

Dynamisches und individuelles Werkerinformationssystem für die manuelle Serienmontage

Severin Teubner



Severin Teubner

**Dynamisches und individuelles
Werkerinformationssystem für die manuelle
Serienmontage**

utzverlag · München 2021

Forschungsberichte iwb
Band 368

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7680-4 Version: 1 vom 28.10.2021
Copyright© utzverlag 2021

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4934-1
Copyright© utzverlag 2021

Severin Teubner

**Dynamisches und individuelles
Werkerinformationssystem
für die manuelle Serienmontage**



Forschungsberichte iwb

Band 368

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

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

Copyright © utzverlag GmbH · 2021

ISBN 978-3-8316-4934-1

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

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik

am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Dynamisches und individuelles Werkerinformationssystem
für die manuelle Serienmontage**

Severin Teubner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

2. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Die Dissertation wurde am 15.12.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14.04.2021 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt 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.

Um in dem Spannungsfeld 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 mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

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. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Liebe Leser*innen,

mit der Veröffentlichung dieser Dissertation geht meine Episode als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *iwb* zu Ende, die weit mehr als nur eine Promotion war. Für diese Gelegenheit und das damit verbundene Vertrauen möchte ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Michael F. Zäh, den beiden Institutsleitern, bedanken. Insbesondere die Institutskultur und die wohlwollende Förderung durch meinen Doktorvater werden mir stets in guter Erinnerung bleiben. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Johannes Fottner (Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik an der TUM) für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Markus Lienkamp (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik an der TUM) für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes im Zuge der Finalisierung des Promotionsvorhabens.

Das zugrunde liegende Forschungsprojekt zur dynamischen und Individuellen Werkerinformation wurde durch die MAN Truck & Bus von Dezember 2015 bis November 2019 gefördert. Mein Dank gilt insbesondere Dr. Christoph Rimpau und Dr. Florian Hagemann für die intensive Begleitung und vertrauensvolle Zusammenarbeit, Dr. Matthias Meindl für die Förderung während meiner Tätigkeit als Werkleiterassistent sowie meinen ehemaligen Bürokolleg(inn)en im Werk für die gute Zeit und den täglichen Spiegel der Industriepaxis. Dadurch konnte ich Erkenntnisse gewinnen, die einen wertvollen Beitrag zur Forschung geleistet haben.

Aus dem Institut, vor allem dem Forschungsfeld „Mensch in der Fabrik“ mit Nane, Susanne und Barbara, bleiben mir zahlreiche interessante Erlebnisse wie die diversen Demos im Lernlabor und die intensiven Diskussionen immer in guter Erinnerung. Besonders haben mir auch die ausgiebige Gespräche mit Felix und Dino, unter anderem zum vorliegenden Dokument, aber vor allem darüber hinaus, Spaß bereitet. Prägend bleiben für mich die gemeinsamen Dienstreisen und Projekte. Ebenso blicke ich gerne auf die Studienzeit mit Klaus und Michael zurück, die uns gemeinsam auf die Promotionszeit und vieles mehr vorbereitet hat.

Des Weiteren haben besonders meine Eltern Annette und Thomas und meine Geschwister Lianne und Jonas sowie Verwandte und Freunde einen großen Anteil an meiner Entwicklung und der damit verbundenen Zeit, die ich nicht missen möchte. Allen Beteiligten, und zeitweise Betroffenen, gilt mein herzlichster Dank für die uneingeschränkte Unterstützung.

Zu allermeist möchte ich meiner wundervollen Frau Lisa danken für ihren grenzenlosen Rückhalt, ohne den diese anstrengende, aufregende, lehrreiche, lustige, erfüllende und schließlich unvergessliche Episode nicht möglich gewesen wäre. Unsere Familie mit Charlotte und Frederick war mir immer die stärkste Motivation und schönste Ablenkung zugleich.

München, im Juli 2021

Severin Teubner

Abstract

In this research project, we propose a worker information system that paves the way towards dynamic and individual information to support workers at mixed-model assembly stations. Associated with a dynamically changing production system, dynamic information shall specify information depending on specific products or production processes. Individual information depends on the individual worker. We build upon a classification scheme for worker information systems, and a system-theoretical design approach conceptualizing system functions and types of system elements such as data models, sets of rules, and views. The interaction of these system elements enables the system functions. Based on a thorough literature review and a requirements study, eight necessary system functions were derived:

Dynamic system functions:

1. Assembly order-specific information selection
2. Product or process changes flagging
3. Assembly mistakes notification
4. Product or process commenting

Individual system functions:

5. Role-specific information separation
6. Qualification-specific information adjustment
7. Teaching process support
8. Variant transparency provision

For the system elements, a basic system is defined, containing elements common to all eight system functions, such as the worker information itself. Next, system elements specific to each distinct function are developed. For the dynamic and individual system functions, two aspects can be emphasized: Within the dynamic system functions, the system elements are designed to enable a consistent generation and presentation of product or process changes, assembly mistakes, and comments. Regarding the individual system functions, the system elements enable switching from a full process sequence to a variant-oriented information presentation depending on the qualification.

The developed dynamic and individual worker information system is designed in a modular way to be adaptable to use case-specific needs. The adaption is supported by a configuration method, and is demonstrated with five different prototypical implementations.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	i
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung.....	6
1.3 Zielsetzung.....	7
1.4 Arbeitsaufbau	10
1.5 Forschungskonzeption	12
2 Grundlagen	19
2.1 Montagearbeit	19
2.2 Montageassistenzsysteme	23
2.3 Werkerinformationssysteme	26
3 Stand der Forschung	35
3.1 Werkerinformationssysteme – Veröffentlichungscluster Priorität A	37
3.2 Werkerinformationssysteme – Veröffentlichungscluster Priorität B	47
3.3 Forschungsbedarf – Fazit.....	56
4 Anforderungsstudie	59
4.1 Potenzialanalyse	60
4.2 Anforderungsableitung	61
5 Dynamisches und individuelles Werkerinformationssystem.....	65
5.1 Systementwurf.....	65
5.2 Basis-Werkerinformationssystem	70
5.2.1 Systemelement Datensätze	70
5.2.2 Systemelement Regelwerke	77
5.2.3 Systemelement Anzeigefelder	79
5.3 Dynamische Systemfunktionen	84
5.3.1 Auftragspezifische Informationsselektion	84
5.3.2 Änderungsmarkierung	87
5.3.3 Montagefehlermeldung.....	92
5.3.4 Produkt-/Prozesskommentierung.....	96

5.4	Individuelle Systemfunktionen	99
5.4.1	Rollenspezifische Informationsaufteilung	99
5.4.2	Qualifikationsspezifische Informationsauswahl	102
5.4.3	Anlernprozessförderung	109
5.4.4	Variantentransparenzunterstützung	113
5.5	Zusammenfassung	116
6	Konfigurationsmethode	125
6.1	Schritt 1 – Arbeitsplatz auswählen	126
6.2	Schritt 2 – Systemfunktionen festlegen	127
6.3	Schritt 3 – Systemelemente gestalten	128
7	Prototypeneinsatz	135
7.1	Tablet-App Anbauteilmontage	136
7.2	Tablet-App Prüflinien	141
7.3	Anlernmappe Bremskreisprüfung	145
7.4	Werkerinfo Luftkesselvorgruppierung	148
7.5	Werkerinfo Seitenschutz- und Kotflügelstützenmontage	150
8	Evaluation	153
8.1	Verifikation – Prüfung auf Anforderungen	153
8.2	Validierung – Beurteilung des Werkerinformationssystems	154
8.3	Aufwand-Nutzen-Analyse – Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	159
8.4	Limitation – Einschränkung der Ergebnisse	162
9	Abschluss	165
9.1	Resümee	165
9.2	Ausblick	166
10	Anhang	169
10.1	Klassifikationsmodell Werkerinformationssysteme	169
10.2	Werkerinformationspakete	173
10.3	Anzeigekonzepte	177
10.4	Leitfaden Werkerinformation	182
10.5	Prototypen	185
10.6	Wissenschaftliche Methoden	195
10.6.1	Literaturrecherche	195
10.6.2	Expertenworkshop	208

10.6.3 Fokusgruppenbildung	215
10.6.4 Blackbox-Betrachtung und Funktionsmodellierung	216
10.6.5 Agile Entwicklungsmethoden	216
10.6.6 Probanden-/Feldstudie	216
10.7 Wissenschaftliche Techniken	218
10.7.1 Modellierung – Systemtheorie	218
10.7.2 Schlussfolgerungstypen.....	219
10.8 Glossar.....	221
Studienarbeitsverzeichnis	223
Vorveröffentlichungsverzeichnis	225
Literaturverzeichnis	227
Icnerzeichnis	267
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	xi

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitsplatz
AVO	Arbeitsvorgang
AVOG	Arbeitsvorgangsgruppe
AVOV	Arbeitsvorgangsvariante
CPS	Cyber-physisches System
ERP	Enterprise Resource Planning
HMD	Head-mounted-Displays
MA	Mitarbeiter
MES	Manufacturing Execution Systems
MV	Montagevariante
Dyn.	Dynamisch
Ind.	Individuell
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
MTO	Mensch-Technik-Organisation
WI	Werkerinformation
WIP	Werkerinformationspaket
WIS	Werkerinformationssystem
VÖ(s)	Veröffentlichung(en)
x^H	Anzeigehäufigkeit
x^{D-min}	minimale Anzeigedauer
x^{D-max}	maximale Anzeigedauer

1 Einleitung

Die Taktzeit läuft. Der Werker¹ erblickt das nächste Produkt auf dem Fließband. Dieses Mal Variante 3 aus 42. Eilig sucht er die notwendigen Komponenten zusammen. Wie genau werden diese noch einmal montiert? Die Zeit rinnt davon. Der Anspruch lautet: jedes Produkt muss fehlerfrei montiert sein. Denn Zeit für Korrekturen hat er nicht. Und ohne ihn kann die nächste Station nicht weiterarbeiten. Die Zeit ist abgelaufen. Es folgt der nächste Auftrag.

Die beschriebene fiktive Montageszene veranschaulicht vorab die Ausgangssituation dieser Forschungsarbeit und ermöglicht dem Leser ein besseres Verständnis der Problemstellung.

Im Folgenden wird die Ausgangssituation mit Abschnitt 1.1 näher beleuchtet, indem maßgebliche Einflussfelder dieser stereotypischen Montageaufgabe betrachtet werden. Zugleich wird damit für spätere Generationen ein Gefühl für den Handlungskontext gegenwärtiger Ingenieursarbeit überliefert. Abschnitt 1.2 schildert anschließend detailliert die dieser Arbeit zugrunde liegende Problemstellung, woraus in Abschnitt 1.3 die Zielsetzung abgeleitet wird. Abschnitt 1.4 gibt einen Überblick über den Aufbau dieser Arbeit und Abschnitt 1.5 zeigt auf, wie in diesem Forschungsprojekt vorgegangen wurde.

1.1 Ausgangssituation

Für den Überblick zur Ausgangssituation werden drei Einflussfelder betrachtet, die den hier vorliegenden Betrachtungsbereich manueller Montage prägen (Abbildung 1-1). Zunächst wird auf das *Produktionsumfeld* und dessen Auswirkungen eingegangen. Darauf folgen die *Produktionsmitarbeiter* und die *Produktionstechnologie* als für diese Arbeit zentrale Dimensionen des Mensch-Technik-Organisation-Schemas (MTO-Schema)².

¹ Der Lesertlichkeit halber wird in diesem Dokument verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Männer und Frauen sind dabei selbstredend gleichermaßen gemeint.

² Das MTO-Schema wird zur strukturierten Modellierung und Gestaltung von soziotechnischen Systemen verwendet (ULICH & WÜLSER 2010, S. 238-242). Die Produktionsorganisation wird nicht als separates Einflussfeld untersucht, sondern in die Betrachtung von Produktionsmitarbeiter und Produktionstechnologie integriert, da sie nicht im Fokus dieser Arbeit steht.

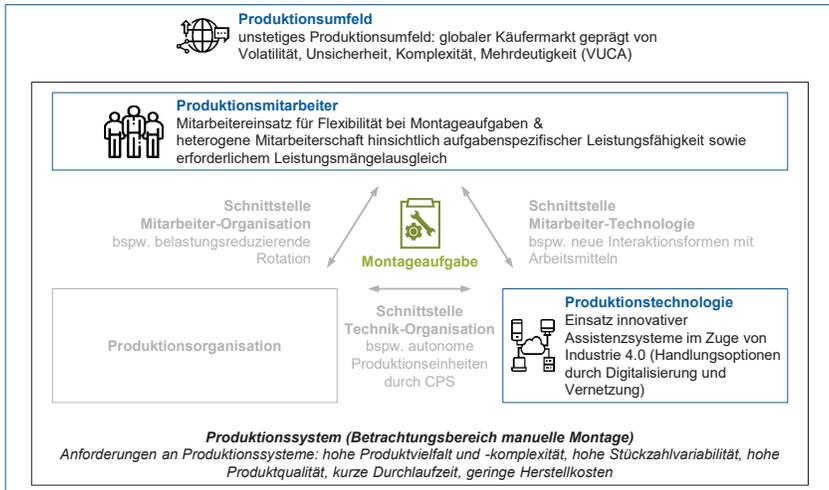


Abbildung 1-1: Übersicht der Einflussfelder und wesentlicher Einflussgrößen mit prägender Wirkung auf die manuelle Montage

Einflussfeld Produktionsumfeld

Der Wandel von lokalen Verkäufemärkten zu einem globalen Käufermarkt führt zu einem Wettbewerb produzierender Unternehmen hinsichtlich Qualität, Lieferzeiten und Kosten. Dieser Wettbewerb wird unter Randbedingungen geführt, die durch das englischsprachige Akronym VUCA³ beschrieben werden können: Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Mehrdeutigkeit zeichnen den weltweiten Handel aus. Flexibilität und ähnliche Formen von Veränderungsfähigkeit, wie Wandlungsfähigkeit oder Agilität, stellen eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Erfüllung der Kundenwünsche dar. Wo Flexibilität nicht durch angepasste Geschäftsmodelle oder hardwareunabhängige Software umgesetzt werden kann, steht die Produktion vor teilweise antinomen Zielsetzungen. Produktionssysteme müssen für eine große Produktvielfalt und -komplexität sowie variable Stückzahlen bei hoher Produktqualität, kurzen Durchlaufzeiten und geringen Herstellkosten befähigt werden. (REINHART & ZÜHLKE 2017, S. xxxv-xxxviii; SPATH 2013)

³ Das Akronym VUCA steht im Englischsprachigen für die Begriffe Volatility, Uncertainty, Complexity und Ambiguity (BENNETT & LEMOINE 2014, S. 313).

Einflussfeld Produktionsmitarbeiter

Vollautomatisierte Produktionssysteme arbeiten zum Teil nicht so flexibel und wirtschaftlich wie die Koproduktion von Mensch und Maschine (SPATH 2013, S. 52-53). Als prominentes Beispiel kann Tesla genannt werden. Der Ansatz einer nahezu vollständig automatisierten Produktion des Model 3 ist vorerst gescheitert, da die installierte Anlagentechnik nicht die geforderte Qualität und Stückzahl liefern konnte (GIBBS 2018). Damit reiht sich diese Tesla-Produktion in eine Chronologie erfolgloser „Produktionsautomaten“ ein, in der sich auch Volkswagen mit der menschenlosen Golfproduktion in Halle 54 in den 80er Jahren wiederfindet, damals getrieben von dem Automatisierungsenthusiasmus des CIM⁴-Zeitalters (REINHART & ZÜHLKE 2017, S. xxxiii).

Die Vorteile der menschlichen Arbeitskraft liegen in einer großen Flexibilität bei der Ausführung von Montageaufgaben sowie in der Fähigkeit, sich schnell an neue Aufgaben und Situationen anzupassen (SCHLIEßMANN 2014, S. 454). Daher eignen sie sich besonders für einen Einsatz in Montagesystemen mit hoher Produktvariabilität. Ansätze des mitarbeiterorientierten Produktionsmanagements versuchen, die Mitarbeiterressource mit Hinblick auf die Balance zwischen Flexibilitäts- und Produktivitätszielen und unter Berücksichtigung ergonomischer Leitlinien einzusetzen (TEUBNER ET AL. 2018, S. 647). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Entwicklungstrends⁵ wie der demographische Wandel (ABELE & REINHART 2011, S. 19-21), die Integration von leistungsgewandelten Mitarbeitern (EGBERS 2013, S. 19) sowie der Einsatz von Leiharbeitnehmern (SPATH 2013, S. 75) zu einer verstärkten Heterogenität der Gruppe hinsichtlich ihrer aufgabenspezifischen Leistungsfähigkeit führen. Zudem müssen typische menschliche Leistungsmängel im Vergleich zur Maschine, wie beispielsweise ein schlechteres Erinnerungsvermögen oder eine begrenzte Zuverlässigkeit, ausgeglichen werden (KRAISS 1998, S. 460). Dies ist mit Hinblick auf die gleichbleibend hohen Qualitäts- und Produktivitätsziele einer variantenreichen Serienmontage und insbesondere für den Produktionserfolg am Hochlohnstandort Deutschland von entscheidender Bedeutung (SPATH 2013, S. 40-55).

⁴ CIM (Computer Integrated Manufacturing) bezeichnet die Integration der Informationsverarbeitung in die Produktionsprozesse, um eine flexible Automatisierung zu ermöglichen. Dabei wirken CAD- und CAM-Technologien mit der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zusammen. (FAVRE-BULLE 2004, S. 183-189).

⁵ Europäische Statistiken zur Bevölkerungsentwicklung und zum Arbeitsmarkt sind beispielsweise zu finden unter EUROSTAT 2019.

Einflussfeld Produktionstechnologie

Als Reaktion auf ein unstabiles Produktionsumfeld (Market Pull) und eine heterogene Mitarbeiterschaft werden in der Montage, getrieben vom technologischen Fortschritt (Technology Push) und subsummiert unter dem Schlagwort Industrie 4.0, zunehmend cyber-physische Systeme (CPS)⁶ implementiert. Kaum ein Schlagwort war in der letzten Dekade so omnipräsent, sodass es in dieser Arbeit nicht unerwähnt bleiben kann:

Industrie 4.0 ist eine industriepolitische Kampagne, welche die „intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie“ (IKT) bezeichnet und dabei auf dem Digitalisierungsbestreben beim Einsatz computergestützter Systeme aufbaut (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019). „Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich [am gesamten Lebenszyklus⁷ zunehmend individueller Kundenwünsche ausrichten und] nach unterschiedlichen Kriterien wie beispielsweise Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen“ (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2015, S. 8).

Die neuen Handlungsoptionen durch die Digitalisierung und Vernetzung sind derart vielfältig und vielversprechend, dass eine vierte industrielle, technologiegetriebene Revolution vorhergesagt wird⁸. Dabei steht historisch betrachtet eine Rückgewinnung von Flexibilität im Fokus⁹. Mit der Entwicklung neuer Technologien soll der Spagat zwischen Flexibilität und Produktivität

⁶ Als cyber-physische Systeme werden Systeme mit eingebetteter Software bezeichnet. Sie können unter anderem über Sensoren physikalische Daten erfassen und verarbeiten, über digitale Kommunikationseinrichtungen untereinander verbunden sein, über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen und über Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken. Damit verschmelzen die physikalische und die digitale Welt. (ACATECH – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN 2011, S. 13).

⁷ „Dieser Zyklus orientiert sich an den zunehmend individualisierten Kundenwünschen und erstreckt sich von der Idee, dem Auftrag über die Entwicklung und Fertigung, die Auslieferung eines Produkts an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen“ (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2015, S. 8).

⁸ Während des CIM-Zeitalters wurden schon ähnliche Gedanken entwickelt, jedoch waren die technologischen Möglichkeiten noch nicht so weit fortgeschritten (REINHART & ZÜHLKE 2017, S. xxxiii). Zudem stellt vor allem die Vernetzung dabei die revolutionäre Weiterentwicklung des Computereinsatzes dar (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019).

⁹ Mit dem Zusammenschluss von Handwerkern in Manufakturen begann im späten Mittelalter die Entwicklung der Fabrik (lateinisch: fabrica = Werkstätte) und in der Folge die Begründung der industriellen Produktionswirtschaft (KETTNER ET AL. 1984, S. 1; MOMMERTZ 1981, S. 47-50). Im Zuge der drei technologiegetriebenen Revolutionen, beginnend bei den Dampfmaschinen über die Elektrifizierung mittels Elektromotoren bis hin zu einer von Elektronik geprägten Anlagenautomatisierung, konnte beständig die Produktivität in den Fabriken gesteigert werden (BUBB ET AL. 2016, S. 837; REINHART & ZÜHLKE 2017, S. xxxi). Dies ging jedoch mit einem stetigen Flexibilitätsverlust durch den vermehrten Einsatz von starrer Technologie einher (SPUR 2009, S. 1063).

gelingen, um im beschriebenen Produktionsumfeld zu bestehen (REINHART & ZÜHLKE 2017, S. xxxiv).

Die Technikentwicklung in der Montage wirkt über das Element Technik des MTO-Schemas hinaus auch auf die drei Schnittstellen des Schemas ein: Mensch-Technik, Technik-Organisation und damit indirekt auch Mensch-Organisation (BENGLER ET AL. 2017, S. 54-55). In der Verbindung von Technik und Organisation können zum Beispiel durch den Einsatz von CPS autonome Produktionseinheiten entstehen (REINHART ET AL. 2013) und im Bereich Mensch-Organisation ergeben sich neue Möglichkeiten der Arbeitsplanung und -steuerung¹⁰, beispielsweise in Form von bedarfsabhängiger Mitarbeiterereinsatzplanung (HÄMMERLE 2015) oder belastungsreduzierender Rotation (TROPSCUH & REINHART 2020).

Im Hinblick auf die Schnittstelle Mensch-Technik betrifft der technologische Fortschritt auch die Arbeitsausführung. Mit dem Einsatz von Assistenzsystemen entstehen neue Interaktionsformen mit Arbeitsmitteln, beispielsweise bei der Mensch-Roboter-Kooperationen oder dem Einsatz von Smart Devices¹¹. Dadurch ergeben sich beträchtliche Möglichkeiten zur Mitarbeiterentlastung und zum Ausgleich von Leistungsmängeln (REINHART & ZÄH 2014, S. 516). Dabei entstehen jedoch auch neue Anforderungen an die Mitarbeiter bei der Technik-Interaktion und Herausforderungen bei der Gestaltung assistierender Arbeitsmittel, mit der sich die Produkt- und Produktionsergonomie befassen (BUBB ET AL. 2016, S. 839).

Aus der Betrachtung der drei Einflussfelder Produktionsumfeld, Produktionsmitarbeiter und Produktionstechnologie wird das Potenzial von Werkerinformationssystemen (WIS) als einem Typus von Assistenzsystemen abgeleitet, produzierende Unternehmen und insbesondere die Werker bei der Auftragsabwicklung zu unterstützen. Die darauf aufbauende Problemstellung wird im nächsten Abschnitt dargelegt.

¹⁰ Neben den vier technologischen Revolutionen wird spannend zu beobachten sein, inwiefern sich im Zuge von Industrie 4.0 nach Taylorismus (Ressourcenauslastung) und Schlanker Produktion (Durchlaufzeitverkürzung, Verschwendungsvermeidung) auch neue produktionstechnische Paradigmen und Formen einer „agilen“ Produktionsorganisation, beispielsweise mit Konzepten eines mitarbeiterorientierten Produktionsmanagements, entwickeln werden.

¹¹ Smart Devices sind kabellose, mobile, vernetzte und mit verschiedenen Sensoren ausgestattete elektronische Geräte, wie beispielsweise Smartphones, Tablet PCs oder Datenbrillen (FRAUNHOFER IML 2019). Als Multifunktionsgeräte mit Informations- und Kommunikationstechnologie fungieren sie als Zugangportal zu zahlreichen Diensten, die lokal oder über vernetzte Server laufen (POSLAD 2009, S. 27).

1.2 Problemstellung

Die vorausgegangenen Schilderungen verdeutlichen, dass Werkerinformationssysteme für die Unterstützung der Montagemitarbeiter bei einer hohen Variantenvielfalt unabkömmlich sind und eine entsprechend flexible sowie produktive hochvariable Serienmontage ermöglichen können, wie sie in dem einleitenden, fiktiven Beispiel veranschaulicht wurde (DOMBROWSKI ET AL. 2010, S. 282; FELDMANN & LANG 2005, S. 25; FRANKE & RISCH 2009, S. 822). Dabei sollen sie für diese Arbeit wie folgt definiert sein:

Werkerinformationssysteme informieren Werker über auszuführende Tätigkeiten auf explizite und regelbasierte Weise. Die bereitgestellte Information wird als Werkerinformation bezeichnet. (TEUBNER ET AL. 2019B, S. 353; i.A.a. LANG 2007, S. 19)

Als *industrieller Leidensdruck* kristallisiert sich jedoch heraus, dass derzeitige Werkerinformationssysteme oftmals statische Standardlösungen beinhalten und sich am One-fits-all-Prinzip orientieren (FRANKE & RISCH 2009, S. 822; RADOW 1999, S. 28; ZÄH ET AL. 2007A, S. 646) und somit inhaltlich nicht anforderungsgerecht gestaltet sind (ADAMI ET AL. 2008, S. 196; AEHNELT & BADER 2014, S. 2; HAUG 2015, S. 170). Dies hat vor allem zwei Effekte zur Folge: Zum einen ist die Werkerinformation im Sinne der *Informationsübermittlung ineffizient* (FELDMANN ET AL. 2002, S. 405; WIESBECK 2014, S. 52), sodass kostenintensive Arbeitszeit mit nicht wertschöpfenden Tätigkeiten verbracht wird. Beispielsweise liegen Produktänderungshinweise nicht direkt am Arbeitsplatz bereit oder erfahrene Werker erhalten zu viele Informationen. Zum anderen resultieren *signifikante Nacharbeitsaufwände*, wenn unzureichende Informationen Montagefehler verursachen (FELDMANN & LANG 2005, S. 28; WIESBECK 2014, S. 4). Zum Beispiel können Produktänderungen übersehen werden oder einem unerfahrenen Mitarbeiter nicht ausreichende Informationen vorliegen.

Aus den Handlungsoptionen im Kontext von Industrie 4.0 entsteht die *Lösungsidee* eines dynamischen und individuellen Werkerinformationssystems. Dieses soll statische Standardlösungen ersetzen und damit dem un stetigen Produktionsumfeld begegnen. Die Individualität löst One-fits-all-Informationen ab und soll einer heterogenen Gruppe von Produktionsmitarbeitern gerecht werden. Die bis hierhin beschriebene Argumentationskette ist in Abbildung 1-2 zusammengefasst.

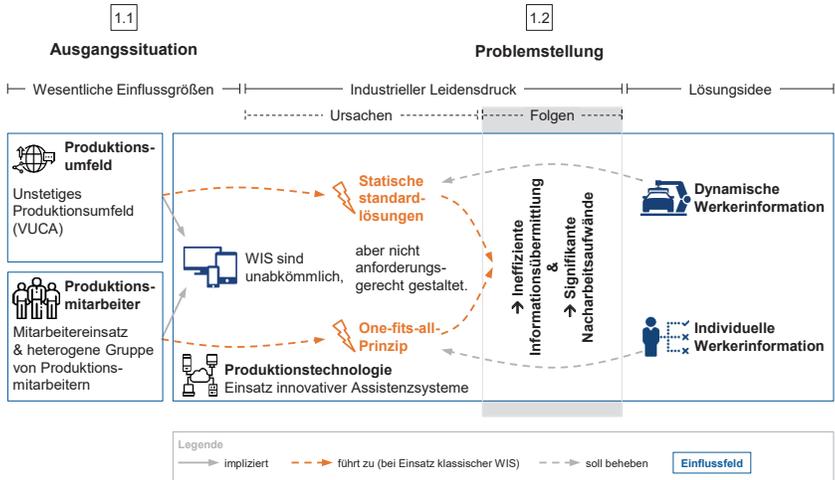


Abbildung 1-2: Argumentationskette zur Entstehung der Lösungsidee dynamischer und individueller Werkerinformation zur Adressierung der Problemstellung

Hierbei treffen die zwei grundsätzlichen Arten der ingenieurtechnischen Innovation aufeinander, bei der entweder für ein bestehendes Mittel ein neuer Zweck gefunden wird oder bei der für einen bestehenden Zweck ein neues Mittel entwickelt wird (KORNWACHS 2018, S. 39). Für das bestehende Mittel der Digitalisierung und Vernetzung wurde ein neuer Einsatzzweck gefunden. Das exakte neue und damit innovative Mittel in Form eines dynamischen und individuellen Werkerinformationssystems für den Zweck „Behebung des industriellen Leidensdrucks“ gilt es jedoch noch zu entwickeln, woraus sich die Zielsetzung dieser Arbeit ableitet, die im nächsten Abschnitt detailliert wird.

1.3 Zielsetzung

Unter der *Forschungshypothese*, dass in einer manuell geprägten hochvariablen Serienmontage mit einer dynamischen und individuellen Werkerinformation dem industriellen Leidensdruck begegnet und zur Informationseffizienzsteigerung sowie Nacharbeitsreduktion beigetragen werden kann, lautet das *Ziel* dieses Dissertationsprojekts:

Anforderungsgerechte Informationsbereitstellung mittels eines dynamischen und individuellen Werkerinformationssystems

Die Bedeutung von 'anforderungsgerecht' wird in Kapitel 4 mit einer Studie zu inhaltlichen Anforderungen spezifiziert. An dieser Stelle sei betont, dass sich dieses Forschungsprojekt

nicht auf eine ergonomisch anforderungsgerechte Gestaltung oder eine technisch hardware-orientierte Entwicklung eines Werkerinformationssystems (Arbeitsmittels) fokussiert.

Ein dynamisches und individuelles Werkerinformationssystem stellt dynamische und individuelle Werkerinformation bereit und ist damit das Mittel zum Zweck. Dabei sind dynamische oder individuelle Informationen für diese Arbeit nach TEUBNER ET AL. (2019B, S. 353) wie folgt definiert:

Eine dynamische Information ist angepasst an das Produkt oder den Prozess.

Eine individuelle Information ist angepasst an den Werker.

Für die Zielerreichung werden zwei *wissenschaftliche Arbeitsergebnisse* angestrebt. Grundsätzlich ist die Modellierung des erforderlichen dynamischen und individuellen Werkerinformationssystems notwendig. Zudem soll eine Konfigurationsmethode interessierte Unternehmen bei der Implementierung des entwickelten Werkerinformationssystems unterstützen, damit Industriebetriebe von den Erkenntnissen profitieren und ihren Leidensdruck beheben können.

Die Arbeitsergebnisse können keine allgemeingültige Anwendbarkeit für jegliche Produktionssysteme beanspruchen, sondern beziehen sich zwangsläufig auf einen für die Anwendung geeigneten *Betrachtungsbereich*. Abbildung 1-3 stellt ausgehend vom Produktionssystem die Fokussierung auf bildschirmbasierte Werkerinformationssysteme anhand einer kaskadischen Subsystembetrachtung dar. Aufgrund des intensiven Mitarbeitereinsatzes, der hohen Informationsvielfalt und der zeitkritischen Aufgabendurchführung wird die Betrachtung von Montagearbeitern (auch Werkern genannt) einer manuell geprägten hochvariablen Serienmontage nach dem Fließprinzip als sinnvoll erachtet, wie in den vorherigen beiden Abschnitten hergeleitet wurde. Dabei werden, wie in der Definition eines Werkerinformationssystems verankert (siehe Abschnitt 1.2), ausführungsbegleitende prozess- und produktbezogene sowie explizite, regelbasierte Informationen fokussiert. Zudem soll in dieser Forschungsarbeit die Information und nicht die Technologie im Vordergrund stehen. Daher werden bildschirmbasierte Werkerinformationssysteme genutzt, wie sie oftmals schon in den Betrieben eingesetzt werden, denn große Monitore bieten ausreichend Platz für die Vielzahl an Informationen.

Produktions- system	Betrachtungsbereich	Abgrenzung zu anderen ...
Fokussierung	<ul style="list-style-type: none"> Manuell geprägte Montage 	<ul style="list-style-type: none"> ... Unternehmensbereichen wie Instandhaltung, Logistik oder (vollautomatisierten) Montage-/Fertigungsanlagen
	<ul style="list-style-type: none"> Hochvariable Serienmontage nach Fließprinzip 	<ul style="list-style-type: none"> ... Produktionsarten wie Einzel-, Massenproduktion und Produktionsprinzipien wie Baustellen-, Werkstatt-, Gruppenproduktion
	<ul style="list-style-type: none"> Montagemitarbeiter (Werker) auf Arbeitsstationsebene 	<ul style="list-style-type: none"> ... Mitarbeitergruppen wie Montagebereichsleiter, Gruppenleiter
	<ul style="list-style-type: none"> Unterstützung der Wahrnehmung von Montageaufgaben 	<ul style="list-style-type: none"> ... Assistenzfeldern wie Entscheidung, Ausführung (Bedienkonzepte, Mensch-Roboter-Kollaboration, Kameraüberwachung)
	<ul style="list-style-type: none"> Ausführungsbegleitende prozess- und produktbezogene Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> ... Informationsarten wie Einsatzplanung, Produktionskennzahlen
	<ul style="list-style-type: none"> Explizite und regelbasierte Werkerinformation 	<ul style="list-style-type: none"> ... Informationsquellen wie formlose (meist mündliche) Mitarbeiterunterweisung oder vorkommissionierte Komponenten
	<ul style="list-style-type: none"> Bildschirmbasierte Werkerinformationssysteme 	<ul style="list-style-type: none"> ... Informationstechnologien wie Datenbrillen, Lautsprecher
Werker- informations- system		

Abbildung 1-3: Kaskadische Subsystembetrachtung zur Fokussierung des Betrachtungsbereiches einer bildschirmbasierten Werkerinformation für manuell geprägte, hochvariable Serienmontage

Entsprechend der Zielsetzung sind drei leitende *Forschungsfragen* zu beantworten, die als Wegweiser für die Lösungsfindung aufgefasst werden können. Sie ergeben sich entlang des Dreischritts synchron zur Funktionsweise eines potenziellen Werkerinformationssystems:

1) Kontext erfassen, 2) Informationen komponieren, 3) Informationen bereitstellen.

FF1) *Kontext erfassen*: Welche Werkerinformationspakete und welche Parameter müssen für eine dynamische und individuelle Werkerinformation erfasst werden?

FF2) *Informationen komponieren*: Wie können dynamische und individuelle Werkerinformationen komponiert werden?

FF3) *Informationen bereitstellen*: Wie können dynamische und individuelle Werkerinformationen bereitgestellt werden?

Die mit der Erforschung der entsprechenden Antworten einhergehende Vorgehensweise wird in Abschnitt 1.5 detailliert vorgestellt. Zuvor wird mit dem nächsten Abschnitt ein Überblick zur Gliederung der Inhalte gegeben.

1.4 Arbeitsaufbau

Den Aufbau dieser aus neun Kapiteln bestehenden Forschungsarbeit wird in Abbildung 1-4 illustriert. Sie strukturiert zentrale, inhaltliche Komponenten in der Gliederung und kennzeichnet die Forschungsartefakte. Unter Forschungsartefakten werden in dieser Arbeit elementare gedankliche Konstrukte verstanden, die während des Forschungsprozesses als Eckpfeiler einer wissenschaftlichen Aufgabenstellung dienen.

Nach der bereits beschriebenen Ausgangssituation, Problemstellung sowie Zielsetzung werden in diesem und nächsten Abschnitt der Aufbau der Arbeit sowie die Forschungskonzeption vorgestellt. In Kapitel 2 wird die terminologische Grundlage für das Verständnis der Arbeit gelegt. Im Stand der Forschung (Kapitel 3) werden bestehende Arbeiten in den Bereichen dynamischer und individueller Werkerinformationssysteme im gewählten Betrachtungsbereich untersucht und ein Forschungsbedarf im Sinne eines wissenschaftlichen Leidensdrucks abgeleitet.

In Kombination mit einer zusätzlichen Studie, bei der Produktionsexperten und Produktionsmitarbeiter einbezogen wurden, werden Anforderungen zu dynamischer und individueller Werkerinformation spezifiziert (Kapitel 4). Mit Hilfe der Systemtheorie wird in Kapitel 5 das Werkerinformationssystem beschrieben. Die notwendigen Systemfunktionen werden aus den Anforderungen überführt und laufen nach einem Dreischritt aus Kontext erfassen, Informationen komponieren und Informationen bereitstellen ab. Die Funktionen werden von Systemelementen und -relationen ermöglicht, die in Form von Lösungsbausteinen entlang der Forschungsfragen erarbeitet werden.

In Kapitel 6 wird die Konfigurationsmethode vorgestellt, die in Kapitel 7 beispielhaft mit entwickelten Prototypen des dynamischen und individuellen Werkerinformationssystems angewendet wird. Darauf folgen die Evaluation und die Abschlussbetrachtung.

Die Erarbeitung der Inhalte erfolgte nicht linear chronologisch, wie es die sequenzielle Gliederung des in Form dieser Dissertation vorliegenden Abschlussberichts des Forschungsprojekts andeutet, sondern während eines heuristischen, von Iterationen geprägten Erkenntnisprozesses (KUBICEK 1977, S. 12-15). Dass dieser sich wesentlich von einer zufälligen, subjektiven und damit unwissenschaftlichen Arbeitsweise abhebt, belegt der nächste Abschnitt, in dem die umgesetzte Forschungskonzeption dargelegt wird.