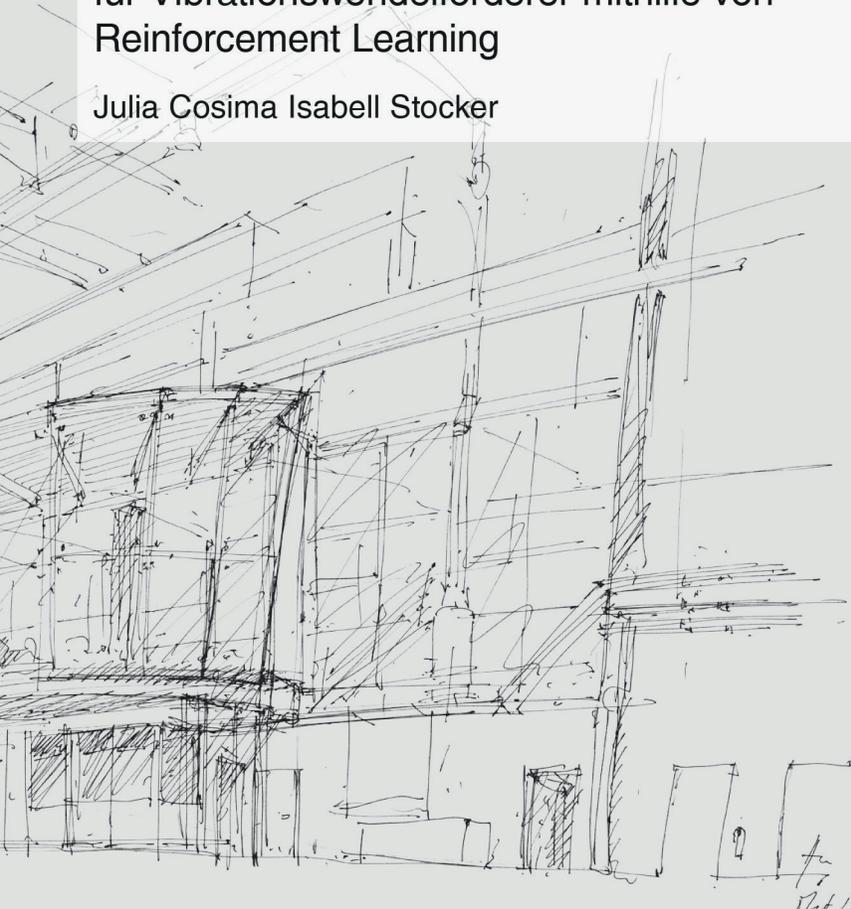


Automatisierte Generierung von Ordnungsschikanen für Vibrationswendelförderer mithilfe von Reinforcement Learning

Julia Cosima Isabell Stocker



Cosima Stocker

**Automatisierte Generierung von Ordnungsschikanen
für Vibrationswendelförderer mithilfe von
Reinforcement Learning**

Forschungsberichte iw
Band 381

broschiert-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-4991-4 Version: 1 vom 08.02.2023
14:56:18
Copyright© utzverlag 2022

Alternative Ausgabe: Ebook (PDF)
ISBN 978-3-8316-7738-2
Copyright© utzverlag 2023

Julia Cosima Isabell Stocker

**Automatisierte Generierung von
Ordnungsschikanen für
Vibrationswendelförderer mithilfe von
Reinforcement Learning**



Forschungsberichte iwb

Band 381

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2022

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.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2022

ISBN 978-3-8316-4991-4

Printed in Germany
utzverlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Abstract

The thesis shows a consistent method for the automated generation of orienting devices for vibratory bowl feeders using reinforcement learning, which makes it possible to shorten the development time for orienting devices and increase the quality of the results.

Existing partial solutions are adapted and merged, and missing components are newly developed. The method is validated by means of a prototypical implementation.

Zusammenfassung

In der Arbeit wird eine durchgängige Methode zur automatisierten Generierung von Ordnungsschikanen für Vibrationswendelförderer mithilfe von Reinforcement Learning vorgestellt, welche die Verkürzung der Entwicklungszeit für Ordnungsschikanen sowie die Steigerung der Ergebnisqualität ermöglicht.

Bestehende Teillösungen werden angepasst und zusammengeführt sowie fehlende Bausteine neu entwickelt. Die Methode wird anhand einer prototypischen Umsetzung validiert.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist in Zeiten globaler Herausforderungen, wie der Klimakrise, dem Mobilitätswandel und der Überalterung der Gesellschaft in westlichen Ländern, für eine nachhaltige Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Der Einfluss eines Industriebetriebs auf die Umwelt und die Gesellschaft hängt dabei entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen. Dabei muss größtes Augenmerk darauf gelegt werden, möglichst ressourcenschonend, effizient und resilient zu werden, um flexibel im volatilen Produktionsumfeld zu agieren.

Um in dem Spannungsfeld Nachhaltigkeit, Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Personals sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei eingesetzten rechnergestützten und Künstliche-Intelligenz-basierten Methoden und die notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades dürfen jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung ökologischer und sozialer Aspekte in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Zusammenfassung

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Rüdiger Daub

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Besonders danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh für ihre stets großzügige Unterstützung und Förderung im Rahmen meiner Forschungstätigkeit sowie im Institutsleitungskreis. Bei Herrn Prof. Reinhart bedanke ich mich darüber hinaus für die konstruktive und wohlwollende Betreuung meiner Arbeit sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. ir. Daniel Rixen für die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit sowie die Übernahme des Koreferats.

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor bei der Erstellung meiner Dissertation waren die zahlreichen Diskussionen mit wohlwollenden und erfahrenen Kolleginnen und Kollegen zu allen fachlichen und persönlichen Problemstellungen. Daher möchte ich mich besonders bei meinen *iwb*-Kolleginnen und Kollegen Gregor Lux-Gruenberg, Marco Ulrich, Veit Hammerstingl, Corinna und Stefan Liebl, Till Günther, Andreas Bachmann, Susanne Vernim, Anna Kollenda, Daria Leiber und Ulrich Teschemacher bedanken, von denen ich fachlich wie auch persönlich sehr viel lernen konnte. Den beiden letztgenannten danke ich zudem für die aufmerksame und kritische Durchsicht meiner Arbeit und ihre wertvollen Hinweise. Auch allen Studierenden, die ich im Rahmen meiner Promotionszeit betreuen durfte, bin ich zu großem Dank für viele wertvolle fachliche Beiträge zu meiner Dissertation verpflichtet.

Besonderen Dank möchte ich meiner Familie und meinen Freunden aussprechen, ohne die mein Weg und die Vollendung dieser Arbeit nicht möglich

Zusammenfassung

gewesen wären. Auch wenn meine Eltern Sonnhild und Hans diesen besonderen Meilenstein leider nicht mehr miterleben können, empfinde ich tiefste Dankbarkeit für die immerwährende Unterstützung all meiner Vorhaben. Dafür möchte ich meiner hinzugewonnenen Familie, bestehend aus Uli, Lilli, Peter, Sonja und Tobias, für die viele schöne gemeinsame Zeit und den Rückhalt danken. Bei meinen Freundinnen Anita Huhn und Luisa Zylka bedanke ich mich von ganzem Herzen für ihre moralische Unterstützung in all den Jahren und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit.

Lieber Uli, du hast mir in zahlreichen fachlichen Diskussionen häufig entscheidende Impulse gegeben. Deine besonders kritische Durchsicht meiner Dissertation hat meine Arbeit noch einmal erheblich vorangebracht. Jedoch mindestens genauso bedeutend war für mich dein unerschütterliches Vertrauen in meinen Erfolg und meine Fähigkeiten sowie deine positive Grundhaltung. Eine Doktorarbeit ist auf moralischer Ebene stets „Teamwork“, insb. in der Partnerschaft, daher danke ich dir aus tiefstem Herzen für deine Unterstützung und Rücksichtnahme in den letzten Jahren. Ich bin sehr froh, dass wir unsere Dissertationen nun beide ins Ziel gebracht haben und freue mich auf unsere gemeinsame Zukunft als Familie mit vielen spannenden neuen Herausforderungen.

München, im September 2022

Cosima Stocker

Inhalt

Abstract	I
Zusammenfassung	III
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Verzeichnis der Formelzeichen	XV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Spezifizierung des Betrachtungsbereichs	5
1.4 Wissenschaftstheoretische Einordnung	6
1.5 Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	10
2 Stand der Erkenntnisse	13
2.1 Begriffsdefinitionen	13
2.2 Vibrationswendelförderer	16
2.2.1 Produktionstechnische Bedeutung und Einsatzgebiete .	17
2.2.2 Aufbau und Funktionsweise	20
2.2.3 Fördergut und Ordnungsschikanen	22
2.3 Auslegung von Ordnungsschikanen	29
2.3.1 Konventionelle Auslegung	29
2.3.2 Methodische Unterstützung bei der Auslegung	32
2.3.3 Unterstützung der Auslegung durch Simulationsverfahren	37
2.3.4 Automatisierte Auswahl und Sequenzierung von Schikanenelementen	40
2.4 Forschungsdefizit	42
2.5 Reinforcement Learning als Verständnisgrundlage	43
2.5.1 Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen	44

2.5.2	Reinforcement Learning im Detail	53
3	Anforderungsanalyse und Lösungsansatz	59
3.1	Anforderungen an die Methode	59
3.1.1	Allgemeine Anforderungen	59
3.1.2	Spezifische Anforderungen	60
3.2	Lösungsansatz: Methode zur automatisierten Generierung von Ordnungsschikanen	62
4	Methodenschritt 1: Datenaufbereitung	67
4.1	Überblick	67
4.2	Automatisierte Fördergut-Analyse	69
4.2.1	Extraktion von Fördergut-Charakteristika	69
4.2.2	Ähnlichteil-Analyse	76
4.3	Entwurf einer erweiterbaren CAD-Bibliothek	83
4.3.1	Auswahl und Parametrierung von Schikanenelementen	83
4.3.2	Struktur der CAD-Bibliothek	87
5	Methodenschritt 2: Bewertung der Schikanenelemente	91
5.1	Überblick	91
5.2	Simulationsbasierte Bewertung von Schikanenelementen	93
5.2.1	Bewertung von Schikanenelementen	93
5.2.2	Umsetzbarkeit mit der Physiksimulation	96
5.3	Berechnungsvorschriften für Simulationsläufe	97
5.3.1	Automatisierte Versuchsplanung	97
5.3.2	Konvergenz der Simulationsergebnisse	99
6	Methodenschritt 3: Generierung der Ordnungsschikane	101
6.1	Überblick	101
6.2	Aufbau des Reinforcement-Learning-Systems	104
6.2.1	Modellierung des zugrundeliegenden Optimierungs- problems	104
6.2.2	Struktur und Komponenten des Reinforcement-Learning- Systems	105
6.3	Reinforcement Learning zur automatisierten Generierung von Ordnungsschikanen	109
6.3.1	Lernprozess und Training	109

6.3.2	Prädiktion von Ordnungsschikanen	112
6.4	Simulative Evaluation und Optimierung	114
6.4.1	Erzeugung der Ordnungsschikane aus dem Design- entwurf	114
6.4.2	Simulation der Ordnungsschikane und Parameter- optimierung	115
7	Implementierung und Evaluierung der Auslegungsmethode	117
7.1	Rahmenbedingungen	119
7.2	Automatisierte Generierung einer Ordnungsschikane	119
7.2.1	Datenaufbereitung	119
7.2.2	Bewertung der Schikanenelemente	123
7.2.3	Generierung der Ordnungsschikane	124
7.2.4	Evaluation der Ordnungsschikane	127
7.3	Kritische Bewertung der Forschungsergebnisse	128
7.3.1	Richtigkeit der Ergebnisse	128
7.3.2	Anwendbarkeit im industriellen Kontext	130
7.3.3	Wirtschaftlichkeit	132
7.3.4	Allgemeingültigkeit	134
7.3.5	Zusammenfassung	135
7.3.6	Bewertung der Zielerreichung	135
8	Zusammenfassung und Ausblick	139
8.1	Zusammenfassung	139
8.2	Ausblick	140
	Literatur	143
	Betreute Studienarbeiten	181
	Anhang	193

Abkürzungsverzeichnis

ACM	Association for Computing Machinery
ACS	American Chemical Society
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAD	Computer Aided Design
CIRP	Collège International pour la Recherche en Productique
CNN	Convolutional Neural Network
DNN	Deep Neural Network
DRM	Design Research Methodology
ECMA	European Computer Manufacturers Association
EU	Europäische Union
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFRR	International Foundation of Robotics Research
IFTtoMM	International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science
IfW	Institut für Weltwirtschaft
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
MEP	Markov-Entscheidungsprozess
ML	Machine Learning
NN	Neuronales Netz
OG	Orientierungsgrad
OS	Ordnungsschikane/n
OZ	Ordnungszustand
PG	Positionierungsgrad
ReLU	Rectified Linear Unit
RL	Reinforcement Learning

Abkürzungsverzeichnis

RSJ	Robotic Society of Japan
SAC	Soft Actor Critic
SE	Schikanenelement/e
SL	Supervised Learning
StMWi	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
UL	Unsupervised Learning
UML	Unified Modeling Language
VCI	Verband der Chemischen Industrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VWF	Vibrationswendelförderer

Verzeichnis der Formelzeichen

Griechische Buchstaben

ϵ	Effizienz eines SE oder einer OS
γ	Diskontierungsfaktor (RL)
π	Strategie eines RL-Agenten
τ	Target-Smoothing-Koeffizient (RL)

Lateinische Buchstaben

a_t	Aktion eines RL-Agenten zum Zeitpunkt t
\mathcal{A}	Menge der zulässigen Aktionen (RL)
b	neuronenspezifische Verzerrung
d_k	Schraubenkopfdurchmesser
d_s	Schaftdurchmesser einer Schraube
h_k	Schraubenkopfhöhe
i	Laufvariable, Index
k	Laufvariable, Index
l	Gesamtlänge einer Schraube
m	Masse
M	Tupel zur Beschreibung eines MEP (RL)
n	Laufvariable, Index
o	Ausgangssignal eines NN
O_i	Orientierung eines Fördergut-Teils
\mathcal{O}	Menge der möglichen Orientierungen eines Fördergut-Teils

Verzeichnis der Formelzeichen

p	Übergangswahrscheinlichkeit von s_t nach s_{t+1}
\mathcal{P}	Menge der Übergangswahrscheinlichkeiten (RL)
q_π	Aktions-Wertefunktion eines RL-Agenten
r_t	Belohnung eines RL-Agenten zum Zeitpunkt t
r_{t+1}	Belohnung eines RL-Agenten zum Zeitpunkt $t + 1$
R_t	Kumulierte Belohnung eines RL-Agenten zum Zeitpunkt t
\mathcal{R}	Menge der erzielten Belohnungen (RL)
s_t	Zustand einer RL-Umgebung zum Zeitpunkt t
s_{t+1}	Zustand einer RL-Umgebung zum Zeitpunkt $t + 1$
S	Schwerpunkt
\mathcal{S}	Menge der Zustände (RL)
t	Zeitpunkt, Laufvariable, Index
T	Finaler Zeitschritt
t_{max}	Maximale Anzahl an Zeitschritten (RL)
v_π	Zustands-Wertefunktion eines RL-Agenten
\bar{v}	Mittlere Fördergeschwindigkeit
\vec{v}	Vorzugslagen-Vektor
w_i	Gewicht eines NN
x	x-Koordinate
x_i	Eingangssignal eines NN
y	y-Koordinate
z	Laufvariable, z-Koordinate
\vec{z}	Zielorientierungs-Vektor

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Deutschlands Leistungsfähigkeit im internationalen Wettbewerb sowie das hohe Maß an individuellem und gesellschaftlichem Wohlstand basieren zu einem großen Teil auf der fast schon traditionellen Stärke der deutschen produzierenden Industrie (BMW I 2019a, S. 4). Diese Stärke zeigt sich im hohen Anteil des verarbeitenden Gewerbes von über 20% an der gesamten deutschen Bruttowertschöpfung (VCI 2021, S. 7; STMWI 2020, S. 14).

Der durch die Globalisierung der Märkte zunehmende internationale Wettbewerb zwingt deutsche Unternehmen dazu, die Produktlebenszyklen zu verkürzen und bei starkem Preisdruck kundenindividuelle Produkte herzustellen (SCHENK 2015, S. 1, S. 75). Wie sich u. a. durch die Covid-19-Pandemie in den Jahren 2020 und 2021 intensiver denn je offenbart hat, bergen Unterbrechungen und Störungen internationaler Lieferketten ein hohes Risiko für die deutsche Industrie in Form von Kosten und Stillstandszeiten (STMWI 2020, S. 4; IFW 2020, S. 19 f.). Auch internationale Ereignisse wie Handelskonflikte in Verbindung mit der offensiven Umsetzung protektionistischer Strategien, wie z. B. in China und den USA, bis hin zu politischen Instabilitäten und Kriegen können in Zukunft die globalen Lieferketten beeinträchtigen (IFW 2020, S. 23; BMW I 2019a, S. 4).

Aus den eben genannten Gründen ist es erforderlich, die Resilienz der deutschen Unternehmen, also deren Widerstandsfähigkeit und Robustheit gegenüber außerordentlichen Ereignissen zu stärken (STMWI 2020, S. 4; IFW 2020, S. 32). Dazu kann die Erhaltung sowie die Rückverlagerung von Produktionsstätten nach Deutschland beitragen. Die Unternehmen sehen sich jedoch in Deutschland mit Herausforderungen wie einem durch den demografischen

1 Einleitung

Wandel zunehmenden Fachkräftemangel und im internationalen Vergleich relativ hohen Lohnstückkosten konfrontiert (IFW 2020, S. 17).

Wichtige Technologien zur Bewahrung der Wettbewerbsfähigkeit hiesiger Unternehmen unter den im vorigen Absatz genannten Bedingungen sind die Digitalisierung und Automatisierung von Prozessen (STMWI 2020, S. 4). Durch den Einsatz neuer Technologien der Industrie 4.0 (z. B. intelligente, vernetzte Produktionsressourcen oder digitale Methoden zur Entwicklung, Planung und Steuerung) können die Effizienz der Produktion gesteigert sowie deren Kosten verringert werden. Bei der Anwendung dieser digitalen Technologien bestehen allerdings bei vielen kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU)¹ zum Teil erhebliche Defizite (BMW I 2019b, S. 3; IFW 2020, S. 23, S. 27). Zudem sind Automatisierungsansätze tendenziell unflexibel und erst bei hohen produzierten Stückzahlen wirtschaftlich, wogegen KMU meist Klein- und Mittelserien mit hohem Individualisierungsgrad fertigen (LOTTER & WIENDAHL 2012, S. 3). Die vor allem für KMU eingeschränkte Nutzbarkeit von Digitalisierungs- und Automatisierungslösungen ist insb. deshalb problematisch, weil fast 90% der Betriebe im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland zu den KMU zählen (STMWI 2020, S. 25).

Automatisierte Montageanlagen benötigen Ordnungssysteme zur geordneten Bereitstellung von Bauteilen (HESSE & MALISA 2016, S. 441 ff.). Häufig eingesetzte Beispiele sind Industrieroboter mit Greifvorrichtungen, Speicher, Magazine oder Vibrationswendelförderer (VWF). Ordnungssysteme sind für einen wesentlichen Anteil der Montageanlagenkosten verantwortlich, sodass sie einen großen Hebel zur Rationalisierung darstellen (SCHMID 2006, S. 16). Zur Zuführung von ungeordneten Kleinteilen werden in automatisierten Montageanlagen in 80% der Fälle VWF eingesetzt (ROCKLAND 1995, S. 30), wie jüngere Arbeiten sowie eine aktuelle Umfrage qualitativ bestätigen (KRAUEL 2020²; LOTTER & WIENDAHL 2012, S. 246 f.; MATHIESEN 2017, S. 12 f.). VWF nehmen ungeordnetes Fördergut auf und vereinzeln und sortieren dieses mithilfe von Ordnungsschikanen (OS). Bei Änderungen am Produktionssystem, die in der

¹Nach Definition der EU gelten Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitenden sowie entweder einem Jahresumsatz von höchstens 50 Mio. € oder einer Jahresbilanzsumme von höchstens 43 Mio. € als KMU (EU 2003).

²Siehe hierzu Abschnitt „Betreute Studienarbeiten“.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Klein- und Mittelserienfertigung häufig erforderlich sind, weist dieser Prozess eine geringe Flexibilität auf: Prinzipbedingt müssen OS in VWF stets an ein spezielles Fördergut (selten: an eine sehr beschränkte Auswahl mehrerer Teile) angepasst werden (FELDMANN ET AL. 2014, S. 371; MATHIESEN 2017, S. 13).

Die Auslegung von OS ist geprägt von einer weitgehend manuellen Vorgehensweise und hat sich in den letzten Jahrzehnten kaum verändert (MATHIESEN 2017, S. 31; HESSE 2000b, S. 40). Der Auslegungsprozess gestaltet sich langwierig und erzielt oftmals nicht zufriedenstellende Ergebnisse, da das Vorgehen wenig systematisch vonstatten geht. Bislang werden OS auf Basis von Erfahrungswissen manuell in CAD³ konstruiert, konventionell oder additiv gefertigt und anschließend experimentell angepasst. In komplexen Fällen erfolgt selbst die Konstruktion am Versuchsstand durch Fügen und Ausprobieren. Ein umfassender Vergleich von Lösungsalternativen ist i. d. R. aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Ressourcenintensität nicht möglich (HOFMANN 2014, S. 2, S. 20–23). Dadurch ist der Prozess zeit- und kostenintensiv und bewirkt im späteren Betrieb oftmals signifikante Prozessstörungen aufgrund der suboptimalen Auslegung (HOFMANN & STIRNER 2017). Gespräche mit Fachpersonal belegen Entwicklungszeiten von bis zu vier Monaten und meist tägliche Störungen im Betrieb (vgl. KRAUEL 2020). Bisherige Ansätze, diesen Prozess durch passende Softwarewerkzeuge zu unterstützen, lieferten keine in der Praxis anwendbaren Ergebnisse und sind deshalb gerade für KMU überhaupt nicht einsetzbar (z. B. BERKOWITZ & CANNY 1996; DALLINGER ET AL. 2012; M. JIANG ET AL. 2003).

Des Weiteren erfordert die Auslegung und Inbetriebnahme von OS viel Erfahrung und Expertenwissen (HESSE 2010, S. 195; MATHIESEN 2017, S. 31). Im Zuge des demografischen Wandels und dem damit einhergehenden Fachkräftemangel wird es immer schwieriger, junge Mitarbeitende für diese Art der Tätigkeit zu gewinnen, wie Aussagen aus der Praxis bestätigen. Durch die Abhängigkeit des Auslegungsergebnisses von personenspezifischem Fachwissen laufen VWF-Hersteller Gefahr, langfristig ihre Wettbewerbsfähigkeit einzubüßen, sobald das benötigte erfahrene Personal das Unternehmen verlässt (ABELE & REINHART 2011, S. 19–21; KRAUEL 2020).

³CAD: Computer Aided Design.