK zu überführen, wird in Kapitel 6.5.1 eine Vorgehensweise für die Implementierung von 3D-EK vorgestellt. Zur Validierung des EK sowie der Methode wurden zwei Fallstudien für RA erstellt, in welchen die BP 1 - „Bearbeitungsmaschine beladen und entladen“ (handhaben) sowie BP 4 - „Werkstücke montieren“ (handhaben und fügen) verwendet werden. Als Ergebnis wurde ein EK geschaffen, welches die Planung einer RA auf einfache Weise übernehmen kann. Hierdurch wird die Anwendbarkeit des EK sowie der Entwicklungsmethode nachwiesen.

Zusammenfassend kann der EK auf Basis der drei Wissensbereiche (W_1 – W_3) entwickelt werden. Für eine effektive EK sind hierbei die Wissensbereiche W_2 und W_3 ausreichend, um einen funktionalen und präzisen EK bereitzustellen, siehe Bild 104. Für eine effiziente Aufgabenerfüllung wird ein dediziertes Verständnis des wirtschaftlich relevanten Anwendungsfalls sowie der involvierten Nutzer (W_1) benötigt. Aufbauend auf diesem Nutzerverständnis kann z. B. über eine VR- oder AR-Anwendung die Zufriedenheit der Nutzer gesteigert werden.

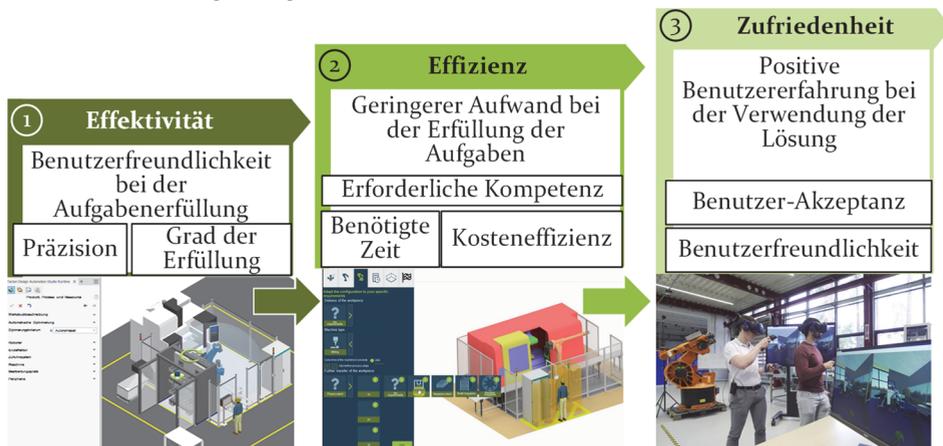


Bild 104: Drei Entwicklungsstufen von EK von der Effektivität bei der Aufgabenerfüllung zur Zufriedenheit der Nutzer [P10]

Um in Zukunft durchgängige Engineeringlösungen und EK auf Basis von MS zu ermöglichen, bedarf es semantisch konsistenter Datenmodelle [188]. Folgendes Zitat aus der deutschen Normungsroadmap Industrie 4.0, verdeutlicht deren Relevanz: „Die auszutauschenden Daten müssen bei der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation und Maschine-zu-Mensch-Kom-

munikation für alle kommunizierenden Partner die gleiche Bedeutung haben. Dies wird erreicht, wenn (1) ein gemeinsames Vokabular verwendet wird, (2) der Kontext bekannt ist, in dem die einzelnen Vokabeln verwendet werden, (3) vereinbarte Bildungsregeln für Sätze für den Nachrichtenaustausch eingehalten werden und (4) die Folge des Austausches der Vokabeln beziehungsweise der Sätze in der beabsichtigten Art und Weise interpretiert werden.“ [147, S. 24] Durch die Fusion disziplinübergreifender Methoden kann eine systematische Entwicklung von semantisch konsistenten Datenmodellen erreicht werden. Hierzu können Methoden und Werkzeuge aus der Prozesswelt wie der *Prozessgesteuerte Ansatz* bzw. *BPMN* [P₄, 8] mit durchgehenden arbeitsteiligen Modellierungsansätzen auf Basis von *AutomationML* [P₃] kombiniert werden. Die Strukturierung und Orchestrierung des Modellierungsprozesses erfolgt hierbei über grafische und ausführbare Prozessmodelle basierend auf *BPMN*. Die Aufbereitung der Datenmodelle erfolgt in dem Datenformat *AutomationML*.

Zusätzlich können die BP sowie logischen Konfigurationsmodelle weiterentwickelt werden. Eine technisch-funktionelle 2D-Darstellung für die weiterführende Aufbereitung von BP ist durch die Anreicherung über das Schnittstellendiagramm aus Kapitel 2.4.4 und mittels Fähigkeiten aus Kapitel 2.4.5 denkbar, siehe Bild 105.

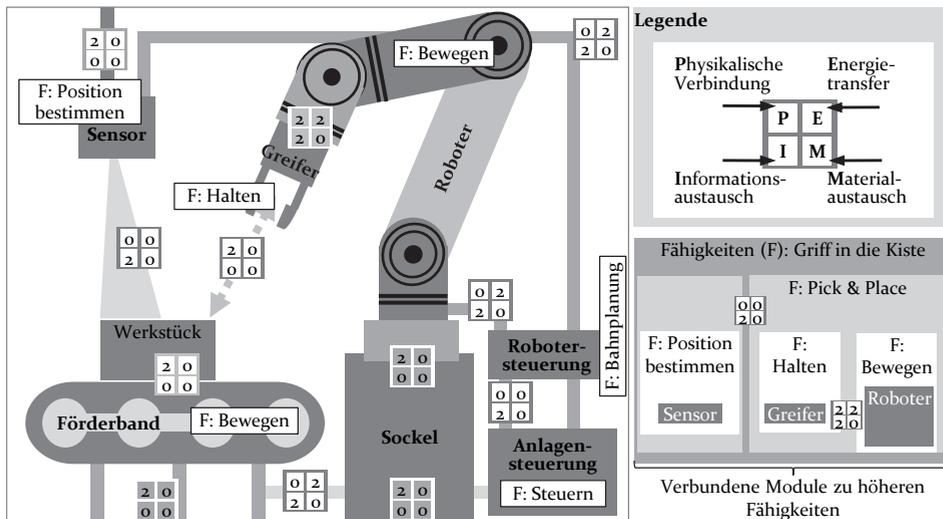


Bild 105: Technisch-funktionelle Aufbereitung von BP mittels Schnittstellendiagramm und des fähigkeitsbasierten Ansatzes für die Detailplanung

Hierauf aufbauend können die Constraints sowie logischen Konfigurationsmodelle von EK im Rahmen von zukünftigen Forschungsprojekten noch generischer entwickelt werden.

8 Summary and outlook

Knowledge-based configurators have increasingly developed into an important instrument of digitization over the past decades. An increasing number of companies utilise highly individualised product configurators for both internal employees and customers. The use of configurators for engineering has played only a minor role so far. There is a particular need for action in approaches to optimise the engineering of robot-centred automation solutions (RA). From this the research question to be answered in this thesis is derived: "Can the engineering of RA be simplified and scalably optimised? This research question is answered along the two main chapters 5 and 6.

In chapter 5 the general approach is presented: the web- and knowledge-based Engineering Configurator (EK). In order to consider the scalability of EK, these are looked at in the context of web platforms. Based on the idea of a web platform ecosystem, it is presented how configurators and other engineering functions or microservices (MS) can be integrated into an MS-based web platform. A MS-based software architecture represents a promising approach for end customer platforms such as Amazon, Otto, Zalando or Netflix. The overall functionality of a web platform is divided into individual sub-functions or MS with defined interfaces. Thus, the MS can be developed independently by different teams with a division of labour. Individual MS providers can cater for different engineering MS for web platforms. This enables a web platform operator to access many highly specialised modules or MS and compose them in the context of a holistic engineering solution for a specific target group. Examples of the engineering functions or MS are configuration, simulation, 3D visualisation or data export. The presentation of the MS-based solution as well as the MS for engineering is based on the example of the web platform ROBOTOP for planning. In particular, the processing of knowledge represents the RA primary challenge in the development of EK or the ROBOTOP web platform.

In order to overcome this deficit, chapter 6 divides the development of knowledge-based, user-centred EK into three areas of knowledge ($W_1 - W_3$), which can be elaborated in a division of labour: knowledge about the case or users (W_1), Best Practices (BP) as case-specific solution knowledge (W_2) and generic or logical expert knowledge (W_3). These allow for an efficient, scalable and agile development of EK. In addition, a structured reuse of the created knowledge elements is enabled.

In the first area of knowledge (knowledge about use cases or the users (W_1)), user-centred methods and concepts were transferred to configurator development. A development method for user-centred EK is introduced and implemented on the basis of three use cases. The detailed presentation and validation of the method is provided by a primary use case. The target group or proto-persona is a planner of a medium-sized manufacturing company. He wants to design and procure an RA for the production. The second use case addresses the VR-supported distribution of RA. This is implemented on the basis of a web-based multi-user system. The functional prototype of use case two is created based on the VR hardware system HTC VIVE Pro. For use case three, the AR glasses Hololens 2 will be used to perform the engineering configuration in a real industrial environment.

The development of the top-down EK requires a modular, generic architecture of BP from RA as the essential data basis (W_2). A modularisation of BP along the 3-level BP-architecture can be done based on process modules, components, layout, visual design and information objects. To validate the BP development method, a total of six BP scenes (BP 1 - 6) were prepared as examples. In combination with generic engineering knowledge (e.g. in the form of constraints), the BP can then be individualised for the respective situation within the framework of an adaptation configuration.

In order to create the necessary configuration models (W_3), the expert knowledge must be extracted, pre-processed and condensed. A dedicated development method is presented for the development of the logical expert knowledge based on constraints with the 150% topology and the associated eight steps. This procedure enables a structured processing as well as transferability of expert knowledge to further knowledge-based projects.

The validation of the methods and concepts is achieved within the framework of several partial prototypes as well as an overall validation along the web platform ROBOTOP. Within the framework of knowledge acquisition and modelling, the steps presented were carried out for BP preparation (chapter 6.3) and the processing of the logical expert knowledge (chapter 6.4). The preparation of the BP scene for the EK was attained along the proposed method, first as 2D, followed by the 3D preparation of the BP in *Inventor*. In order to transfer these into an EK, a procedure for implementing 3D EK is presented in chapter 6.5.1. To validate the EK and the method, two case studies were prepared for RA, in which BP 1 - "Machine tool loading and unloading" (handling) and BP 4 - "Work piece assembly" (handling

and joining) are used. As a result an EK was created which can easily execute the planning of an RA. This proves the applicability of the EK and the development method.

In summary, the EK can be developed on the basis of the three areas of knowledge ($W_1 - W_3$). For an effective EK, the knowledge areas W_2 and W_3 are sufficient to provide a functional and precise EK, see figure 106. For efficient task fulfilment, a dedicated understanding of the economically relevant application and the users involved (W_1) is required. Based on this user understanding, the satisfaction of the users can be increased, e.g. through VR or AR applications.

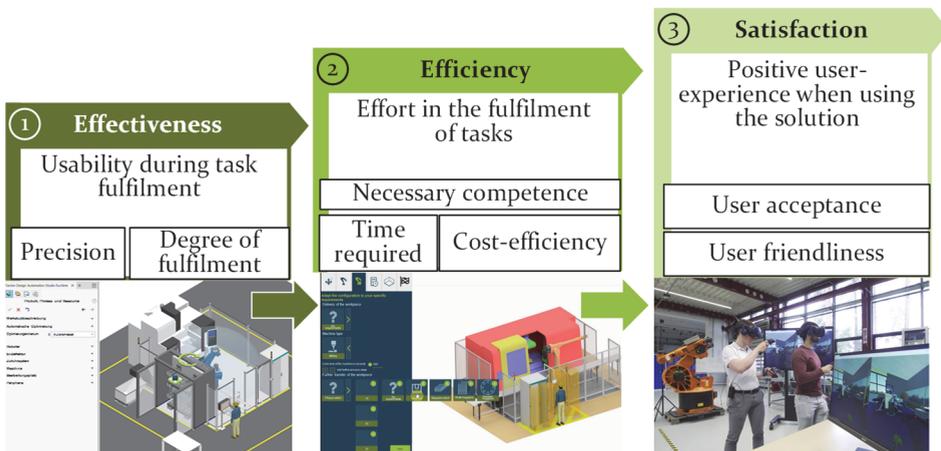


Bild 106: Three development stages of EK from effectiveness in task fulfilment to user satisfaction [P10]

Semantically consistent data models are required to enable consistent engineering solutions and EK on the basis of MS [188]. The following quotation from the German Industry 4.0 standardisation roadmap illustrates its relevance: The data to be exchanged must have the same meaning for all communicating partners in machine-to-machine communication and machine-to-human communication. This is achieved if (1) a common vocabulary is used, (2) the context in which the individual words are used is known, (3) agreed rules of formation of sentences for the exchange of messages are followed and (4) the consequences of the exchange of the words or sentences is interpreted in the intended way. [147]

The fusion of cross-disciplinary methods can achieve a systematic development of semantically consistent data models. For this purpose, methods and tools from the process world such as the process-controlled approach or BPMN [P4, 8] can be combined with continuous modelling approaches

based on AutomationML [P3]. The structuring and orchestration of the modelling process is achieved by graphical and executable process models based on BPMN. The preparation of the data models is conducted in the data format AutomationML.

In addition, the BP and logical configuration models can be further developed. A technical-functional 2D representation for the further preparation of BP is conceivable through enrichment via the interface diagram from chapter 2.4.4 and by means of capabilities from chapter 2.4.5, see figure 107.

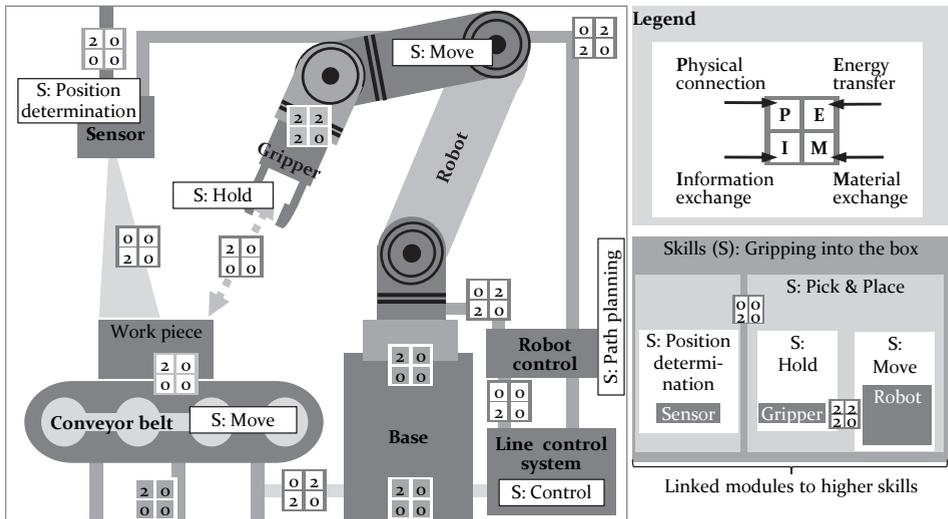


Bild 107: Technical-functional preparation of BP by using an interface diagram and the capability-based approach for detailed planning

Based on this, EK constraints and logical configuration models can be developed even more generically in future research projects.

9 Anhang

9.1 Danksagung und Einordnung

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen des Forschungsprojektes ROBOTOP - „Modulare, offene und internetbasierte Plattform für Roboter-Anwendungen in Industrie und Service“ entstanden. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt ROBOTOP wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Es ist Teil des Technologieprogramms „PAiCE Digitale Technologien für die Wirtschaft“ und wird vom DLR-Projektträger „Informationstechnologien / Elektromobilität“ aus Köln geleitet. Im Rahmen der Forschungstätigkeit von ROBOTOP entstand mit drei Universitäten und vier Industriepartnern eine hervorragende Arbeitsgemeinschaft, siehe Bild 108. Daher möchte ich mich sowohl bei dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie bedanken, welches das Forschungsprojekt ROBOTOP ideell und finanziell gefördert hat als auch bei dem ROBOTOP Projektkonsortium für die gute Zusammenarbeit und den ausgezeichneten fachlichen und wissenschaftlichen Austausch.

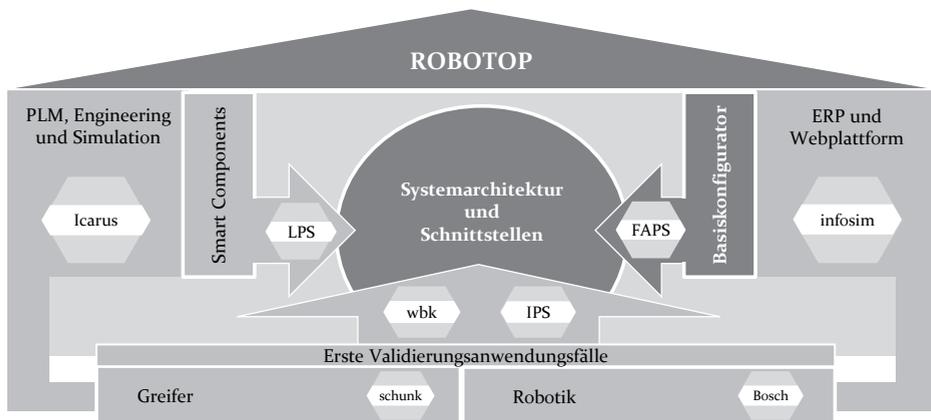


Bild 108: Einordnung der eigenen Forschungsaktivität entlang von ROBOTOP; erstelltes Design durch SCHÄFFER für das ROBOTOP Konsortium

Der Schwerpunkt der eigenen Forschungstätigkeit liegt auf der Systemarchitektur zur Kondensation des Gesamtbildes und auf der Konfiguration als Spezialthema. Parallel hierzu erfolgte ein projektübergreifender Wissenstransfer mit den weiteren 16 Forschungsprojekten des PAiCE Programms. Der Austausch wurde durch die Begleitforschung des VDI/VDE Innovation + Technik GmbH koordiniert. Daneben sind eine große Anzahl von Abschlussarbeiten in der Forschung und Industrie entstanden, welche

weitere, relevante Einblicke in aktuelle Herausforderungen, Denkweisen und Lösungsansätze der industriellen Forschung aufzeigen.

In Tabelle 24 sind die Projektpartner des Forschungsprojekts ROBOTOP zusammengefasst bzw. aufgeführt.

Tabelle 24: Übersicht über die Projektpartner des Forschungsprojekts ROBOTOP im Rahmen des Technologieprogramms PAiCE

Nr.	Projektpartner des Forschungsprojekts ROBOTOP
1.	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS - www.fau.de) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU - www.faps.fau.de)
2.	ICARUS Consulting GmbH (Icarus - www.icarus-consult.de)
3.	Infosim GmbH & Co. KG (infosim - www.infosim.net)
4.	Institut für Produktionstechnik (wbk - www.wbk.kit.edu) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT - www.kit.edu)
5.	Robert Bosch GmbH (Bosch - www.bosch.de)
6.	Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS - www.lps.ruhr-uni-bochum.de) der Ruhr-Universität Bochum (www.ruhr-uni-bochum.de)
7.	SCHUNK GmbH & Co. KG Spann- und Greiftechnik (schunk - www.schunk.com)
8.	Institut für Produktionssysteme (IPS - www.ips.tu-dortmund.de) der Technischen Universität Dortmund (IPS - www.tu-dortmund.de)

9.2 Weitere Veröffentlichungen

In Tabelle 25 sind die übrigen (in der Arbeit nicht zitierten) Veröffentlichungen, an denen der Autor beteiligt ist und die mit der Lehrstuhl­­tätigkeit, der Promotion und dem Forschungsvorhaben zusammenhängen, aufgeführt. Dies folgt den Empfehlungen des Fakultätentags EI vom 24.10.2014, siehe: http://www.ftei.de/docs_ftei/ftei_docs_2014/Empfehlung_Zitieren-Dissertation-Final24102014.pdf

Tabelle 25: Übersicht über weitere Veröffentlichungen im Rahmen der Lehrstuhl­­tätigkeit

Nr.	Weitere Veröffentlichungen im Rahmen der Lehrstuhl­­tätigkeit	Quelle
1.	Human-In-The-Loop"- Virtual Commissioning of Human-Robot Collaboration Systems	[P18]
2.	Prozesssimulation	[P19]
3.	Towards a Knowledge-Based Design Methodology for Managing the Complexity in the Integrated Product and Process Development of Electric Motors	[P20]
4.	Advances in energy-related plant simulation by considering load and temperature profiles in discrete event simulation	[P21]
6.	Complexity of Configurators Relative to Types of Outputs	[P22]

Literaturverzeichnis

- [1] KOCH, M. *Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 1994. München: Hanser, 1995. Fertigungstechnik - Erlangen. 41. ISBN 3446181741.
- [2] REINEMA, C., A. POMPE und P. NYHUIS. *Agiles Projektmanagement* [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2013, **108**(3), S. 113-117. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.110903.
- [3] VOET, H.A. *Baukastensysteme für die Fabrikplanung in kleinen und mittleren Unternehmen*. Dissertation. Aachen: Apprimus Verlag, 2018. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. 2018, Band 12. ISBN 978-3-86359-605-7.
- [4] HEINSOHN, J. und R. SOCHER. *Wissensverarbeitung. Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl., 1999. Spektrum-Hochschultaschenbuch. ISBN 3-8274-0308-1.
- [5] KOTHA, S. *Competing on the Internet: The Case of Amazon.com* [online]. *European Management Journal*, 1998, **16**(2), S. 212-222. ISSN 02632373. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0263-2373(97)00089-3.
- [6] PFEIFFER, W., E. WEIß und T. VOLZ. *Funktionalmarkt-Konzept zum strategischen Management prinzipieller technologischer Innovationen*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1997. Innovative Unternehmensführung. 28. ISBN 3525125771.
- [7] GLADEN, W. *Performance Measurement. Controlling mit Kennzahlen*. 6th ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer, 2014. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-658-05138-9.
- [8] STIEHL, V., M. DANEI, J. ELLIOTT und M. HEILER. *Effectively and Efficiently Implementing Complex Business Processes: A Case Study*. In: D. LÜBKE und C. PAUTASSO, Hg. *Empirical Studies on the Development of Executable Business Processes*.: SPRINGER NATURE, 2019, S. 33-57. ISBN 978-3-030-17665-5.

- [9] SCHUH, G. und M. RIESENER, Hg. *Produktkomplexität managen. Strategien - Methoden - Tools*. 3., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2017. ISBN 978-3-446-45334-0.
- [10] WILLIAMS, K., C. HASLAM, J. WILLIAMS, A. ADCROFT und S. JOHAL. The Myth of the Line: Ford's Production of the Model T at Highland Park, 1909–16 [online]. *Business History*, 1993, **35**(3), S. 66-87. ISSN 0007-6791. Verfügbar unter: doi:10.1080/00076799300000087.
- [11] FELFERNIG, A., L. HOTZ, C. BAGLEY und J. TIHONEN. *Knowledge-based configuration. From research to business cases*. Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2014. ISBN 978-0-12-415869-6.
- [12] LOTTER, B. und H.-P. WIENDAHL. *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*. 2. Aufl. 2013. Berlin: Springer, 2012. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-29060-2.
- [13] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, FORSCHUNGSPROJEKTE und VDI/VDE INNOVATION + TECHNIK GMBH. *Digitale Technologien für die Wirtschaft. (PAiCE)*. Berlin, 10. Januar 2018.
- [14] FELFERNIG, A., G. FRIEDRICH und D. JANNACH. Intelligente Produktkonfiguratoren als Voraussetzung für maßgeschneiderte Massenprodukte [online]. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 1999, **116**(3), S. 201-207. ISSN 0932-383X. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF03159041.
- [15] BOGNER, E. *Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung*. Erlangen: FAU University Press, 2019. FAU Studien aus dem Maschinenbau. 332. ISBN 978-3-96147-246-8.
- [16] HERRMANN, A. und C. KAISER. Produktkonfiguration online [online]. Was für Kunden nutzen dieses Medium? *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 2007, **36**(3), S. 125-131. ISSN 03401650. Verfügbar unter: doi:10.15358/0340-1650-2007-3-125.
- [17] PINE, B.J., II, B. VICTOR und A.C. BOYNTON. Making Mass Customization Work [online]. *Harvard Business Review*, 1993, **1993**(September Oktober 1993), S. 108-119. Verfügbar unter: <https://hbr.org/1993/09/making-mass-customization-work>.

- [18] FLEISCHANDERL, G., G.E. FRIEDRICH, A. HASELBÖCK, H. SCHREINER und M. STUMPTNER. Configuring large systems using generative constraint satisfaction [online]. *IEEE Intelligent Systems*, 1998, 13(4), S. 59-68. Verfügbar unter: doi:10.1109/5254.708434.
- [19] HELMKE, S. *Effektives Customer Relationship Management. Instrumente - Einführungskonzepte - Organisation*. 5., überarb. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer, 2013. ISBN 978-3-8349-4175-6.
- [20] WACKENHUT, R. und M. RÖSSLE. Konzeption eines Produktkonfigurators im Werkzeugbau. Dargestellt für spanabhebende Werkzeuge zur Bohrungsfinebearbeitung. *Productivity Management*, 2014, (19), S. 27-30.
- [21] FELDMANN, K., V. SCHÖPPNER und G. SPUR, Hg. *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser, 2014. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. / hrsg. von Günter Spur; 5. ISBN 9783446436565.
- [22] WESTKÄMPER, E., D. SPATH, C. CONSTANTINESCU und J. LENTES, Hg. *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 9783642202582.
- [23] RIMPAU, C. und G. REINHART. Knowledge-based risk evaluation during the offer calculation of customised products [online]. *Production Engineering*, 2010, 4(5), S. 515-524. ISSN 0944-6524. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11740-010-0231-8.
- [24] KLEIN, P.W. *Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen*. Dissertation. Siegen, 03/2015.
- [25] Verein deutscher Ingenieure; Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. 3694: 2014-04, VDI/VDE 3694 - *Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen*: Beuth Verlag GmbH [Zugriff am: 15. Juli 2019].
- [26] FRANKE, J. und J. GÖTZ. Vernetzung für effiziente Anlagenplanung [online]. *chemie&more*, 2014, (2), S. 11-14. Verfügbar unter: <http://www.chemieundmore.com/archive/708510/Vernetzung-fuer-effiziente-Anlagenplanung.html>.
- [27] WALTER, A. *Leitfaden zur Erstellung eines unternehmensspezifischen PLM-Konzeptes*. *Product lifecycle*

- Management; transparente Prozesse und konsistente Informationen im Produktlebenszyklus*. Frankfurt, M.: VDMA-Verl., 2008. Informatik. ISBN 978-3-8163-0553-8.
- [28] Verein deutscher Ingenieure. 2206: 2004-06, *VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*: Beuth Verlag GmbH [Zugriff am: 8. November 2018].
- [29] FRANK, G. *Durchgängiges mechatronisches Engineering für Sondermaschinen*. Dissertation. Stuttgart, 05/ 2015. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Band 48. ISBN 9783839609682.
- [30] Deutsches Institut für Normung e. V. 16290: 2016, *Raumfahrtssysteme – Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien*: Beuth Verlag GmbH [Zugriff am: 14. Juli 2019].
- [31] GRUNDIG, C.-G. *Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. 6., neu bearbeitete Auflage. München, 2018. ISBN 978-3-446-45401-9.
- [32] LACOUR, F.-F. *Modellbildung für die physikbasierte virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2011. München: Utz, 2012. Forschungsberichte / IWB. 257. ISBN 978-3-8316-4162-8.
- [33] REINHART, G., A. MAGAÑA FLORES und C. ZWICKER. *Industrieroboter. Planung, Integration, Trends. Ein Leitfaden für die KMU*. Würzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG; Preselect media, 2018. ISBN 978-3-8343-3401-5.
- [34] HOFSTEDT, P. Constraints. In: G. GÖRZ, J. SCHNEEBERGER und U. SCHMID, Hg. *Handbuch der künstlichen Intelligenz*. 5., überarb. und aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg, 2014, S. 205-233. ISBN 978-3-486-71307-7.
- [35] Verein deutscher Ingenieure. 2860: 1990-05, *VDI 2860 - Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*: Beuth Verlag GmbH.
- [36] HESSE, S. und V. MALISA, Hg. *Taschenbuch Robotik, Montage, Handhabung. Mit 34 Tabellen*. 2., neu bearbeitete Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN 9783446443655.

- [37] DÖRNER, H. *Modelle für das wissensbasierte Konfigurieren*. Habilitationsschrift. Halle (Saale), 01 / 1991.
- [38] Deutsches Institut für Normung e. V. 820-3: 06.2014, *Normungsarbeit – Teil 3: Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH [Zugriff am: 16. Dezember 2018].
- [39] PINE, B.J. *Maßgeschneiderte Massenfertigung. Neue Dimensionen im Wettbewerb*. Wien: Wirtschaftsverl. Ueberreuter, 1994. Manager-Magazin-Edition. ISBN 3901260668.
- [40] FELDHUSEN, J. und K.-H. GROTE, Hg. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2013. ISBN 9783642295683.
- [41] KESPER, H. *Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden*. Dissertation. München, 2012.
- [42] KAISER, L. *Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme*. Dissertation, 2013.
- [43] PUPPE, F. *Einführung in Expertensysteme*. Zweite Auflage. Berlin: Springer, 1991. Studienreihe Informatik. ISBN 3-540-54023-7.
- [44] FELDMANN, K., T. SCHMUCK, M. BROSSOG und J. DREYER. Beschreibungsmodell zur Planung von Produktionssystemen [online]. Entwicklung eines Beschreibungsmodells für Produkte, Prozesse und Ressourcen zur rechnergestützten Planung produktionstechnischer Systeme. *wt-online*, 2008, **98**(3), S. 156-162. Verfügbar unter: https://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data%5barticle_id%5d=40870&keep_alive=yes&pos.
- [45] RÜEGG-STÜRM, J. und S. GRAND. *Das St. Galler Management-Modell. 4. Generation - Einführung*. Bern: Haupt, 2014. ISBN 978-3-258-07839-7.
- [46] DUNGERN, O. von. Übergreifende Konzeption von Geräten für die Gebäudeautomation – Methodik und Management. In: M. MAURER, S.-O. SCHULZE und J. ABULAWI, Hg. *Tag des Systems Engineering. Bremen, 12. - 14. November 2014 ; [TdSE]*. München: Hanser, 2015, S. 257-266. ISBN 978-3-446-44376-1.
- [47] ALT, O. *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML*. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2012. ISBN 978-3-446-43066-2.

- [48] STEINWASSER, P. *Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung*. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996. Bamberg: Meisenbach, 1996. Fertigungstechnik - Erlangen. 63. ISBN 978-3-87525-084-8.
- [49] RUDOLF, H. *Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2006. München: Utz, 2007. Forschungsberichte IWB. 204. ISBN 978-3-8316-0697-9.
- [50] CHANG, S.-H., W.-L. LEE und R.-K. LI. Manufacturing bill-of-material planning [online]. *Production Planning & Control*, 1997, **8**(5), S. 437-450. ISSN 0953-7287. Verfügbar unter: doi:10.1080/095372897235019.
- [51] WATTS, F.B. *Engineering documentation control handbook. Configuration management and product lifecycle management*. 4. ed. Oxford: William Andrew, 2012. ISBN 9781455778607.
- [52] LÜDER, A., L.H.M. FOEHR, T. WAGNER, J.-J. ZADDACH und T. HOLM. Manufacturing system engineering with mechatronical units. In: *2010 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)*. Bilbao, Spain, 13 - 16 September 2010. Piscataway, NJ: IEEE, 2010, S. 1-8. ISBN 978-1-4244-6850-8.
- [53] HELBIG, T.B. *Methode zur Verbesserung der domänenübergreifenden Zusammenarbeit während des Engineering-Prozesses im Sondermaschinenbau*. Aachen: Shaker, 2017. Berichte aus dem Maschinenbau. ISBN 978-3-8440-5097-4.
- [54] PIMMLER, T.U. und S.D. EPPINGER, Hg. *Integration analysis of product decompositions*: Alfred P. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [55] HELBIG, T., S. ERLER, E. WESTKÄMPER und J. HOOS. Modelling Dependencies to Improve the Cross-domain Collaboration in the Engineering Process of Special Purpose Machinery [online]. *Procedia CIRP*, 2016, **41**, S. 393-398. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.12.123.
- [56] WITSCHEL, D., A. DÖHLA, M. KAISER, K.-I. VOIGT und T. PFLETSCHINGER. Riding on the wave of digitization: insights how and under what settings dynamic capabilities facilitate digital-driven business model change [online]. *Journal of*

- Business Economics*, 2019, **89**(8-9), S. 1023-1095. ISSN 0044-2372. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11573-019-00950-5.
- [57] ENSINGE, A., P. FISCHER, F. FRÜH, V. HALSTENBACH und C. HÜSING. *Digitale Prozesse. Begriffsabgrenzung und thematische Einordnung*, 2016.
- [58] SCHEELE, S. und F. MANTWILL. Produktdaten-Apps zur Erweiterung der Lifecycle Produktivität [online]. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 2019, **56**(2), S. 438-452. ISSN 1436-3011. Verfügbar unter: doi:10.1365/s40702-019-00512-x.
- [59] VENGHAUS, E. und R. STARK. Understanding PLM and PLM Customizing: A Theoretical Fundament for a Conceptual Approach. In: P. CHIABERT, A. BOURAS, F. NOËL und J. RÍOS, Hg. *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 670-680. ISBN 978-3-030-01613-5.
- [60] STROHMEIER, O. *Integration von Wissensmodulen in den virtuellen Produktentwicklungsprozess*. Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2006. Aachen: Shaker, 2006. Berichte aus der Konstruktionstechnik. ISBN 9783832251284.
- [61] HARRICH, A. *CAD-basierte Methoden zur Unterstützung der Karosseriekonstruktion in der Konzeptphase*. Dissertation. Monographic Series TU Graz. 4. ISBN 9783851254204.
- [62] GHIYA, P. *TypeScript Microservices. Build, deploy, and secure Microservices using TypeScript combined with Node.js*. Birmingham: Packt Publishing, 2018. ISBN 9781788836852.
- [63] MAO, J.-Y., K. VREDENBURG, P.W. SMITH und T. CAREY. The state of user-centered design practice. *COMMUNICATIONS OF THE ACM*, 2005, (Vol. 48, No. 3), S. 105-109.
- [64] CSIK, M. *Muster und das Generieren von Ideen für Geschäftsmodellinnovationen*, 2014. 4263.
- [65] SCHRAUDER, S., A. KOCK, C.V. BACCARELLA und K.-I. VOIGT. Takin' Care of Business Models: The Impact of Business Model Evaluation on Front-End Success [online]. *Journal of Product Innovation Management*, 2018, **35**(3), S. 410-426. ISSN 0737-6782. Verfügbar unter: doi:10.1111/jpim.12411.

- [66] PHAAL, R., L. SIMONSE und E.D. OUDEN. Next generation roadmapping for innovation planning [online]. *International Journal of Technology Intelligence and Planning*, 2008, 4(2), S. 135. ISSN 1740-2832. Verfügbar unter: doi:10.1504/IJTIP.2008.018313.
- [67] WIT, B.d. *Strategy synthesis. For leaders*. Fifth edition, 2017. ISBN 9781473725188.
- [68] WIT, B.d. und R. MEYER. *Strategy. An international perspective*. 5. ed. Andover: Cengage Learning EMEA, 2014. ISBN 978-1-4080-8267-6.
- [69] MOORE, G.A. *Dealing with Darwin. How great companies innovate at every phase of their evolution*. New York: Portfolio, 2008. ISBN 978-1591842149.
- [70] LECHLER, T., E. FISCHER, M. METZNER, A. MAYR und J. FRANKE. Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems [online]. *Procedia CIRP*, 2019, 81, S. 1125-1130. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2019.03.278.
- [71] BENNETT, N. und J. LEMOINE. What a Difference a Word Makes: Understanding Threats to Performance in a VUCA World [online]. *Business Horizons*, 2014, (57), S. 311-317. Verfügbar unter: doi:10.2139/ssrn.2406676.
- [72] LIVESEY, P.V. Insights of project managers into the problems in project management [online]. *Construction Economics and Building*, 2016, 16(1), S. 90-103. Verfügbar unter: doi:10.5130/AJCEB.v16i1.4600.
- [73] GASSMANN, O., K. FRANKENBERGER und M. CSIK. *Geschäftsmodelle entwickeln. 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2017. ISBN 978-3-446-45284-8.
- [74] MANYIKA, J., M. CHUI, M. MIREMADI, J. BUGHIN, K. GEORGE, P. WILLMOTT und M. DEWHURST. *Harnessing automation for a future that works*, 01/2017.
- [75] DENGLER, K. und B. MATTHES. *Folgen der Digitalisierung für die Arbeitswelt. Substituierbarkeitspotenziale von Berufen in Deutschland*, 12/2015.

- [76] CLARK, K.B. und T. FUJIMOTO. *Product development performance. Strategy, organization, and management in the world auto industry*. Boston, Mass.: Harvard Business School Press, 1991. ISBN 0-87584-245-3.
- [77] HENTSCHEL, C. *TRIZ. Innovation mit System*. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2010. ISBN 978-3-446-42333-6.
- [78] Verein deutscher Ingenieure. 4521: 2016, *VDI 4521 - Erfinderisches Problemlösen mit TRIZ Grundlagen und Begriffe*: Beuth Verlag GmbH.
- [79] LIEBISCH, M. *Aspektorientierte Datenhaltung in Produktkonfiguratoren - Anforderungen, Konzepte und Realisierung*. Dissertation. Jena, 04/2014.
- [80] GADATSCH, A. *Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Analyse, Modellierung, Optimierung und Controlling von Prozessen*. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN 978-3-658-17178-0.
- [81] FREUND, J. und B. RÜCKER. *Real-life BPMN. Using BPMN 2.0 to analyze, improve and automate processes in your company*. Lakewood, Colo.: Camunda, 2012. ISBN 978-1480034983.
- [82] GRANLUND, Å., D. LAFRENIÈRE und D.A. CARR. A pattern-supported approach to the user interface design process. In: L. ERLBAUM, Hg. *International Conference on Human-Computer Interaction // Usability evaluation and interface design. Cognitive engineering, intelligent agents and virtual reality*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2001, S. 282-286. ISBN 0-8058-3607-1.
- [83] SCHOENEBERG, K.-P., Hg. *Komplexitätsmanagement in Unternehmen. Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014. ISBN 978-3-658-01283-0.
- [84] STARKE, G. *Effektive Softwarearchitekturen. Ein praktischer Leitfaden*. 8., überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2018. ISBN 978-3-446-45207-7.
- [85] VOGEL, O., I. ARNOLD, A. CHUGHTAI, E. IHLER, T. KEHRER, U. MEHLIG und U. ZDUN. *Software-Architektur. Grundlagen - Konzepte - Praxis*. 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2009. ISBN 978-3-8274-2267-5.

- [86] ROYCE, W.W. Managing the Development of Large Software Systems. *Proceedings IEEE WESCON*, 1970, S. 1-9.
- [87] HASSELBRING, W. Software-Architektur [online]. *Informatik-Spektrum*, 2006, **29**(1), S. 48-52. ISSN 0170-6012. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00287-005-0049-5.
- [88] KRUCHTEN, P.B. The 4+1 View Model of architecture [online]. *IEEE Software*, 1995, **12**(6), S. 42-50. ISSN 07407459. Verfügbar unter: doi:10.1109/52.469759.
- [89] SOFTWARE ENGINEERING STANDARDS COMMITTEE, Hg. *IEEE recommended practice for architectural description of software-intensive systems*. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000. ISBN 0-7381-2518-0.
- [90] WOLFF, E. *Microservices. Grundlagen flexibler Softwarearchitekturen*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2016. ISBN 9783864903137.
- [91] SCHOLL, B., T. SWANSON und D. FERNANDEZ. *Microservices with Docker on Microsoft Azure*. Boston: Addison-Wesley, 2016. Addison-Wesley Microsoft technology series. ISBN 9780672337499.
- [92] NEWMAN, S. *Microservices. Konzeption und Design*. Frechen: mitp, 2015. ISBN 9783958450813.
- [93] CERNY, T., M.J. DONAHOO und J. PECHANEC. Disambiguation and Comparison of SOA, Microservices and Self-Contained Systems [online]. *Applied Computing Review*, 2017, S. 228-235. Verfügbar unter: doi:10.1145/3129676.3129682.
- [94] DRAGONI, N., I. LANESE, S.T. LARSEN, M. MAZZARA, R. MUSTAFIN und L. SAFINA. Microservices: How To Make Your Application Scale [online]. *International Andrei Ershov Memorial Conference on Perspectives of System Informatics*, 2017, S. 95-104. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-319-74313-4_8.
- [95] FAMILIAR, B. *Microservices, IoT, and Azure. Leveraging DevOps and Microservice Architecture to Deliver SaaS Solutions*. Berkeley: Apress, 2015. ISBN 978-1-4842-1275-2.
- [96] KALSKE, M., N. MÄKITALO und T. MIKKONEN. Challenges When Moving from Monolith to Microservice Architecture

- [online]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, (10544), S. 32-47. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-319-74433-9_3.
- [97] NEWMAN, S. *Monolith to microservices. Evolutionary patterns to transform your monolith*. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc, 2020. ISBN 9781492047810.
- [98] VILLAMIZAR, M., O. GARCES, H. CASTRO, M. VERANO, L. SALAMANCA, R. CASALLAS und S. GIL. Evaluating the monolithic and the microservice architecture pattern to deploy web applications in the cloud [online]. *10th Computing Colombian Conference (NJ, IEEE)*, 2015, S. 583-590. Verfügbar unter: doi:10.1109/columbiancc.2015.7333476.
- [99] WALKER, R. The Guts of a New Machine. *The New York Times*, NOV. 30, 2003.
- [100] BILGRAM, V., A. BREM und K.-I. VOIGT. User-centric innovations in new product development — systematic identification of lead users harnessing interactive and collaborative on-line-tools [online]. *International Journal of Innovation Management*, 2008, 12(03), S. 419-458. ISSN 1363-9196. Verfügbar unter: doi:10.1142/S1363919608002096.
- [101] NIELSEN, J. *Usability Engineering*. Burlington: Elsevier Science, 1993. Interactive Technologies. ISBN 9780080520292.
- [102] Internationale Organisation für Normung: 1998, *ISO 9241-11: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs)*.
- [103] Deutsches Institut für Normung e. V. 9241-110: 2006, *ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*: Beuth Verlag GmbH.
- [104] VOIGT, K.-I., C. BACCARELLA, A. WASSMUS und O. MEIßNER. The Effects of Customer Orientation on the Product Performance of Technological Innovations: A Comparison between SMEs and Large Companies. In: D.F. KOCAOGLU, Hg. *Proceedings of PICMET '11: technology management in the energy smart world (PICMET)*, 2011. July 31 2011 - Aug. 4 2011, Portland, OR, USA. Piscataway, NJ: IEEE, 2011. ISBN 978-1-890843-23-6.
- [105] AGHINA, W., C. HANDSCOMB, J. LUDOLPH, D. WEST und A. YIP. *McKinsey Global Institute: How to select and develop*

- individuals for successful agile teams* [online]. *A practical guide*, 2018.
- [106] ANWAR, S., Y.H. MOTLA, Y. SIDDIQ, S. ASGHAR, M.S. HASSAN und Z.I. KHAN. User-Centered Design Practices in Serum Development Process: A Distinctive Advantage? In: H. RASHEED, Hg. *2014 IEEE 17th International Multi-Topic Conference (INMIC). 8 - 10 Dec. 2014, Bahria University Karachi Campus, Pakistan*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014, S. 161-166. ISBN 978-1-4799-5754-5.
- [107] Deutsches Institut für Normung e. V. 9241-210: 2010, *ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 2 Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*: Beuth Verlag GmbH.
- [108] BIAS, R.G. und C.-M. KARAT. Justifying Cost-Justifying Usability. In: R.G. BIAS und D.J. MAYHEW, Hg. *Cost-justifying usability*. Boston: Academic Press, 1994. ISBN 0-12-095810-4.
- [109] SCHREIBER, G. *Knowledge engineering and management. The CommonKADS methodology*. 3. printing. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2002. ISBN 0262193000.
- [110] BACH, J. *The Ghost in the Machine. An Artificial Intelligence Perspective on the Soul*. Leipzig, 28. Dezember 2019. 35C3
- [111] STYCZYNSKI, Z.A., K. RUDION und A. NAUMANN. *Einführung in Expertensysteme. Grundlagen, Anwendungen und Beispiele aus der elektrischen Energieversorgung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-662-53171-6.
- [112] BLOOM, B.S. *Taxonomy of educational objectives. The classification of educational goals*. New York: McKay; Longman, 1956. ISBN 978-0582280106.
- [113] BLOOM, B.S. *Taxonomy of educational objectives. The classification of educational goals*. New impr. London: Longman, 1979. ISBN 9780582323865.
- [114] DREYFUS, H.L. und S.E. DREYFUS. *Mind over machine. The power of human intuition and expertise in the era of the computer*. New York: Free Press, 1986. ISBN 978-0029080610.

- [115] HAYES-ROTH, F., Hg. *Building expert systems*. London: Addison-Wesley, 1983. Teknowledge series in knowledge engineering. 1. ISBN 0-201-10686-8.
- [116] DEMING, W.E. *The new economics. For industry, government, education*. 2nd ed. Cambridge, Mass: MIT Press, 2000. ISBN 978-0262541169.
- [117] VREDENBURG, K., S. ISENSEE und C. RIGHI. *User-centered design. An integrated approach*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2002. Software Quality Institute series. ISBN 0-13-091295-6.
- [118] BORGELT, C., C. BRAUNE, H. TIMM und R. KRUSE. Unsicheres und vages Wissen. In: G. GÖRZ, J. SCHNEEBERGER und U. SCHMID, Hg. *Handbuch der künstlichen Intelligenz*. 5., überarb. und aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg, 2014, S. 235-295. ISBN 978-3-486-71307-7.
- [119] CHANDRASEKARAN, B. Design Problem Solving: A Task Analysis [online]. *AI Magazine*, 1990, (4), S. 59-71 [Zugriff am: 7. Januar 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1609/aimag.v11i4.857.
- [120] HARTMANN, D. und K. LEHNER, Hg. *Technische Expertensysteme. Grundlagen, Programmiersprachen, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990. ISBN 978-3-540-52155-6.
- [121] PUPPE, F. *Problemlösungsmethoden in Expertensystemen*. Berlin: Springer, 1990. Studienreihe Informatik. ISBN 3540532315.
- [122] BRINKOP, A. *Variantenkonstruktion durch Auswertung der Abhängigkeiten zwischen den Konstruktionsbauteilen*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1999. Sankt Augustin: Infix, 1999. DISKI, Dissertationen zur künstlichen Intelligenz. 204. ISBN 3896012045.
- [123] HEISENBERG, W. Der Teil und das Ganze (I): Kein Chaos, aus dem nicht wieder Ordnung würde [online]. *Die Zeit*, 1969, (34). Verfügbar unter: <https://www.zeit.de/1969/34/kein-chaos-aus-dem-nicht-wieder-ordnung-wuerde/komplettansicht>.
- [124] STUMPTNER, M. An overview of knowledge-based configuration. *AI Communications*, 1997, 10(2), S. 111.

- [125] WÜPPING, J. Produktkonfigurator für die effiziente Angebotserstellung variantenreicher Produkte. Produktkonfigurator für die beschleunigte Angebotserstellung im Vertrieb, 2019.
- [126] WSCAD. *Automatisieren* [online], 2018 [Zugriff am: 10. Mai 2019]. Verfügbar unter: <https://www.wscad.com/automatisieren/>.
- [127] BUCHANAN, B.G., D. BARSTOW, BECHTEL, ROBERT, BENNETT, JAMES, W. CLANCEY, C. KULIKOWSKI, T. MITCHELL und D.A. WATERMAN. Constructing an Expert System. In: F. HAYES-ROTH, Hg. *Building expert systems*. London: Addison-Wesley, 1983, S. 127-168. ISBN 0-201-10686-8.
- [128] KVALE, S. *InterViews. An introduction to qualitative research interviewing*. [Nachdr.]. Thousand Oaks u.a: Sage, 2004. ISBN 0803958196.
- [129] GRANDE, M. *100 Minuten für Anforderungsmanagement. Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler*. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-658-06434-1.
- [130] NIEBISCH, T. *Anforderungsmanagement in sieben Tagen. Der Weg vom Wunsch zur Konzeption*. Berlin: Springer Gabler, 2013. ISBN 978-3-642-34856-3.
- [131] BECKSTEIN, C. Suche. In: G. GÖRZ, J. SCHNEEBERGER und U. SCHMID, Hg. *Handbuch der künstlichen Intelligenz*. 5., überarb. und aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg, 2014, S. 73-104. ISBN 978-3-486-71307-7.
- [132] DEUTSCHE NORM. 66241: 1979-01, *Informationsverarbeitung; Entscheidungstabelle, Beschreibungsmittel*: Beuth [Zugriff am: 6. Oktober 2018]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-66241/783773>.
- [133] HAUG, A., S. SHAFIEE und L. HVAM. The causes of product configuration project failure [online]. *Computers in Industry*, 2019, **108**, S. 121-131. ISSN 01663615. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compind.2019.03.002.
- [134] HOSH, A., A. MYRODIA, N.H. MORTENSEN und L. HVAM. Reusing components across multiple configurators. *Proceedings of the 21st Configuration Workshop*, 2019, (Vol. 2467), S. 53-60.

- [135] BLAŽEK, P., M. KOLB, C. STREICHSBIER und S. HONETZ. The Evolutionary Process of Product Configurators. In: J. BELLEMARE, S. CARRIER, K. NIELSEN und F.T. PILLER, Hg. *Managing Complexity. Proceedings of the 8th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2015), Montreal, Canada, October 20th-22th, 2015*. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 161-172. ISBN 978-3-319-29056-0.
- [136] GAWER, A. Bridging differing perspectives on technological platforms: Toward an integrative framework [online]. *Research Policy*, 2014, **43**(7), S. 1239-1249. ISSN 00487333. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.respol.2014.03.006.
- [137] LUTZ, C. *Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen individualisierter Produkte. Assistenzsysteme in die Konstruktion Rahmenwerk für die Konzeption und Einführung wissensbasierter*. Dissertation. Wien, 2011.
- [138] VALAVANIS, K.P., A.I. KOKKINAKI und S.G. TZAFESTAS. Knowledge-based (expert) systems in engineering applications: A survey [online]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1994, **10**(2), S. 113-145. ISSN 0921-0296. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF01258225.
- [139] GEYER, G. *Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage*. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1991. München: Hanser, 1991. Fertigungstechnik - Erlangen. 22. ISBN 3-446-16552-5.
- [140] LANDHERR, M.H. *Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014. Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2014. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. 39. ISBN 3839608090.
- [141] WEIDNER, R.S. *Wissensbasierte Planung und Beurteilung von Montagesystemen in der Luftfahrtindustrie*. Dissertation. Hamburg: Shaker, 2014. Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik. Bd. 32. ISBN 978-3-8440-2577-4.
- [142] GÖTZ, J. *Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2015. Bamberg: Meisenbach, 2015. Bericht aus dem Lehrstuhl für

- Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. 265. ISBN 978-3-87525-386-3.
- [143] HEES, A.F. *System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme*. Dissertation. München, 2017. Forschungsberichte IWB. Band 331. ISBN 9783831646760.
- [144] SHAFIEE, S. *Conceptual Modelling for Product Configuration Systems*. Dissertation. Kgs. Lyngby, 2017.
- [145] MICHNIEWICZ, J.J. *Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage*. Dissertation, 2019.
- [146] KRISTJANSDOTTIR, K. *Application of Product Configuration Systems in Engineering Companies*. Dissertation. Denmark, 2017.
- [147] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. *Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0. Version 3*
- [148] Deutsches Institut für Normung e. V. 91345: 2016, *DIN SPEC 91345: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*: Beuth Verlag GmbH.
- [149] BOEHM, B.W. A Spiral Model of Software Development and Enhancement. *IEEE Computer*, 1988, (21), S. 61-72.
- [150] MONTASELL, G. *Umsatzstärkste Online-Shops in Deutschland 2018* [online], 2019. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/646009/umfrage/top-online-shops-deutschland-ecommercedb/>.
- [151] NADAREISHVILI, I., M. AMUNDSEN und M. MCLARTY. *Microservice architecture*. Newton, Massachusetts: O'Reilly Media, Inc, Usa, 2016. ISBN 9781491956250.
- [152] SCHAEFER, R. From Monolith to Microservices at Zalando [online]. *GOTO Conferences*. Verfügbar unter: <https://youtu.be/gEeHZwjwehs>.
- [153] HASSELBRING, W. und G. STEINACKER. Microservice Architectures for Scalability, Agility and Reliability in E-Commerce. In: *IEEE International Conference on Software Architecture. Side Track proceedings: 3-7 April 2017, Gothenburg, Sweden*. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, Conference Publishing Services, 2017, S. 243-246. ISBN 978-1-5090-4794-9.

- [154] GRUHN, V. Die Organisation der Zukunft: Microservices [online]. *Wirtschaftsinformatik & Management*, 2018, **10**(1), S. 52-57. ISSN 1867-5905. Verfügbar unter: doi:10.1007/s35764-018-0022-0.
- [155] BALDWIN, C.Y. und K.B. CLARK. Modularity in the Design of Complex Engineering Systems. In: D. BRAHA, Y. BAR-YAM und A.A. MINAI, Hg. *Complex Engineered Systems. Science Meets Technology*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2006, S. 175-205. ISBN 9783540328315.
- [156] WÜPPING, J. *Konfigurationsprozesse nach PTO, ATO, MTO, ETO* [online], 2015 [Zugriff am: 30. Juni 2019]. Verfügbar unter: <http://cpq-select.org/pto-ato-mto-eto/>.
- [157] ALBERTZ, D. und N. GROÙE ENTRUP. Herausforderungen des Komplexitätsmanagements im Anlagenbau. *Complexity Management Journal 2016 (2016)*, Nr. 1, 2016, S. 4-11.
- [158] EISELE, R. *Konzeption und Wirtschaftlichkeit rechnerintegrierter Planungssysteme*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 1990. München: Hanser, 1990. Fertigungstechnik - Erlangen. 9. ISBN 3446161074.
- [159] FILSON, D. The Impact of E-Commerce Strategies on Firm Value: Lessons from Amazon.com and Its Early Competitors [online]. *The Journal of Business*, 2004, **77**(S2), S. S135-S154. ISSN 0021-9398. Verfügbar unter: doi:10.1086/381640.
- [160] VOIGT, K.-I., O. BULIGA und K. MICHL. Creating the Global Shopping Mall: The Case of Amazon. In: K.-I. VOIGT, O. BULIGA und K. MICHL, Hg. *Business Model Pioneers. How Innovators Successfully Implement New Business Models*. Cham: Springer International Publishing; Imprint; Springer, 2017, S. 67-77. ISBN 978-3-319-38844-1.
- [161] ANDERSON, P. und E. ANDERSON. The new e-commerce intermediaries. *MIT Sloan Management Review*, 2002, (4), S. 53-62.
- [162] INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. *Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots*. Frankfurt, M., 2018.
- [163] IG METALL, B.B. *Gehälter für Ingenieurinnen und Ingenieure 2018-2019* [online]. 2018. Verfügbar unter:

- https://www.igmetall.de/download/20181008_bayern_7037e22942b8eee48b425904dff39ae90d825ea1.pdf.
- [164] LÖWEN, U. und F. HARTNER. Geschäftsmodell-Muster für digitale B2B-Plattformen Business model patterns for digital B2B platforms. In: *21. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik, Automation 2020. 30. Juni und 01. Juli 2020*, 2020, S. 741-754. ISBN 978-3-18-092375-8.
- [165] YASKAWA ELECTRIC CORPORATION. Schlüsselfertige, roboterbasierte Schutzgas-Schweisszelle [online], 2017. Verfügbar unter: <https://www.industr.com/de/schluesselfertige-roboterbasierte-schutzgas-schweisszelle-2297951>.
- [166] BULIGA, O., C.W. SCHEINER und K.-I. VOIGT. Business model innovation and organizational resilience: towards an integrated conceptual framework [online]. *Journal of Business Economics*, 2016, **86**(6), S. 647-670. ISSN 0044-2372. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11573-015-0796-y.
- [167] BULIGA, O. und K.-I. VOIGT. Why do business model innovators require organizational resilience? *R&D Management Conference (University of Cambridge)*, 2016.
- [168] SCHUNK GMBH & CO. KG. Das Berechnungs- und Auslegungstool für SCHUNK Greifer [online], 2020. Verfügbar unter: https://schunk.com/de_de/services/berechnungs-und-auslegungstool-greifen/.
- [169] SCHUNK GMBH & CO. KG. eGRIP SCHUNK Greiferfinger Designtool - [online]. Gedruckte Greiferfinger aus Kunststoff, Stahl und Aluminium - auf Knopfdruck mit eGRIP, 2020. Verfügbar unter: https://schunk.com/de_de/services/egrip-greiferfinger-designtool/.
- [170] BODENDORF, F. *Daten- und Wissensmanagement. 2.*, aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2006. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-540-28743-8.
- [171] MANDL, M., A. FELFERNIG, E. TEPPAN und M. SCHUBERT. Consumer decision making in knowledge-based recommendation [online]. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2011, **37**(1), S. 1-22. ISSN 0925-9902. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10844-010-0134-3.

- [172] NONAKA, I. und H. TAKEUCHI. *The knowledge creating company. How Japanese companies create the dynamics of innovation*. New York: Oxford Univ. Press, 1995. ISBN 9780195092691.
- [173] GOOGLE IRELAND LIMITED. Detaillierte Daten zu Google Analytics, 2020. Verfügbar unter: <https://marketingplatform.google.com/intl/de/about/analytics/features/>.
- [174] AXURE SOFTWARE SOLUTIONS, INC. axure - Powerful Prototyping and Developer Handoff [online], 2020. Verfügbar unter: <https://www.axure.com/>.
- [175] SCHATTEN, A., S. BIFFL, M. DEMOLSKY, E. GOSTISCHA-FRANTA, T. ÖSTREICHER und D. WINKLER. *Best Practice Software-Engineering. Eine praxiserprobte Zusammenstellung von komponentenorientierten Konzepten, Methoden und Werkzeugen*. Heidelberg, Neckar: Spektrum Akademischer Verlag, 2010. ISBN 978-3-8274-2486-0.
- [176] Deutsches Institut für Normung e.V. 8580: 01-2020, *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [177] Deutsches Institut für Normung e.V. 1319-1: 1995, *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [178] POTT, A. und T. DIETZ. *Industrielle Robotersysteme. Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. ISBN 9783658253455.
- [179] IFR INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. World Robotics 2020 Industrial Robots [online], 2020. Verfügbar unter: https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf.
- [180] DURKIN, J. *Expert systems. Design and development*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994. ISBN 0023309709.
- [181] YOSHIDA, K. und M. LEE, Hg. *Knowledge management and acquisition for intelligent systems. 15th Pacific Rim Knowledge Acquisition Workshop, PKAW 2018, Nanjing, China, August 28-29, 2018: proceedings*. Cham: Springer, 2018. Lecture notes in computer science Lecture notes in artificial intelligence. 11016. ISBN 978-3-319-97289-3.

- [182] FRAUNHOFER ISI. *Automatisierung und Robotik-Systeme. Studien zum deutschen Innovationssystem*. Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI), 2016.
- [183] UNIVERSAL ROBOTS. Cobots-ur3-ur5-ur10-ur16 [online], 2020. Verfügbar unter: <https://www.jugard-kuenstner.de/universal-robots/cobots-ur3-ur5-ur10-ur16/>.
- [184] KAWASAKI. RS010N Roboter [online], 2020. Verfügbar unter: <https://robotics.kawasaki.com/de1/products/robots/small-medium-payloads/RS010N/>.
- [185] KUKA DEUTSCHLAND GMBH. KR 20 R1810 [online], 2020. Verfügbar unter: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000262123_de.pdf.
- [186] YASKAWA EUROPE GMBH. MOTOMAN GP88 [online], 2020. Verfügbar unter: https://www.yaskawa.de/Global%20Assets/Downloads/Brochures_Catalogues/Robotics/MOTOMAN_Robots/GP-Series/Flyer_Robot_GP88_D_06.2020.pdf.
- [187] KOPISCH, M. Räumliche Beziehungen beim Konfigurieren von Passagierkabinen des AIRBUS A340. In: F. PUPPE und A. GÜNTER, Hg. *Expertensysteme 93. 2. Deutsche Tagung Expertensysteme (XPS-93) Hamburg, 17.-19. Februar 1993*. Berlin: Springer, 1993, S. 84-97. ISBN 3-540-56464-0.
- [188] GÖNNHEIMER, P., A. KIMMIG, C. EHRMANN, J. SCHLECHTENDAHL, J. GÜTH und J. FLEISCHER. Concept for the Configuration of Turnkey Production Systems [online]. *Procedia CIRP*, 2019, **86**, S. 234-238. ISSN 22128271. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.procir.2020.01.047](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.047).

9.3 Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] SCHÄFFER, E., S. SHAFIEE, A. MAYR und J. FRANKE. A strategic approach to improve the development of use-oriented knowledge-based engineering configurators (KBEC) [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **96**, S. 219-224. ISSN 22128271. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.procir.2021.01.078](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.078).

- [P2] SCHÄFFER, E. Pneumatische Sensoren. In: R. MÜLLER, J. FRANKE, D. HENRICH, B. KUHLENKÖTTER, A. RAATZ und A. VERL, Hg. *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. München: Hanser, 2019, S. 93-95. ISBN 978-3-446-45016-5.
- [P3] SCHÄFFER, E., L. PENCZEK, A. MAYR, J. BAKAKEU, J. FRANKE und B. KUHLENKÖTTER. Digitalisierung im Engineering [online]. Ein Ansatz für ein Vorgehensmodell zur durchgehenden, arbeitsteiligen Modellierung am Beispiel von AutomationML. *Industrie 4.0 Management*, 2019, 2019(1), S. 61-66. ISSN 23649208. Verfügbar unter: doi:10.30844/I4oM_19-1_S61-66.
- [P4] SCHÄFFER, E., V. STIEHL, P.K. SCHWAB, A. MAYR, J. LIERHAMMER und J. FRANKE. Process-Driven Approach within the Engineering Domain by Combining Business Process Model and Notation (BPMN) with Process Engines [online]. *Procedia CIRP*, 2021, 96, S. 207-212. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.01.076.
- [P5] SCHÄFFER, E., M. BARTELT, T. POWNUK, J.-P. SCHULZ, B. KUHLENKÖTTER und J. FRANKE. Configurators as the basis for the transfer of knowledge and standardized communication in the context of robotics. In: L. WANG, Hg. *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*: Elsevier, 2018, S. 310-315
- [P6] SCHÄFFER, E., H. LEIBINGER, A. STAMM, M. BROSSOG und J. FRANKE. Configuration based process and knowledge management by structuring the software landscape of global operating industrial enterprises with Microservices. In: B. DENKENA, K.-D. THOBEN und A. TRÄCHTLER, Hg. *4th International Conference on System-Integrated Intelligence: Intelligent, Flexible and Connected Systems in Products and Production*: Elsevier, 2018, S. 86-93.
- [P7] SCHÄFFER, E., A. MAYR, T. HUBER, T. HÖFLINGER, M. EINECKE und J. FRANKE. Gradual tool-based optimization of engineering processes aiming at a knowledge-based configuration of robot-based automation solutions. In: PETER BUTALA, EDVARD GOVEKAR, ROK VRABIČ, Hg. *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS)*: Elsevier, 2019, S. 736-741.

- [P8] SCHÄFFER, E., A. BECK, J. EBERLE, M. METZNER, A. BLANK, J. SEßNER und J. FRANKE. Analyzing the Impact of Object Distances, Surface Textures and Interferences on the Image Quality of Low-Cost RGB-D Consumer Cameras for the Use in Industrial Applications. In: R. SCHMITT und G. SCHUH, Hg. 7. *WGP-Jahreskongress Aachen*, 5.-6. Oktober 2017. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2017, S. 215-221. ISBN 978-3-86359-555-5.
- [P9] SCHÄFFER, E., T. POWNUK, J. WALBERER, A. FISCHER, J.-P. SCHULZ, M. KLEINSCHNITZ, M. BARTELT, B. KUHLENKÖTTER und J. FRANKE. System architecture and conception of a standardized robot configurator based on microservices. In: T. SCHÜPPSTUHL, K. TRACHT und J. FRANKE, Hg. *Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*. Berlin: Springer Vieweg, 2018, S. 159-166. ISBN 978-3-662-56713-5.
- [P10] SCHÄFFER, E., S. SHAFIEE, T. FRÜHWALD und J. FRANKE. A development approach towards user-centered front-ends for knowledge-based engineering configurators: a study within planning of robot-based automation solutions. *Proceedings of the 22nd International Configuration Workshop*, 2020, S. 47-52.
- [P11] SCHÄFFER, E., A. MAYR, J. FUCHS, M. SJAROV, J. VORNDRAN und J. FRANKE. Microservice-based architecture for engineering tools enabling a collaborative multi-user configuration of robot-based automation solutions. In: F. DIETRICH, Hg. *7th CIRP Global Web Conference – Towards shifted production value stream patterns through inference of data, models, and technology (CIRPe 2019)*: Elsevier, 2019, S. 86-91.
- [P12] SCHÄFFER, E., J.-P. SCHULZ und J. FRANKE. Robotiklösungen im Baukastenprinzip für den Mittelstand. *BigData Insider*, 2019.
- [P13] SCHÄFFER, E., S. FRÖHLIG, A. MAYR, FRANKE, JÖRG und J. FRANKE. A method for collaborative knowledge acquisition and modeling enabling the development of a knowledge-based configurator of robot-based automation solutions. In: F. DIETRICH, Hg. *7th CIRP Global Web Conference – Towards shifted production value stream patterns through inference of data, models, and technology (CIRPe 2019)*: Elsevier, 2019, S. 92-97

- [P14] SCHÄFFER, E., K. THI und J. FRANKE. Bedarf und Konzeptvorstellung des Forschungsprojekts ROBOTOP für einen webbasierten Konfigurator für den Massenmarkt [online], 2020. Verfügbar unter: doi:10.13140/RG.2.2.15152.30720.
- [P15] SCHÄFFER, E., M. METZNER, D. PAWLOWSKIJ und J. FRANKE. Seven Levels of Detail to structure use cases and interaction mechanism for the development of industrial Virtual Reality applications within the context of planning and configuration of robot-based automation solutions [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **96**, S. 284-289. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.01.088.
- [P16] SCHÄFFER, E. und L. PENCZEK. ROBOTOP. In: INSTITUT FÜR INNOVATION UND TECHNIK, Hg. *Interoperable Informationsmodelle in Industrie 4.0. Erfahrungen und Handlungsempfehlungen aus Praxissicht*, 2020, S. 15-19.
- [P17] HOOS, J., B. KAHL, R. KREUCH, A. LÜDER, L. PENCZEK, L. RISCH, E. SCHÄFFER, I. SEIFERT und R. WINTER. *Interoperable Informationsmodelle in Industrie 4.0. Erfahrungen und Handlungsempfehlungen aus Praxissicht*, 2020.
- [P18] METZNER, M., J. BÖNIG, A. BLANK, E. SCHÄFFER und J. FRANKE. "Human-In-The-Loop"- Virtual Commissioning of Human-Robot Collaboration Systems. In: T. SCHÜPPSTUHL, K. TRACHT und J. FRANKE, Hg. *Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*. Berlin: Springer Vieweg, 2018, S. 131-138. ISBN 978-3-662-56713-5.
- [P19] BROSSOG, M. und E. SCHÄFFER. Prozesssimulation. In: R. MÜLLER, J. FRANKE, D. HENRICH, B. KUHLENKÖTTER, A. RAATZ und A. VERL, Hg. *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. München: Hanser, 2019, S. 284-297. ISBN 978-3-446-45016-5.
- [P20] MAYR, A., A. MEYER, E. SCHÄFFER, M. MASUCH, J. von LINDENFELS, G. MÖSSINGER und J. FRANKE. Towards a Knowledge-Based Design Methodology for Managing the Complexity in the Integrated Product and Process Development of Electric Motors. In: R. SCHMITT und G. SCHUH, Hg. *Advances in Production Research. Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology*

- (WGP), Aachen, November 19-20, 2018. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 112-125. ISBN 978-3-030-03450-4.
- [P21] MAYR, A., T. LECHLER, T. DONHAUSER, M. METZNER, E. SCHÄFFER, E. FISCHER und J. FRANKE. Advances in energy-related plant simulation by considering load and temperature profiles in discrete event simulation. In: PETER BUTALA, EDVARD GOVEKAR, ROK VRABIČ, Hg. *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS)*: Elsevier, 2019, S. 1325-1330
- [P22] SHAFIEE, S., E. SCHÄFFER und L. HVAM. Complexity of Configurators Relative to Types of Outputs. *Proceedings of the 22nd International Configuration Workshop*, 2020, S. 95-100.

9.4 Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

Die folgenden studentischen Arbeiten wurden von dem Autor und dem Lehrstuhlinhaber betreut:

- [S1] POWNUK, T. *Anforderungsanalyse und Konzeption im Kontext der Systemarchitektur einer internetbasierten Konfigurationsplattform für Roboter-Anwendungen*. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S2] VORNDRAN, J. *Konzeption eines Multi-User-Ansatzes zur kollaborativen Konfiguration von Robotiksystemen und Implementierung eines Evaluationsprototypen*. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S3] ECKART, A. *Konzeptionierung und Programmierung eines webfähigen Export Service für Roboter im Kontext industrieller Software, Konfiguratoren und Microservice Architekturen*. Masterarbeit. Erlangen, 2017.
- [S4] AMON, F. *Aufbau eines VR-Demonstrators und Entwickeln einer VR-fähigen Webapplikation mittels WebGL-/WebVR-API und Three.js*. Projektarbeit. Erlangen, 2018.
- [S5] HUMMEL, J. *Einführung einer durchgängigen Engineering-Prozesskette bei KMUs basierend auf BPMN 2.0 - Teilautomatisierung von (Geschäfts-)Prozessen als Basis für die Konfiguration*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019.

- [S6] KOCH, S. *Entwicklung eines Konzepts zur Umsetzung von Wissensengineering am Beispiel des Projektmanagements in der Montageplanung eines deutschen Automobilherstellers*. Projektarbeit. Erlangen, 2018.
- [S7] LIERHAMMER, J. *Prozessorientierte Informationssysteme mittels BPMN 2.0 als Basis für digitale PLM Applikationen im Zeitalter von Industrie 4.0*. Projektarbeit. Erlangen, 2019.
- [S8] LEIBINGER, H. *Technologie gestütztes Wissensmanagement zur Strukturierung gewachsener Software-Gefüge von Industrieunternehmen*. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S9] RÖHRLE, D. *Herausforderungen der maschinellen Interpretation von verschiedenen Daten- und Wissensquellen im Kontext des Semantic Web*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018.
- [S10] WALBERER, J. *Konzeptionierung und Entwicklung einer ersten 3D-Web Interaktion mit einem kinematisierten Roboter auf Basis von WebGL/ Three.js mittels Microservices Architektur*. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S11] WIECZOREK, M. *Konzeptionierung und prototypische Implementierung von modularen Datenmodell-Editoren, für einen webbasierten Konfigurator*. Projektarbeit. Erlangen, 2019.
- [S12] LIEWALD, M. *Wissensmanagement im Kontext der Webentwicklung – Analyse, Strukturierung und Klassifizierung bestehender Webtechnologien*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018.
- [S13] LA, M. *Methodische Geschäftsmodellentwicklung technologiebasierter und modularer Konfigurationssysteme in der Robotik Industrie*. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S14] FRISCH, F. *Graphbasierte Datenstrukturen im Wissensmanagement – Entwicklung einer dynamischen Webapplikation auf Basis von Neo4j und Node.js*. Projektarbeit. Erlangen, 2017.
- [S15] NEUMANN, C. *Entwicklung von Robotik Konfigurationskonzepten auf Basis von Webtechnologien in der Schnittstelle von Engineering und Design*. Projektarbeit. Erlangen, 2017.

- [S16] FRÜHWALD, T. *Konzeption und Pilotierung eines web-basierten Konfigurator-Frontend für Automatisierungslösungen mittels User Centered Design Methoden*. Masterarbeit. Erlangen, 2019.
- [S17] ERDOENMEZ, B. *Geschäftsmodelle, Handlungsoptionen und Marktpotenzialanalyse der Konfiguration im Kontext hoch skalierbarer, microservice-orientierter Webplattformen*. Masterarbeit. Erlangen, 2020.
- [S18] FRÖHLIG, S. *Entwurf eines Konfigurators zur automatisierten Planung von Produktionsanlagen durch Erstellung und Nutzung eines strukturierten PPR-Ansatzes*. Masterarbeit. Erlangen, 2019.
- [S19] HOANG, K. *Optimierung der Wissensakquise für das Front-End eines internetbasierten Robotik Konfigurators mittels Web (Analytics) Methoden*. Masterarbeit. Erlangen, 2019.
- [S20] NOWACK, A. *Konzepterstellung und Aufbereitung von Best-Practice-Daten für einen 3D-Roboterkonfigurator*. Masterarbeit. Erlangen, 2019.
- [S21] PAWLOWSKI, D. *Potenzialanalyse und Entwicklung einer webbasierten Virtual Reality Anwendung im Kontext der Robotik Konfiguration*. Masterarbeit. Erlangen, 2019.
- [S22] HÖFLINGER, T. *Entwicklung eines wissensbasierten Engineering-Ansatzes für eine effiziente Konfiguration modularer mechatronischer Systeme*. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S23] HUBER, T. *Entwicklung einer Wissensbasis für einen Konfigurator zur Auslegung von roboterbasierten Anwendungen im industriellen Umfeld*. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S24] ROTH, D. *Aufbereitung und Methodenentwicklung von Best Practice 3D-Szenen als Bewertungsgrundlage von Konfigurationssystemen*. Projektarbeit. Erlangen, 2019.
- [S25] OSTERMÜNCHNER, F. *Entwicklung und prototypische Implementierung eines Konfigurators für mechatronische Objekte in die Entwicklungsumgebung von roboterbasierten Anwendungen im Sondermaschinenbau*. Masterarbeit. Erlangen, 2019.
- [S26] RUHS, V. *Arbeitsteilige Datenmodellierung am Beispiel des Varianten- und Änderungsmanagements in der Fertigungsplanung*. Projektarbeit. Erlangen, 2019.

- [S27] STÜBINGER, L. *Wissensengineering als Basis von KI-Technologien: Methodik zur stetigen Wissensrückführung zwischen Experten und Ontologie zur Prozessoptimierung*. Masterarbeit. Erlangen, 2018.
- [S28] ENDRES, S. *Strukturierte Sammlung und Klassifikation von Expertenwissen bzw. Constraints für die Konfiguration*. Projektarbeit. Erlangen, 2020.
- [S29] SCHMITT, B. *Entwicklung modularer 2D Templates und eines Datenschemas für die Grobkonzeptplanungen von Best Practice Automatisierungszellen*. Bachelorarbeit, 2020.
- [S30] MÜLLER, N. *Konzeption der nutzerzentrierten Aufbereitung von Best Practice Szenen mittels modularer Datenbanksystematik am Beispiel industrieller, roboterbasierter Automatisierungslösungen*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020.
- [S31] FALBESANER, N. *Potenzialanalyse und Entwicklung einer webbasierten Hallenplanung mittels automatisierter Real-/Digitalkopplung über kostengünstige 3D-Scans im Kontext der Robotik-Konfiguration*. Masterarbeit. Erlangen, 2020.
- [S32] ABU EL-QOMSAN, M. *Konzeption und Entwicklung eines webbasierten Virtual Reality Konfigurators zur Grobkonzeptplanung roboterbasierter Automatisierungslösungen*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020.
- [S33] BOSCH, C. *Methoden zur skalierbaren Erweiterung und Optimierung eines 3D-Engineering-Konfigurators für roboterbasierte Automatisierungslösungen mittels logischer Programmierung*. Projektarbeit. Erlangen, 2020.
- [S34] RUHS, V. *Ganzheitliche Maschinenmodelle zu Förderung der Durchgängigkeit in Engineering-Prozessen*. Masterarbeit. Erlangen, 2020.
- [S35] PHAN, T. *Konzeption und Implementierung von Multi-Nutzer-Funktionen in einem Virtual Reality Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen*. Projektarbeit. Erlangen, 2020.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):

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
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

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
Projektierung 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 Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
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 Bruchverhal-
tens 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
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
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 Biegeumforme 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-Laserstrahlbear-
beitung 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 Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
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 Simula-
tionsverfahrens 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 Bear-
beitungsabläufe 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 durchflußbestimmen-
der 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
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden 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 Programoptimierung
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 Meißner
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 mechani-
scher 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
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen 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
Demontagetechologien 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
Lebensdauervorhersage 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 Integra-
tion 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 Montage-
systemen 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 Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
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 Anschlußkontak-
ten 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 Ein-
satz 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 - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, 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 produktbezoge-
ner 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 Magnesiumlegie-
rungen 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 Produkt-
strukturen 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 Diodenlaserstrah-
lung 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-Ent-
wicklung 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 Kleinst-
teile 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 trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten 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 Schaltungsträger
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 - Prozessana-
lyse 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 Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung 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 Prechtl
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 Laserdurchstrahlenschweißen 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 bleifreie 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 Mikrojustiertechnik 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 Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer 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 Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit 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 prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen 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 wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
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 Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
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 Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen 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 Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
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 Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahliefschweißen
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
Laserdurchstrahlenschweißen
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 Laserdurchstrahl-
schweißen 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 Innhochdruck-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 Ver-
sagens 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 Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation 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 Kupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - 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 für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung 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 Entwick-
lung 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 presshärzbaren 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 Develop-
ment
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 Rösler
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 Kühl
Flexible Automatisierung der Statorenmontage 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 Laserstrahl-tiefschweißprozesses 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
Anlagenengineerings
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 aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
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 Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischeneschalteten 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 Presshärtprozess 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 beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung 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
Lösungsglühen
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 Böning
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 disk-
ret 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
Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe 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 Unternehmenscontrol-
lings 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 Modellversuchen 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 Werkerinformations-
systeme 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 unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten 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) / Experi-
mentelle 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 Magnesium-
legierung 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 Blechmassivumformpro-
zessen 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 art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
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 Karosserierohrbau: 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 Werkzeuoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöllner

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 Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge 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 Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche Modellierung und Ableitung einer
Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe
nach dem Spinnenbeinprinzip
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 Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
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 Kon-
text 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
muskuloskeletalen 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 laserdirekt-
strukturierter 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 Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer 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 Herstel-
lung 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 schräg-
verzahnten Zahnradern
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 Heißcrimpprozesses
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 Aluminiumblech-
bauteile 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 Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen 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 elektronischer Bau-
elemente
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 Geometriemodelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften 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 Gläßel
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen 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 364: Eike Wolfram Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-
Konfigurator für roboterzentrierte Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 360: Ralf Merkl
Closed-Loop Control of a Storage-Sup-
ported 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 Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Ver-
schleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Abstract

The market for robot-centric automation (RA) solutions is a global growth industry. Nevertheless, due to the high cost and complexity of robot-centric automation solutions, small and medium-sized enterprises (SMEs) often fall short of this trend.

Subject and objective of the dissertation is the creation of efficient and scalable engineering concepts and solutions for the planning of RA solutions based on web technologies. For this purpose, the engineering configurator concept, a microservice-based web platform reference architecture, and a development method required for engineering configurators based on three sub-methods (W_1 - W_3) were introduced. Via user-centered development approaches, a modular architecture for RA solutions as well as approaches from knowledge-based configuration (subfield from artificial intelligence (AI)), sales, planning and engineering of robot-centered automation solutions are made accessible to a broader audience. The concepts and methods were validated in the context of the ROBOTOP web platform as well as by means of various 3D web, AR (Augmented Reality) and VR (Virtual Reality) multi-user demonstrators. The concepts and methods thus also enable efficient digitalization or process automation of the engineering of RA solutions through the introduced, structuring methods for knowledge acquisition, modeling as well as implementation and thereby support the vision of the digital twin in the context of Industry 4.0.

Der Markt für roboterzentrierte Automatisierungslösungen (RA) ist ein globaler Wachstumsmarkt. Aufgrund der hohen Kosten und Komplexität von RA bleiben häufig kleine und mittlere Unternehmen (KMU) hinter diesem Trend zurück.

Gegenstand und Zielstellung der Promotion ist die Schaffung von effizienten sowie skalierbaren Engineering-Konzepten und -Lösungen für die Planung von RA auf Basis von Webtechnologien. Hierfür wurden das Konzept des Engineering-Konfigurators, eine microservicebasierte Webplattform-Referenzarchitektur sowie eine für Engineering-Konfiguratoren benötigte Entwicklungsmethode basierend auf drei Teilmethoden (W1-W3) eingeführt. Über nutzerzentrierte Entwicklungsansätze, eine modulare Architektur für RA sowie Ansätze aus der wissensbasierten Konfiguration (Teilbereich aus der künstlichen Intelligenz (KI)) werden der Vertrieb, die Planung und das Engineering von RA einem breiteren Publikum zugänglich gemacht. Validiert wurden die Konzepte und Methoden im Rahmen der Webplattform ROBOTOP sowie anhand diverser 3D-Web-, AR (Augmented Reality)- und VR (Virtual Reality)-Mehrbenutzer-Demonstratoren. Die Konzepte und Methoden befähigen somit auch eine effiziente Digitalisierung bzw. Prozessautomatisierung des Engineerings von RA durch die eingeführten, strukturierenden Methoden zur Wissenserfassung, -modellierung sowie -implementierung und unterstützen dabei die Vision des digitalen Zwillings im Kontext von Industrie 4.0.

